

# Aplicação do *Simulated Annealing* na solução do problema de consolidação de cargas dentro da indústria alimentícia

Diego Pertile Frá e Leonardo Dagnino Chiwiacowsky

## Resumo

As organizações possuem diversos problemas em suas operações logísticas que podem ser resolvidos por meio de modelos de otimização. Um deles é o problema de consolidação de cargas. Alocar inúmeros pedidos em diversos veículos, respeitando uma série de restrições, como a capacidade do veículo, já é uma tarefa extremamente complexa. A dificuldade aumenta quando também deve-se considerar a cidade de entrega de cada pedido, para que todos os pedidos alocados em um veículo façam parte de um roteiro coerente de entrega. O contexto caracteriza o problema de consolidação de cargas, identificado como um problema de otimização combinatória da classe NP-difícil, sendo proposto o uso da meta-heurística *Simulated Annealing* (SA) para sua solução. A meta-heurística SA foi empregada para alocar pedidos em diferentes veículos, respeitando restrições de peso e volume, e minimizando os custos relacionados ao valor de frete. O desenvolvimento do modelo computacional foi realizado no software MATLAB, tendo sido gerados resultados que indicam uma redução do custo de frete em 5% se comparado ao frete real, quando avaliada uma semana típica de pedidos a serem consolidados.

## Palavras-chave

Indústria 4.0, Consolidação de Cargas, Meta-heurísticas, Otimização Combinatória, *Simulated Annealing*.

# Application of Simulated Annealing to solve the problem of cargo consolidation within the food industry

## Abstract

Organizations have several problems in their logistics operations that can be solved using optimization models. One is the problem of cargo consolidation. Allocating numerous orders to different vehicles while respecting a number of restrictions, such as vehicle capacity, is already an extremely complex task. The difficulty increases when the city of delivery of each order must also be considered, so that all orders allocated in a vehicle are part of a coherent delivery route. The context characterizes the cargo consolidation problem, identified as a combinatorial optimization problem of NP-hard complexity, and the use of the Simulated Annealing (SA) meta-heuristic is proposed for its solution. The SA meta-heuristic was used to allocate orders in different vehicles, respecting weight and volume constraints, and minimizing costs related to the value of freight. The development of the computational model was carried out in the MATLAB software, with results that indicate a 5% reduction in the cost of freight compared to real freight, when evaluating a typical week of orders to be consolidated.

## Keywords

Industry 4.0, Cargo Consolidation, Metaheuristic, Combinatorial Optimization, Simulated Annealing.

## I. INTRODUÇÃO

A logística sempre foi um dos grandes pontos de atenção da indústria, independente do seu setor de atuação. No setor da indústria de alimentação não é diferente. São muitas variáveis que devem ser levadas em consideração quando se pensa em como entregar alimentos aos clientes. Fatores como prazo de entrega e custo de operação devem ser considerados, caso contrário podem fazer com que sejam gerados resultados negativos na operação logística da empresa. Além disso, existem outras variáveis inerentes ao processo e que são mais

difíceis de serem mensuradas, como por exemplo, o nível de exigência dos clientes e sua percepção de valor com relação ao processo de entrega por parte das empresas e de sua rede de transporte, seja ela própria ou terceirizada.

Administrar bem a atividade logística é um grande diferencial para as organizações e, por isso, este ponto tem recebido uma atenção maior por parte das empresas e, por consequência, também de pesquisas científicas. Essa tendência vem crescendo em virtude da logística ser tratada como um serviço ao cliente, havendo a necessidade de garantir

prazos de entrega curtos e exigindo a oferta de melhores níveis de disponibilidade de mercadorias. Para melhorar esse nível de serviço ao cliente, roteirização, custo de transporte, otimização, atrasos, armazenagem e consolidação de cargas são alguns dos aspectos considerados em trabalhos científicos e que devem ser observados pelas empresas [1].

Dentre os aspectos citados, a consolidação de cargas será foco do presente estudo. O termo consolidação de cargas é utilizado para se referir à rotina operacional relacionada à determinação das regras de expedição empregadas a cada vez que um pedido de cliente for recebido. Entretanto, a determinação adequada destas regras não é uma tarefa simples, sendo sua identificação essencial para trazer os melhores resultados operacionais e financeiros para a organização. Algumas questões surgem com relação à aplicação da consolidação de cargas, como por exemplo, em que momento a aplicar e quais variáveis devem ser consideradas [1]. A literatura tem investigado de forma ampla questões a respeito da consolidação de cargas e entende que o problema é composto por muitas variáveis, como os custos de frete e pedágio, além de diferentes restrições, como a capacidade do veículo e a rota do cliente. Essas variáveis e restrições dependem muito do contexto da organização. Devido a essa complexidade em determinar uma melhor solução é que o problema de consolidação de cargas é considerado um problema de otimização [2].

Assim como qualquer área ou processo de uma organização, o setor logístico também se beneficiou da tecnologia e suas ferramentas para aprimorar os processos envolvidos em toda a cadeia logística. Como a tecnologia não para de evoluir, os processos precisam progredir de forma paralela. Essa rápida evolução da tecnologia nos últimos anos trouxe um termo que engloba diversas vertentes de tecnologia e que é muito discutido nos tempos atuais: a Indústria 4.0. Entende-se que esse conceito possa trazer inúmeros benefícios para a indústria como a produção em massa altamente flexível, otimização em tempo real das cadeias de valor, redução dos custos de complexidade, entre outros [3].

Os métodos heurísticos têm sido fortemente utilizados de maneira associada com a Indústria 4.0, embora seja um recurso anterior à quarta revolução industrial. Atualmente, eles aparecem apoiando as tecnologias da Indústria 4.0, fazendo com que as empresas consigam obter um uso melhor e mais eficiente dos recursos oferecidos por essas tecnologias. Os métodos heurísticos fornecem meios de solucionar problemas onde se busca a identificação de uma configuração ótima que respeite as restrições de recursos e, ao mesmo tempo, otimize um objetivo de interesse, que pode ser a consolidação de cargas [4]. Outro estudo apresenta a utilização do Solver como ferramenta para obtenção da configuração ótima de carga da frota resolvendo um problema característico da logística da Marinha do Brasil. Nesse caso, são apresentadas limitações da ferramenta que, no entanto, não são impeditivos para alcançar um bom resultado na resolução do problema [4]. Em outro caso, o problema da consolidação de cargas foi resolvido com a geração de roteamentos otimizados. Foram apresentados dois tipos de otimização. Um deles analisa o planejamento em um curto prazo e o outro inclui o planejamento em diferentes períodos, ambos com o

propósito de tratar a composição de custo que possui um comportamento linear-por-partes [2]. Algoritmos heurísticos representam uma outra classe de técnicas também aplicada na solução do problema de otimização de consolidação de cargas relativas a pedidos de clientes [4]. As heurísticas demonstraram bons resultados apresentando redução nos custos do frete e no número de dias de atrasos de entrega com a máxima utilização das capacidades dos veículos, além de utilizar menores quantidades de cargas para atender a demanda de produtos [5]. Por fim, também é apresentada uma metodologia da solução baseada na solução do problema de agrupamento capacitado. Nesse estudo, foram introduzidas modificações e extensões significativas que melhoraram a qualidade das soluções obtidas e a eficiência do algoritmo [6].

