



## **Alocação e Sequenciamento de um depósito do Setor Siderúrgico**

**Maritha Gomes Silva de Oliveira**

Universidade Federal de Minas Gerais  
Av. Antônio Carlos, 6627 - Belo Horizonte - MG  
marithasilva@yahoo.com.br

**Martin Gomez Ravetti**

Universidade Federal de Minas Gerais  
Av. Antônio Carlos, 6627 - Belo Horizonte - MG  
martin.ravetti@dep.ufmg.br

**Mauricio Cardoso de Souza**

Universidade Federal de Minas Gerais  
Av. Antônio Carlos, 6627 - Belo Horizonte - MG  
mauricio.souza@dep.ufmg.br

### **RESUMO**

Neste trabalho destaca-se a operacionalização de um centro de distribuição da indústria siderúrgica. A entrega das bobinas é feita pelo modal rodoviário assim há a necessidade de alocar as bobinas a caminhões para a realizar as entregas. Duas formas de alocação das bobinas, que se encontram dentro do centro de distribuição aos caminhões disponibilizados pelas transportadoras são comparadas, um algoritmo aleatório e um modelo matemático. Ambos se mostram eficientes para realizar as alocações, com resultados melhores no modelo de alocação. É necessário também sequenciar o carregamento dos caminhões pelas duas pontes rolantes do depósito, assim foi implementado duas diferentes formas de sequenciamento, o algoritmo de Johnson e um modelo matemático com minimização do tempo total ponderado. O modelo de sequenciamento resolveu apenas as instâncias menores, a avaliação dos resultados em comparação com o algoritmo de Johnson mostrou a eficiência do modelo.

### **PALAVRAS CHAVE. Alocação de Cargas, Sequenciamento, Problemas de Integração.**

**L&T** – Logística e Transportes

### **ABSTRACT**

This article highlights the operationalization of a distribution center of the steel industry where coils are stored between its production at the plant and the moment of delivery to the customer. The delivery of the coils is done by the modal road so there is the need to allocate the coils to trucks to make the deliveries. Two ways of allocating the coils within the distribution center to the trucks provided by the carriers are compared, a random algorithm and a mathematical model. Both are efficient to perform the allocations, with better results in the allocation model. It is also necessary to schedule the loading of the trucks by the two cranes of the warehouse, so it was implemented two different forms of scheduling, the Johnson algorithm and a mathematical model with minimization of the total time weighted. The scheduling model solved only the smaller instances, the evaluation of the results compared to the Johnson algorithm showed the efficiency of the model.

### **KEYWORDS. Allocation. Scheduling. Integration Problems.**

**L&T** -Logistics and Transportation



## 1. Introdução

Com o maior parque siderúrgico da América do Sul, composto por 29 usinas administradas por onze grupos (Aperam, ArcelorMittal Brasil, CSN, Gerdau, SINOBRAS, Thyssenkrupp CSA, Usiminas, VSB Tubos, Vallourec, Villares Metals e Votorantim) e um investimento de, aproximadamente, US\$21 bilhões entre 2012 e 2015, o Brasil é o sexto exportador líquido de aço e nono produtor de aço no mundo. Mesmo com a crise que atinge o setor desde 2012 o parque siderúrgico brasileiro é considerado um dos mais modernos do mundo.

A indústria siderúrgica realiza o processo de preparação do aço e é responsável por transportá-lo até o cliente final, a empresa a ser estudada conta com uma produção entorno de 7 milhões de toneladas/ano de produtos acabados (como bobinas, placas e revestidos). Para realizar o escoamento da produção, desde a usina até o cliente final, a empresa conta com uma malha logística com acesso as maiores rodovias do país. O complexo logístico utilizado pela empresa é composto por quatro ferrovias com mais de 20 mil quilômetros de trilhos, onze centros de distribuição, seis depósitos e dois terminas portuários privativos de uso misto, a malha logística dessa empresa transporta sua produção para todo o país e para o mundo.

Um dos seus centros de distribuição (CD) desta empresa está localizado na região metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais. O CD recebe materiais via modal ferroviário direto da usina localizada a cerca de 200 Km da capital mineira e despacha as bobinas via modal rodoviário para todas as regiões do país. O transporte final da empresa estudada é realizado via modal rodoviário, o material presente no CD (bobinas) deve ser alocado a um caminhão para o transporte. Considerando essa questão este artigo propõe discutir o impacto da alocação de bobinas aos caminhões quando realizada de maneira aleatória e mostrar através de uma análise do resultado de um algoritmo de sequenciamento a importância de uma boa alocação.

Neste trabalho a seção 2 faz uma breve revisão bibliográfica sobre o tema, a seção 3 descreve o problema a ser estudado no centro de distribuição. A seção 4 apresenta o algoritmo aleatório usado para a alocação de bobinas aos caminhões; a seção 5 temos o modelo de alocação proposto por [Silva Neto, 2013], a seção 6 o algoritmo de sequenciamento proposto por [Johnson, 1954] é apresentado, na seção 7 temos o modelo de sequenciamento de cargas proposto por [Maschietto, 2015]. Na seção 8 temos a discussão dos resultados e na seção 9 as conclusões.

## 2. Revisão Bibliográfica

Em [Johnson, 1968] temos uma das primeiras definições de problema de empacotamento: suponha-se um conjunto de itens  $B = b_1, b_2, b_3, \dots, b_i$ , e cada um desses itens possui um peso  $p(b_i)$  associado e considere também que exista um conjunto de caixas  $J$  