O presente estudo tem como objetivo o emprego dos métodos heurísticos para o desenvolvimento de um modelo computacional de otimização com o intuito de resolver o problema de consolidação de cargas. O modelo de gerado está alinhado à realidade de uma indústria atuante no setor alimentício e sua solução possibilitará que a empresa mantenha os níveis de serviço ao cliente com o menor custo possível.

## II. REFERENCIAL TEÓRICO

### A. Logística 4.0

No início do século, a Alemanha deu início a uma série de pensamentos e iniciativas que fizeram com que ela novamente se tornasse precursora no setor industrial. Em 2011, as ideias foram concretizadas e trouxeram ao mundo o conceito de Indústria 4.0, fazendo uma alusão à quarta revolução industrial. Naquele ano, na cidade de Hannover, em uma feira industrial, os alemães apresentaram uma estratégia para o setor industrial apoiada em alta tecnologia [3]. Alinhado com as ideias então apresentadas, o termo Logística 4.0 surgiu derivado da Indústria 4.0. Ele se refere às tecnologias dessa nova revolução que podem ser aplicadas ao setor logístico. Essas tecnologias vêm se mostrando necessárias para apoiar as empresas em um mercado que é cada vez mais competitivo. Atualmente, as empresas adotam a política da produção em larga escala com o objetivo de acumular grandes estoques e, dessa forma, satisfazer as demandas dos clientes. Porém, o comportamento do consumidor vem mudando e, com isso, é necessária uma adaptação. O foco das empresas terá que ser voltado para os clientes e suas diferentes exigências. Sendo assim, as organizações deverão produzir bens ou serviços cada vez mais customizados, além de fabricar apenas o essencial e em período de tempo reduzido. Para isso, a ideia principal das empresas começa a ser o intenso uso da tecnologia como aliada ao crescimento da organização, focando em processos automatizados, que contribuam para o aumento da produtividade e o ganho de eficiência nas operações [7].

Algumas tecnologias estão em evidência com o surgimento da Indústria 4.0. Termos como Big Data, inteligência artificial, *cloud computing* e *IoT* são algumas tecnologias que podem apoiar as organizações. A seguir, é apresentada uma breve descrição sobre cada uma dessas tecnologias:

- **Big Data:** esse termo se refere à grande quantidade de dados armazenados provenientes de diversos sistemas que estão interconectados e alimentando essa base de dados em tempo real [7]. Dados como perfis de clientes, pedidos e previsões de mercado, são algumas informações que podem ser inferidas a partir do Big Data. No contexto da logística, o uso adequado dos dados armazenados permitirá a análise dos sistemas de entrega, fazendo com que os varejistas atendam às expectativas dos clientes [8].
- **Inteligência artificial:** representa uma inteligência equivalente à humana, porém realizada por meio de um conjunto de técnicas e algoritmos computacionais [7].
- **Cloud computing:** é um termo que se refere à ideia de operar qualquer sistema em ambientes diversos com o uso de plataformas de comunicação, como por exemplo a internet, com o objetivo de trazer maior agilidade de resposta aos sistemas envolvidos [7].
- **IoT:** significa *Internet of Things* ou Internet das Coisas. Essa tecnologia se resume à forma como os objetos físicos, quando conectados à internet e através do uso de sensores, se comunicam entre si e com sistemas, possibilitando a troca de informações de forma mais rápida entre diversos equipamentos e sistemas. Pesquisas apontam que quase 90% das empresas do setor logístico implementaram ou querem implementar soluções de *IoT* [8].

O conceito de *Smart Factory* também surgiu com a Indústria 4.0, sendo caracterizado por uma fábrica inteligente que utiliza as tecnologias da Indústria 4.0. Nesse novo conceito, todos os produtos seguem seu destino de forma livre nos processos de produção e são naturalmente localizados a todo momento, procurando atender à ideia de uma produção em massa econômica, mas intensamente flexível e individualizada. Acredita-se que fábricas com estas características farão com que os processos, que atualmente são complexos, se tornem fáceis de serem administrados [3].

Em síntese, a Indústria 4.0 traz alguns aspectos bem importantes [3]:

- Produtos e serviços conectados de forma flexível;
- Produção automatizada e auto otimizada de bens e serviços;
- Controles descentralizados com decisões autônomas;
- Sistemas com autorregulação e eficiência.

Neste contexto, a Logística 4.0 traz outras vantagens. Algumas delas são a otimização na análise dos dados, foco na estratégia do negócio, redução de custos e aumento na satisfação dos clientes. É importante que a estratégia da organização seja bem definida, pois todas as ações da Logística 4.0 deverão estar alinhadas com essa estratégia organizacional. Por meio do uso de softwares que apoiem o processo como um todo, é possível eliminar desperdícios, reduzir custos, otimizar tempo, entre outras ações que possibilitarão que a empresa obtenha sucesso competitivo [7].

### B. *Consolidação de cargas*

O atual cenário competitivo onde as empresas estão inseridas faz com que elas busquem melhorias nos seus processos para vencer a concorrência e, assim, manterem ou

aumentarem suas margens de lucro. No setor logístico, também são buscados aprimoramentos para se obter vantagens competitivas. Dentro desse cenário logístico, uma prática muito comum na maioria das organizações, atualmente, é a consolidação de cargas. Esse termo começou a ganhar notoriedade em 1980, nos Estados Unidos, a partir da instabilidade dos setores de transporte automotivo, aéreo e ferroviário [1].

A consolidação de cargas se refere ao processo de agrupar diferentes remessas de pedidos, com diferentes destinos, em um ponto de consolidação, ou seja, um mesmo ponto de origem. A vantagem da consolidação de cargas é reduzir os custos de transporte devido a uma melhor utilização da capacidade dos veículos disponíveis [9]. Complementando a ideia, trata-se do processo de unitização de mercadorias, de modo a reduzir o custo de transporte, pela maior utilização do espaço ocupado, visando à ampliação de serviços prestados e uso da infraestrutura operacional de transporte de forma mais ágil e eficiente [2].

Apesar de ser um processo simples, ao realizar a consolidação de cargas, o setor logístico deve avaliar alguns fatores para que seja elaborada uma estratégia que sirva de diretriz para o processo como um todo. São elas [2]:

- O que será consolidado?
- Quais pedidos dos clientes serão consolidados e quais serão enviados individualmente?
- Quando os pedidos dos clientes serão liberados?
- Quais eventos desencadearão o despacho de uma carga consolidada de veículo?
- Onde será feita a consolidação?
- A consolidação deve ocorrer na fábrica, em um veículo, em um armazém ou terminal?
- Quem é o responsável pela consolidação?
- A consolidação deve ser realizada pelo fabricante, remetente, cliente, transportadora ou terceiros?
- Como será realizada a consolidação?
- Quais técnicas de consolidação específicas serão usadas?

As respostas às questões acima devem ser respondidas para que sirvam de referência para a elaboração da política de consolidação de cargas adotada. Essa política deve ser definida pois é ela quem guiará as decisões da empresa quando os pedidos chegarem ao setor logístico [9].

Existem três tipos de políticas de consolidação de cargas. A primeira, denominada política de tempo, é aquela em que o pedido é enviado em uma data programada. A segunda é aquela em que os pedidos para um determinado destino são acumulados até que o peso definido para aquele determinado veículo seja atingido. Ou seja, o veículo sai da empresa com o peso ou o volume que foi definido na política. Essa política é chamada de política de quantidade. Por fim, a terceira política, que é chamada de política de tempo e quantidade, consolida todos os pedidos tanto para um mesmo destino quanto com a mesma data programada, adotando aquele que for atendido antes. Isto é, todos os pedidos para um destino particular são retidos e enviados quando ocorrer um dos seguintes eventos: a chegada de uma data pré-determinada ou o atingimento do peso ou do volume de consolidação [9].

Obviamente, a primeira política é mais satisfatória para os clientes que recebem o seu pedido na data desejada, porém do ponto de vista financeiro, a segunda política é a melhor desde que o veículo saia com o máximo de peso possível. Nesse cenário, ela possibilita que os caminhões sejam enviados com sua capacidade máxima de carga, reduzindo assim os custos logísticos. Por fim, a última opção é mais vantajosa quando não se tem uma regularidade de pedidos em carteira. Em momentos em que a quantidade de pedidos para uma determinada região for baixa, os veículos serão despachados por datas já determinadas. Em momentos em que o volume for alto, esses veículos sairão da empresa na sua capacidade máxima [9].

É importante ressaltar dois fatores que são os mais importantes a serem considerados no que diz respeito à política de consolidação de cargas. O primeiro é relacionado ao nível de serviço oferecido ao cliente, que é o motivo da organização existir. Já o segundo é o fluxo da carteira de pedidos. A quantidade de pedidos que a empresa recebe diariamente é extremamente importante para definir se a organização pode optar pela política de consolidação baseada na quantidade, que, como foi visto, é a de menor custo [9].

Algumas vantagens são percebidas quando se implementa uma política de consolidação de cargas. Uma delas é a possibilidade de combinar várias cargas ou pedidos menores para uma mesma região geográfica específica, aproveitando de forma completa a capacidade de um veículo de carga. Isso ocorre em função da grande diferença observada entre a taxa média unitária de frete de um veículo de maior porte, com carga plena, quando comparada com a taxa média de veículos menores, que realizem pequenas entregas. Se planejada de forma adequada e bem coordenada, a consolidação pode reduzir significativamente os custos de transporte sem que seja perdida qualidade no atendimento ao cliente [1].

Para o presente caso, a consolidação das cargas ocorre uma vez pela manhã e uma vez pela tarde. A primeira consolidação do dia é feita com pedidos que são liberados até o final do dia anterior. Já a segunda consolidação é feita com os pedidos que entram durante o mesmo dia. Dessa forma a empresa busca manter o nível de serviço elevado, uma vez que um pedido de venda não fica muitas horas sem que seja consolidado em alguma carga.

### C. Meta-heurísticas e o *Simulated Annealing*

Técnicas de otimização podem ser divididas em métodos exatos e métodos aproximados [10]. Os métodos aproximados procuram gerar boas soluções em um tempo razoável, embora não haja a garantia de que será encontrada a solução ótima. Dentre esta classe de métodos, destacam-se os algoritmos heurísticos. Na Figura 1, são apresentadas as variações dos métodos de otimização. Pode-se perceber que dentro da classe dos algoritmos heurísticos, encontram-se as meta-heurísticas e as heurísticas de problemas específicos [10].

Uma meta-heurística é considerada uma heurística de uso geral que possui mecanismos próprios para escapar de ótimos locais. Embora seja uma abordagem que não garante a determinação da solução ótima, ela permite a realização de

uma busca mais ampla do espaço de soluções, possibilitando a determinação do ótimo global [11].

As meta-heurísticas vêm sendo cada vez mais utilizadas em problemas relacionados à logística e à cadeia de suprimentos. Tem sido observado nos últimos anos o uso de diferentes técnicas meta-heurísticas, destacando-se o *Simulated Annealing* (SA), o Algoritmo Genético (AG) e a Busca Tabu (BT) [12].

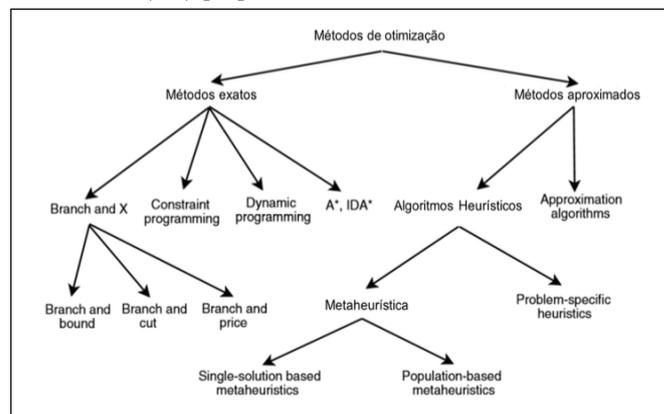


Figura 1 – As variações dos modelos de otimização

No presente estudo, será empregada a meta-heurística *Simulated Annealing*. O SA é um método que se baseia em uma analogia com a termodinâmica, pois simula o processo de resfriamento de um metal, conhecido como recozimento ou têmpera. O SA é um método que utiliza um mecanismo de busca local ao longo das iterações, aceitando soluções de piora com uma probabilidade regida por um parâmetro de temperatura [11].

A estratégia de aceitar soluções de piora permite à busca escapar de ótimos locais, trazendo a expectativa de que uma solução melhor seja alcançada. Entretanto, à medida em que o processo de busca avança, o parâmetro de temperatura vai sendo reduzido e, com o resfriamento, a probabilidade de aceitação de uma solução de pior qualidade é diminuída. A busca por soluções em cada patamar de temperatura é realizada por um número pré-determinado de iterações, enquanto o processo completo de busca termina quando se atinge um critério de parada ou uma temperatura pré-determinada [12]. Na Figura 2, é apresentado o pseudocódigo da meta-heurística SA [13].

Para que boas soluções sejam geradas pelo emprego da meta-heurística SA, é necessário o emprego de valores adequados para os parâmetros que determinam o seu funcionamento. Dentre os parâmetros que necessitam de sintonia, destacam-se a temperatura inicial  $T_0$ , o número de iterações  $SA_{max}$  realizado em cada patamar de temperatura, a lei de resfriamento e o parâmetro  $\alpha$  que rege o seu funcionamento, e a temperatura final  $T_f$ , comumente utilizada como critério de parada.

```

procedimento SA( $f(\cdot), N(\cdot), \alpha, SA_{max}, T_0, s$ )
1  $s^* \leftarrow s;$            {Melhor solução obtida até então}
2  $IterT \leftarrow 0;$       {Número de iterações na temperatura T}
3  $T \leftarrow T_0;$       {Temperatura corrente}
4 enquanto ( $T > 0$ ) faça
5   enquanto ( $IterT < SA_{max}$ ) faça
6      $IterT \leftarrow IterT + 1;$ 
7     Gere um vizinho qualquer  $s' \in N(s);$ 
8      $\Delta = f(s') - f(s);$ 
9     se ( $\Delta < 0$ )
10    então
11       $s \leftarrow s';$ 
12    se ( $f(s') < f(s^*)$ ) então  $s^* \leftarrow s';$ 
13    senão
14      Tome  $x \in [0, 1];$ 
15      se ( $x < e^{-\Delta/T}$ ) então  $s \leftarrow s';$ 
16    fim-se;
17  fim-enquanto;
18   $T \leftarrow \alpha \times T;$ 
19   $IterT \leftarrow 0;$ 
20 fim-enquanto;
21  $s \leftarrow s^*;$ 
22 Retorne  $s;$ 
fim SA;

```

Figura 2 – Pseudocódigo do SA

O SA apresenta algumas vantagens em relação a outros métodos. A primeira delas é o fato dele ser facilmente utilizado em problemas com um grande número de restrições. Além disso, novas restrições podem ser acrescentadas facilmente ao modelo, caso seja necessário. Outra vantagem é o fato de o método gerar boas soluções, inclusive soluções alternativas promissoras, que podem apoiar os gestores no seu processo de tomada de decisão [12]. O SA continua a ser aprimorado por meio de novos estudos, oferecendo possibilidades de aplicação na resolução de problemas focados na cadeia de suprimentos e na logística [12]. Justamente por essas vantagens é que o *Simulated Annealing* foi escolhido para ser utilizado na resolução do problema da consolidação de cargas.

### III. MATERIAL E MÉTODOS

#### A. Descrição do Problema

Uma frota de veículos de uma empresa pode ser formada por veículos dos mais diversos tamanhos, seja ela uma frota terceirizada ou própria. Normalmente, veículos menores são utilizados em trajetos mais curtos e veículos maiores em distâncias mais longas. A distribuição de veículos, na maioria das vezes, ocorre de forma empírica, baseada na experiência dos profissionais que realizam essa atividade. Entre os fatores empregados nesta análise, destacam-se: demanda, local do cliente, condições de acesso, distância, disponibilidade de transportadora ou motorista, consumo de combustível, entre outros [4].

Além disso, existem diferentes fatores que compõem o custo de uma carga [2]. No presente estudo, serão utilizados os fatores frete peso e frete mínimo por apresentarem uma importância destacada na composição do custo da carga. O

frete peso se constitui pela tarifa cobrada de acordo com o peso transportado. Em alguns casos, a transportadora pode adotar um valor fixo para o frete, que se dá pela multiplicação do frete peso pela capacidade do veículo. O frete mínimo é um valor fixo que deve ser comparado ao frete peso. Se o valor do frete peso for menor ou igual ao do frete mínimo, o valor a ser pago é o referente ao do frete mínimo, caso contrário, será o valor do frete peso [2].

Essa complexidade traz algumas dificuldades ao processo decisório, como a incerteza de consolidar as cargas pelo menor custo. Além disso, esse trabalho manual acaba trazendo alguns fatores como a possibilidade de se utilizar uma estratégia de consolidação da carga que não é a ideal. Devido a isso, diversos estudos começaram a apontar para a utilização, dentro das organizações, de algoritmos de otimização matemática com o objetivo de resolver problemas que ocorrem diariamente, entre eles o problema de consolidação de cargas [4]. Conforme Vieira e Munari Junior [2], o problema de consolidação de cargas pode ser relacionado ao Problema de Empacotamento com múltiplas mochilas, que pertence à classe de complexidade NP-completo.

Diante da complexidade observada, optou-se pela utilização de um modelo de otimização baseado na meta-heurística *Simulated Annealing* para a resolver o problema em questão.

#### B. Metodologia

O desenvolvimento do presente estudo pode ser dividido em algumas fases que devem ser executadas em sequência para que se atinja o resultado esperado. A primeira fase refere-se à pesquisa bibliográfica. Nessa pesquisa, os autores dividiram a busca por trabalhos científicos de três principais temas. A primeira busca teve como foco o termo "Logística 4.0" e todas as tecnologias da Indústria 4.0 que estão sendo direcionadas para o setor logístico. O segundo grupo de trabalhos pesquisados focou no termo "consolidação de cargas", por ser o processo logístico para o qual o presente estudo está direcionado. Como a proposta de solução apresentada para resolver esse problema está baseada nos métodos heurísticos, a terceira busca teve como foco artigos que apontavam para o uso desses métodos na resolução de problemas de consolidação de cargas.

#### C. Modelo conceitual

A próxima etapa do estudo foi a elaboração do modelo conceitual, que serviu de base para o desenvolvimento do modelo computacional. Para a construção do modelo computacional, é necessária a identificação dos dados e informações relevantes. Portanto, no modelo conceitual são definidos e detalhados todos os dados necessários para a elaboração do modelo computacional. Além de mapear todos os dados necessários, é importante saber a razão pela qual são necessários e de onde eles serão extraídos. As informações necessárias para a construção do modelo computacional de otimização são apresentadas na Figura 3.

Pedidos	Veículos	Tabela de frete	Regiões
<ul style="list-style-type: none"> <li>• identificação do pedido</li> <li>• identificação do cliente</li> <li>• cidade destino</li> <li>• data de entrega</li> <li>• peso bruto total (em kg)</li> <li>• capacidade cúbica total (em m<sup>3</sup>)</li> <li>• valor do pedido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tipo de veículo</li> <li>• capacidade em kg</li> <li>• capacidade cúbica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• origem</li> <li>• destino</li> <li>• veículo</li> <li>• valor por tonelada</li> <li>• valor mínimo</li> <li>• tempo de entrega</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• código da região</li> <li>• cidade</li> </ul>

Figura 3 – Informações necessárias para o modelo computacional

#### D. Pedido de venda

Dentre as informações relevantes, uma das mais importantes é o pedido de venda, uma vez que o processo de consolidação de cargas trata justamente de distribuir os pedidos de vendas entre os veículos disponíveis. Comumente, os dados relativos aos pedidos de venda são extraídos de um sistema de gestão existente na empresa, sendo necessárias algumas informações para que a sua extração seja realizada de forma correta. É importante que haja um identificador para o pedido para que seja possível diferenciar quais pedidos estarão agrupados em uma determinada carga, de tal forma que o número do pedido é essencial. Outro identificador importante é o código do cliente, pois permite avaliar se existe mais de um pedido para o mesmo cliente em uma carga, de forma que a informação da cidade de destino é um dos dados mais importantes. Com a informação sobre o destino da carga, é possível agrupar os pedidos cujo destino é uma mesma cidade, sendo essencial para uma adequada consolidação de cargas.

Pensando no nível de serviço de atendimento ao cliente, a data de entrega também é necessária. Isso porque faz parte da estratégia da empresa não deixar que pedidos sejam entregues com atraso. Por isso, o modelo deve considerar o tempo de entrega padrão para a cidade juntamente com a data máxima de entrega do pedido. Por exemplo, se hoje é dia 5 e pedidos para São Paulo demoram 3 dias para serem entregues, o modelo deve consolidar, no mínimo, os pedidos que possuem entrega máxima até o dia 8.

O peso bruto e a capacidade cúbica do pedido são dados necessários para a avaliação do peso e volume totais da carga, para assim ser possível limitar a quantidade de pedidos que podem ser consolidados em uma carga. Por fim, a informação relativa ao valor do pedido do cliente deverá ser extraída para que seja calculado o custo de frete correspondente ao valor do pedido. Para avaliar a qualidade de uma configuração de consolidação de cargas, pode ser utilizado o percentual de custo de frete, de forma que quanto menor for este valor melhor será a solução fornecida pelo modelo de otimização.

No modelo computacional, os pedidos são identificados por meio do índice  $j = 1, \dots, Np$ , onde  $Np$  representa o total de pedidos que considerados no problema.

#### E. Veículos

Os pedidos de venda serão consolidados em veículos que posteriormente visitarão os clientes para a entrega da mercadoria. Portanto, as informações relacionadas aos

veículos disponíveis também são necessárias para a elaboração do modelo computacional em questão. No contexto do presente estudo, estas informações são disponibilizadas por um sistema de frete que a empresa possui e que é responsável pelos cálculos de frete. Como a empresa utiliza uma frota terceirizada, é importante que a equipe de logística seja capaz de determinar quantos veículos de cada tipo serão necessários contratar de forma a garantir que todos os pedidos agendados sejam atendidos.

Os veículos disponíveis para contratação são dos mais diversos tipos, como por exemplo, carretas, *truck*, camionetes, entre outros. Portanto, é importante que o analista saiba determinar tanto a quantidade quanto o tipo dos veículos que serão necessários. Além disso, as informações sobre a capacidade de peso e volume de cada tipo de veículo serão necessárias para a elaboração das restrições do modelo, visto que haverá uma limitação da quantidade de pedidos que poderá ser transportada.

#### F. Tabela de frete

No problema da consolidação de cargas, o principal objetivo é determinar uma configuração que garanta a redução dos custos de frete. Para isso, a tabela de frete fornece um conjunto de dados muito importante para a formulação do modelo computacional. Essa informação também está disponível no sistema de frete da empresa. Para a definição da tabela de frete, são necessárias algumas informações. As duas primeiras são referentes a origem e destino, pois são utilizadas para compor o trecho e, assim, calcular a distância.

A terceira diz respeito ao valor de frete por tonelada para o trecho identificado. Outra informação importante para o modelo refere-se ao valor mínimo de cada trecho. Ou seja, se o valor de frete de determinada rota não superar o valor mínimo, a regra é que o valor mínimo de frete seja utilizado como valor de frete total. Por exemplo, vamos supor que uma rota tenha o custo de frete em R\$ 50,00 por tonelada e o valor mínimo de frete de R\$ 1.000,00. Se essa carga tiver 15 toneladas, o custo de frete vai ser R\$ 750,00, levando em consideração o cálculo de frete, que é a multiplicação do peso da carga pelo custo de frete por tonelada da rota. Porém, como o custo de frete é menor que o valor mínimo, assume-se esse valor mínimo como sendo o valor de frete da carga.

A última informação é o tempo padrão de entrega da rota que, conforme mencionado anteriormente, é de extrema importância para definir a previsão de entrega de cada pedido e, consequentemente, fazer com que os pedidos sejam entregues dentro do prazo estipulado.

Portanto, a tabela de frete terá as informações de origem, que nesse caso será sempre o mesmo, de destino, o valor de custo por tonelada e o valor mínimo de frete para este trecho, além do veículo utilizado para a rota e o tempo padrão de entrega para a rota.

No modelo computacional, os veículos são identificados por meio do índice  $i = 1, \dots, Nv$ , onde  $Nv$  representa o total de tipos de veículos considerados no problema. Além disso, também são definidos os valores de custo de frete  $c_{ij}$  representando o custo de transportar o pedido  $j$  no veículo de tipo  $i$ . Por fim, é empregado o valor  $FM_{ij}$  que representa o

valor frete mínimo dos pedidos  $j$  transportados nos veículos de tipo  $i$ .

### G. Regiões

Outra informação necessária para o modelo computacional são as regiões de entrega. Essas regiões serão grupos de cidades que servirão como restrição no momento do agrupamento de pedidos. Essa informação é importante para garantir que o processo de otimização não agrupe pedidos cujo destino são cidades que não façam parte de um roteiro de entrega coerente.

### H. Modelo computacional

A partir da elaboração do modelo conceitual, foi possível identificar todas as informações necessárias para elaboração do modelo computacional.

O principal objetivo é desenvolver uma ferramenta computacional, baseada na meta-heurística SA, para minimizar o custo total de frete por meio da distribuição adequada de todos os pedidos de venda entre os veículos disponíveis.

#### a. Representação de uma solução

Para representar uma solução, foi utilizada uma estrutura matricial, onde cada uma das linhas representa uma carga, caracterizada pela composição de um tipo de veículo e um conjunto de pedidos. O tipo de veículo é representado no primeiro campo por um código que identificador. Nos demais campos, são armazenados os pedidos que compõem a carga, pelo emprego dos valores de identificação de pedidos. Quando o campo for igual a zero, significa ausência de pedido. Um exemplo de solução utilizada no modelo computacional é representado na Figura 4.

1	3	7	2	10	1
3	4	5	0	0	0
5	8	9	6	0	0

Figura 4 – Representação da solução

É importante observar que os códigos de tipo de veículo podem se repetir na representação de uma solução, uma vez que veículos do mesmo tipo podem ser utilizados na definição de diferentes cargas. Já os códigos dos pedidos não podem se repetir, uma vez que um pedido não pode ser carregado por mais de um veículo.

Por meio da forma como a solução acima é representada, torna-se possível avaliar se uma solução é viável ou não, verificando o atendimento das restrições de peso, volume e compatibilidade de regiões, através do uso de codificação computacional específica.

#### b. Geração da solução inicial

Para gerar uma a solução inicial, adota-se um procedimento que aloca os pedidos aos veículos disponíveis, efetuando controles de disponibilidade de espaço (peso e volume), bem

como de compatibilidade entre as regiões de entrega. Para esta construção, os seguintes passos são realizados. O primeiro passo é sortear um tipo de veículo. Com o tipo de veículo definido, passa-se ao sorteio dos pedidos para que eles sejam alocados dentro do veículo inicialmente sorteado. Para o primeiro pedido de veículo, deve-se considerar as restrições de volume e peso. Ou seja, um pedido só pode ser alocado em um veículo desde que o seu volume e o seu peso sejam menores do que a capacidade do veículo avaliado para alocação do pedido.

A partir da alocação do segundo pedido, a restrição de peso e volume deve levar em consideração o peso e o volume disponíveis no veículo, ou seja, descontando o peso e o volume dos pedidos já alocados. Além disso, também é avaliada a restrição de compatibilidade das regiões, conforme descrito na seção III.G. Nessa avaliação, um pedido só pode ser alocado a um veículo caso a região desse pedido seja compatível com as regiões dos pedidos já alocados. As informações de compatibilidade entre regiões são armazenadas em uma estrutura matricial, conforme apresentado na Tabela 1. Nesta matriz, quando o campo assume o valor 1, isso indica que existe compatibilidade entre as regiões da linha e da coluna. Por exemplo, com base na matriz apresentada na Tabela 1, é possível observar que existe compatibilidade entre as regiões 102 e 104, indicada pelo valor 1, e não existe compatibilidade entre as regiões 102 e 103, indicado pelo valor 0.

Regiões	101	102	103	104	105
101	1	0	1	0	0
102	0	1	0	1	1
103	1	0	1	1	1
104	0	1	1	1	0
105	0	1	1	0	1

Tabela 1 – Matriz de compatibilidade de regiões

Por fim, quando um veículo não atende nenhuma das restrições avaliadas (espaço e compatibilidade), um novo veículo é sorteado para que o processo de alocação de pedidos seja retomado.

#### c. Geração da vizinhança

A partir de uma solução inicial, conforme representado na Figura 4, é gerada uma solução vizinha. A geração de vizinhança empregada no presente estudo consiste em trocar um pedido de veículo. Para tanto, é realizado o sorteio dos veículos de origem do pedido e de destino do pedido, bem como do pedido que será movido. Para que a troca seja realizada, as restrições de espaço (peso e volume) e compatibilidade de regiões devem ser respeitadas. Na Figura 5, é apresentado um exemplo da geração de vizinhança adotada, mostrando a troca de um pedido entre dois veículos.

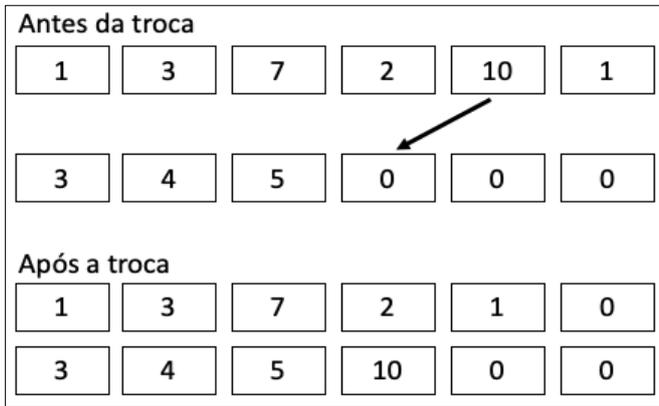


Figura 5 – Geração de vizinhança

**d. Função de avaliação**

Para avaliar a qualidade de cada solução gerada ao longo do processo de solução, é empregada uma função de avaliação que leva em consideração a maior tarifa de frete de todos os pedidos alocados em um veículo, multiplicado pelo peso total dos pedidos alocados neste veículo. Porém, existe a possibilidade de o peso total dos pedidos não atingir o peso mínimo do veículo. Nesse caso, o custo total de frete da carga será o frete mínimo para aquele veículo. Portanto, a função de avaliação, isto é, a função objetivo do problema de otimização pode ser definida pela equação abaixo:

$$FO(x) = \sum_{i=1}^{Nv} \max \left\{ \max_j \{c_{ij}\} \times \left[ \sum_{j=1}^{Np} w_j x_{ij} \right], \max_j \{FM_{ij}\} \right\}$$

onde

$Nv$  = total de veículos que compõem a solução;

$Np$  = total de pedidos que compõem o problema;

$x_{ij}$  = variável binária indicando se o pedido  $j$  é transportado, ou não, no veículo  $i$ ;

$c_{ij}$  = custo de transportar o pedido  $j$  no veículo  $i$ ;

$FM_{ij}$  = valor de frete mínimo ao transportar o pedido  $j$  no veículo  $i$ ;

$w_j$  = peso do pedido  $j$ , em toneladas.

Na função objetivo  $FO$ , é calculado o custo total de frete. O custo individual de um veículo é assumido como sendo o maior valor identificado da comparação de duas medidas de frete. A primeira medida é a multiplicação do custo de transporte do pedido  $j$  de maior valor transportado no veículo  $i$  pelo peso total carregado neste veículo. A segunda medida é o maior valor de frete mínimo dentre todos os pedidos  $j$  transportados no veículo  $i$ . Com isso, o modelo computacional buscará a identificação de consolidação de cargas que forneça o menor valor da soma dos fretes de cada veículo  $i$ .

**e. Parâmetros para aplicação do Simulated Annealing**

Conforme apresentado na seção II.C., o SA exige a definição de alguns parâmetros que regem o seu

funcionamento. A definição adequada desses parâmetros garante uma eficiência do SA. Os parâmetros são: a temperatura inicial ( $T_0$ ), o número de iterações sem melhora ( $S_{Amax}$ ), taxa de resfriamento ( $\alpha$ ) e temperatura final ( $T_f$ ). Para determinar os valores desses parâmetros, foi realizado um conjunto de simulações para avaliar qual a configuração mais adequada. Realizando um balanço entre qualidade da solução final e esforço computacional exigido, a configuração de valores definida para uso nos experimentos é apresentada na Tabela 2.

Temperatura Inicial	S <sub>Amax</sub>	Taxa de resfriamento	Temperatura final
300	1000	0,95	0,001

Tabela 2 – Parâmetros utilizados no SA

**IV. RESULTADOS**

O modelo computacional desenvolvido foi validado com base em um histórico de pedidos retirados dos sistemas da empresa. Foram selecionados 2.535 pedidos correspondentes a uma semana de pedidos implantados. Na extração dos dados, foi selecionado o valor de frete real de cada um dos pedidos, para que posteriormente pudesse ser realizado um comparativo entre o valor efetivo de frete e o valor de frete gerado pelo modelo de otimização e, assim, avaliar sua eficiência. A Figura 6 apresenta a *query* de extração dos dados de pedidos.

```
select
ped-venda.cod-estabel,
ped-venda.cod-emitente,
ped-venda.nr-pedcli,
ped-venda.dt-implant,
ped-venda.dt-entrega,
ped-venda.cidade-cif,
sum(ped-item.qt-pedida * item.peso-bruto) column-label "Peso
Total",
sum((ped-item.qt-pedida / item-caixa.qt-item) * embalag.volume)
column-label "Volume Total",
ped-venda.vl-tot-ped,
nota-fiscal.cod-estabel,
nota-fiscal.serie,
nota-fiscal.nr-nota-fis,
nota-fiscal.nome-ab-cli,
tondo-nf-frete.vl-frete

from ped-venda, ped-item, item, item-caixa, embalag, nota-
fiscal, tondo-nf-frete

where
(ped-venda.nome-abrev = ped-item.nome-abrev and
ped-venda.nr-pedcli = ped-item.nr-pedcli and
ped-venda.cod-entrega = ped-item.cod-entrega) and
(ped-item.it-codigo = item.it-codigo) and
(item.it-codigo = item-caixa.it-codigo) and
(item-caixa.sigla-emb = embalag.sigla-emb) and
(ped-venda.nr-pedcli = nota-fiscal.nr-pedcli and
ped-venda.nome-abrev = nota-fiscal.nome-ab-cli) and
(tondo-nf-frete.cod-estabel = nota-fiscal.cod-estabel and
tondo-nf-frete.serie = nota-fiscal.serie and
tondo-nf-frete.nr-nota-fis = nota-fiscal.nr-nota-fis) and
ped-venda.cod-estabel = '104' and (ped-venda.dt-implant >=
08/24/2020 and ped-venda.dt-implant <= 08/28/2020)

group by
ped-venda.cod-estabel,
ped-venda.cod-emitente,
ped-venda.nr-pedcli
```

Figura 6 – Query de extração dos dados de pedidos

Após uma criteriosa seleção, alguns pedidos foram descartados por não se tratar de pedidos com produtos acabados, ou seja, não são carregados em veículos, portanto não possuem custo de frete. Ao final dessa triagem, o modelo considerou 2.453 pedidos para o intervalo de cinco dias. Na

Figura 7, é apresentado um exemplo de resultado obtido do processo de extração dos dados de pedidos.

Cliente	Pedido	Data Implantação	Data Entrega	Cidade Entrega	Região	Peso Total	Volume Total
53	7004/3172	24/08/2020	25/08/2020	BENTO GONCALVES	885	152,7	0,53
275	2009666	24/08/2020	25/08/2020	SANTA CRUZ DO SUL	891	154,85	0,21
360	3302/8463	24/08/2020	25/08/2020	CARAZINHO	890	1.156,56	1,85
479	3302/8462	24/08/2020	25/08/2020	PASSO FUNDO	890	660,53	1,41
502	3302/8469	24/08/2020	26/08/2020	PASSO FUNDO	890	236,92	0,62
502	3302/8468	24/08/2020	26/08/2020	PASSO FUNDO	890	63,98	0,21
773	1023/8180	24/08/2020	27/08/2020	FARROUPILHA	882	3.029,00	4,71
804	2127/3690	24/08/2020	25/08/2020	AGRONOMICA	933	339,66	0,55
831	2013756	24/08/2020	31/08/2020	FARROUPILHA	882	1.474,31	5,39
1102	0596/0751	24/08/2020	26/08/2020	FELIZ	900	732,07	1,56

Figura 7 – Exemplo de extração dos dados de pedidos

Os cinco dias de pedidos considerados no presente estudo contemplam uma semana cheia da carteira da empresa, representando um período de segunda-feira até sexta-feira. Foi definido esse intervalo de dias para a seleção de pedidos pois, dessa forma, é possível obter diversos perfis de pedidos que contemplam grandes clientes, varejo, indústria, entre outros. Além disso, é possível obter muitas regiões de entrega, o que acaba trazendo inúmeros cenários de consolidação. Ao total, foram selecionados pedidos que contemplam 48 regiões de entrega.

Para finalizar a etapa de extração dos dados, foi realizado o tratamento e a formatação dos dados para sua leitura pela ferramenta computacional desenvolvida. O código computacional foi desenvolvido utilizando-se o software MATLAB, que é um programa voltado para cálculos numéricos e que oferece ambiente de programação, facilitando a execução de códigos computacionais e visualização dos resultados. A ferramenta computacional desenvolvida levou em consideração todas as restrições mencionadas na seção III.H.

Para validar a ferramenta computacional, inicialmente foi considerado um problema-teste composto por 20 pedidos. Com isso, foi possível avaliar se o modelo conseguia alocar o conjunto de pedidos, respeitando as restrições de peso e volume, e a de compatibilidade das regiões. Na Figura 8, é apresentada a evolução do valor da FO em função do número de iterações para este problema-teste.

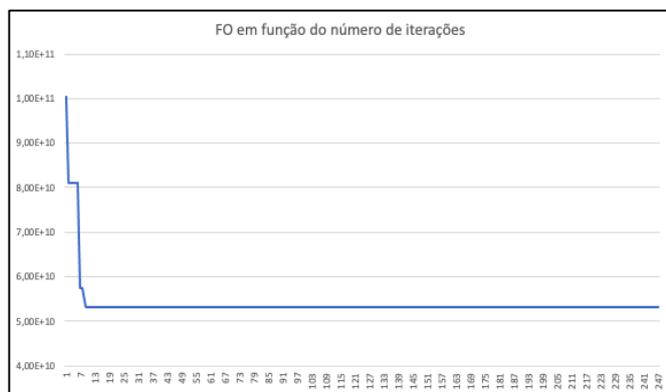


Figura 8 – FO × número de iterações (20 pedidos)

Uma vez finalizada esta primeira etapa de validação, foi considerado um segundo conjunto de pedidos formado por 20% do universo de pedidos considerados no estudo, ou seja, cerca de 500 pedidos, representando um dia da carteira de

pedidos. Com esse número de pedidos, foi possível validar o processo de sorteio de uma quantidade maior de veículos e a geração de vizinhança proposta no estudo. Nessa execução, foi obtido um valor para a função objetivo próximo ao valor médio diário do custo com frete para a empresa em questão. Na Figura 9, é apresentada a evolução do valor da FO em função do número de iterações para este problema-teste.

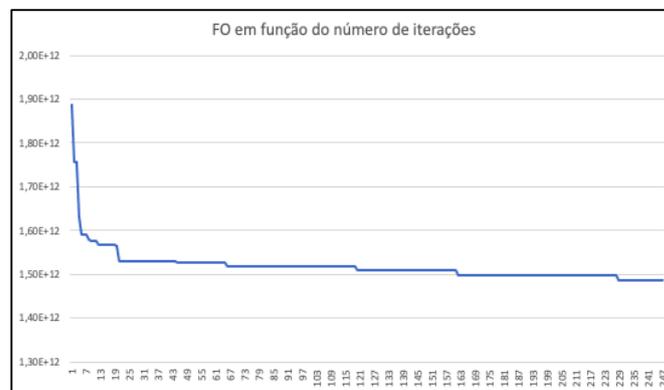


Figura 9 – FO × número de iterações (500 pedidos)

Por fim, utilizou-se o universo total de pedidos para validar o desempenho do modelo desenvolvido. Diante de todas as validações, foi possível concluir que o modelo computacional desenvolvido pode ser utilizado para diferentes quantidades de pedidos. Isso indica que o modelo de otimização computacional possui características que permitem a sua adaptação a diferentes políticas de consolidação de cargas.

Como toda meta-heurística, o funcionamento do SA é baseado em regras aleatórias e, por conta disso, toda execução gera uma solução diferente. Por isso, o ideal é realizar um conjunto de execuções para cada problema-teste, representados nesse estudo por cada dia de pedidos implantados. Dessa maneira, a forma de execução do SA mostrou-se adequada ao padrão de operação da empresa, que é a consolidação diária dos pedidos implantados.

Para cada dia avaliado, o SA foi executado duas vezes no formato padrão, com uma execução média de 50 minutos, e mais uma vez com a utilização da estratégia de *re-annealing*. A estratégia do *re-annealing*, ou reaquecimento, é utilizada após a melhor solução apresentar um determinado número de iterações sem melhora. Comumente, dependendo do número de *re-annealings* realizados, esta estratégia exige um esforço computacional maior, exigindo um tempo maior para finalizar o processo de solução. Porém, a vantagem é que com o uso do *re-annealing*, normalmente a solução final obtida apresenta uma qualidade melhor [14].

Na Tabela 3, são apresentados os melhores resultados de cada um dos tipos de execuções do SA, para cada um dos dias. Os valores apresentados a seguir não representam os valores reais, tendo sido utilizado um fator multiplicador para segurança da informação. Ao final de todas as execuções, pode-se perceber que o uso da estratégia de *re-annealing* gerou soluções melhores em quase todos os dias, com exceção para o conjunto de pedidos da sexta-feira.

Dia da semana	Melhor execução sem o <i>reannealing</i>	Melhor execução com o <i>reannealing</i>
Segunda	R\$ 4.375.012,37	R\$ 4.197.142,25
Terça	R\$ 2.984.410,42	R\$ 2.915.007,31
Quarta	R\$ 3.535.800,10	R\$ 3.384.905,63
Quinta	R\$ 2.401.875,49	R\$ 2.290.796,39
Sexta	R\$ 4.270.201,45	R\$ 4.294.220,25

Tabela 3 – Comparativo das execuções

A partir dos experimentos, foi possível analisar os resultados obtidos em cada um dos dias e o desempenho do modelo desenvolvido. Na Tabela 4, são apresentadas algumas informações sobre o melhor resultado obtido para cada um dos dias, incluindo a quantidade de veículos utilizados e a taxa média de ocupação de cada veículo, que pode ser por peso ou por volume, dependendo do fator limitador. Nesse caso, pode-se perceber a eficiência do modelo que tem uma taxa de ocupação média acima dos 90%.

Dia da semana	Total de pedidos	Total de veículos	Taxa de ocupação média	Função objetivo
Segunda	468	25	91,03%	R\$ 4.197.142,25
Terça	476	17	90,71%	R\$ 2.915.007,31
Quarta	538	27	91,11%	R\$ 3.384.905,63
Quinta	441	19	95,91%	R\$ 2.290.796,39
Sexta	531	31	91,93%	R\$ 4.270.201,45

Tabela 4 – Resultado do SA para cada dia

Após o emprego do SA para todos os casos de teste avaliados, foi possível comparar o resultado obtido através do modelo de otimização desenvolvido com o cenário real da empresa e, assim, validar sua eficiência. Através dessa comparação, que é apresentada na Tabela 5, é possível observar a redução percentual do custo de frete, para cada um dos dias.

Dia da semana	Custo de frete real	Função objetivo	Dif R\$ (FOxReal)	Dif % (FOxReal)
Segunda	R\$ 4.281.136,53	R\$ 4.197.142,25	R\$ 83.994,28	1,96%
Terça	R\$ 3.016.148,97	R\$ 2.915.007,31	R\$ 101.141,66	3,35%
Quarta	R\$ 3.511.575,26	R\$ 3.384.905,63	R\$ 126.669,63	3,61%
Quinta	R\$ 2.375.076,76	R\$ 2.290.796,39	R\$ 84.280,36	3,55%
Sexta	R\$ 4.280.687,34	R\$ 4.270.201,45	R\$ 10.485,88	0,24%

Tabela 5 – Comparativo entre ao resultado do SA e o cenário real

Em resumo, o modelo desenvolvido conseguiu obter uma redução média diária de 2,32% e uma redução de R\$ 406.571,81 acumulada para os cinco dias, em comparação ao custo total de frete realizado para o mesmo período.

## V. CONCLUSÕES

O presente estudo buscou demonstrar como uma abordagem de otimização, mais especificamente com a utilização da meta-heurística *Simulated Annealing*, é possível resolver o problema da consolidação de cargas. Esse é um problema de solução difícil pois apresenta diversas variáveis e restrições que devem ser consideradas. A primeira etapa no desenvolvimento da solução é a extração dos dados de pedidos de venda que serão consolidados nos veículos disponíveis. Em um segundo momento, o modelo de otimização é executado, gerando o resultado da consolidação das cargas, de forma a minimizar os custos de frete associados.

Devido à complexidade do problema e, também, em função do tema "consolidação de cargas" possuir poucos estudos

como referência, a identificação do método adequado para o problema e situação avaliados foi árdua. O modelo de otimização apresentado no trabalho foi desenvolvido com base na meta-heurística *Simulated Annealing*. O SA teve resultados satisfatórios quando utilizado sobre uma base real de pedidos. Os dados referentes aos veículos, como a sua capacidade, e os dados das tabelas de frete, como valor de frete por tonelada e valor de frete mínimo, também foram extraídos de bases reais. Além disso, o modelo consolidou pedidos levando em consideração as cidades de destino dos pedidos e suas respectivas compatibilidades.

Com relação aos resultados, pode-se perceber uma minimização nos custos de frete, por volta de 2,32%. No presente estudo, a empresa em questão possui a despesa com fretes como sendo a segunda maior da empresa. Portanto, esse percentual quando convertido para valor monetário é extremamente expressivo. Além disso, essa redução percentual torna-se ainda mais interessante uma vez que o modelo desenvolvido pode ser aperfeiçoado e, com isso, trazer uma redução de custo ainda maior.

No que se refere a trabalhos futuros, algumas possibilidades para melhoria do modelo em questão podem ser consideradas. Uma delas é a automação da extração dos dados de pedidos, para que o processo de otimização seja automatizado por completo. Outra sugestão é a separação prévia dos pedidos por macrorregiões de entrega, como por exemplo litoral, norte do estado, interior, entre outras. Isso poderá melhorar ainda mais os resultados da otimização, tendo como foco o roteiro das entregas, uma vez que somente as cidades dentro da mesma macrorregião serão consolidadas. Outra sugestão é propor novas estruturas de vizinhanças, como por exemplo, um modelo que realize a troca do tipo de veículo das cargas já consolidadas.

Por fim, conclui-se que a meta-heurística *Simulated Annealing* traz bons resultados que podem apoiar o analista responsável pela consolidação de cargas. Em muitas vezes, a ferramenta de otimização pode não retornar uma solução ótima, exigindo que analista avalie se a solução fornecida pode ser utilizada como está ou aprimorada. Dessa forma, o *Simulated Annealing*, juntamente com o pensamento analítico de quem conhece o processo, certamente irá trazer as melhores soluções.

## VI. BIBLIOGRAFIA

- [1] M. S. Santos. "Reduzindo custos e melhorando o serviço via consolidação de cargas: Um estudo de caso," *Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial* (Dissertação de mestrado), 2009.
- [2] T. J. S. Vieira and P. Munari. "Geração De Romaneios Otimizados Para Consolidação De Cargas," *Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, 2018.
- [3] E. Hofmann and E. Rüsich. "Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics," *Computers in Industry*, vol. 89, no. 1, pp. 23-34, 2017.
- [4] R. F. Santos, E. C. S. Júnior and M. A. C. Bouzada. "A Aplicação Da Programação Inteira Na Solução Logística Do Transporte De Carga: O Solver E Suas Limitações Na Busca Pela Solução Ótima," *Revista Produção Online*, vol. 12, no. 1, pp. 185-204, 2012.
- [5] C. M. Júnior. "Abordagens heurísticas para consolidação de cargas e roteamento de veículos de entrega dos produtos de uma indústria de embalagens". *Universidade Federal do Paraná* (Dissertação de mestrado), 2013.

- [6] Y. A. Koskosidis and W. B. Powell. "Clustering Algorithms for Consolidation of Customer Orders Into Vehicle Shipments" *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 26, no. 5, pp. 365-379, 1992.
- [7] F. A. S. de Almeida, A. C. M. Rosa, D. S. dos Santos and S. T. S. Neto. "Indústria 4.0 e Logística 4.0: inovação, integração, soluções e benefícios reais decorrentes do mundo virtual," *X Fateclog - Logística 4.0 & A Sociedade Do Conhecimento FATEC Guarulhos*, 2019.
- [8] K. Witkowski. "Internet of Things, Big Data, Industry 4.0 – Innovative Solutions in Logistics and Supply Chains Management," *7th International Conference on Engineering, Project, and Production Management*, 2017.
- [9] J. K. Higginson and J. H. Bookbinder. "Policy recommendations for a shipment-consolidation program" *Journal of Business Logistics*, vol. 15, no. 1, pp. 87-112, 1994.
- [10] E. Talbi. "Metaheuristics: From Design to Implementation," *United States of America: John Wiley & Sons*, 2009.
- [11] G. C. Landgraf. "Otimização E Simulação Discreta Em Logística: Um Estudo Na Área De Picking," *Universidade Estadual de Campinas* (Dissertação de mestrado), 2016.
- [12] S. E. Griffis, J. E. Bell and D. J. Closs. "Metaheuristics in Logistics and Supply Chain Management," *Journal of Business Logistics*, vol. 33, no. 2, pp. 90–106, 2012.
- [13] J. N. Y. Silva, A. C. G. Júnior, M. C. Silva, H. C. Gomes. "Aplicação do Método Simulated Annealing para Determinar as Rotas de uma Empresa Distribuidora de Bebidas," *XIX Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha*, 2019.
- [14] L. C. Severo. "Uma Ferramenta para o Dimensionamento Automático de Circuitos Integrados Analógicos Considerando Análise de Produtividade," *Universidade Federal do Pampa* (Dissertação de mestrado), 2012.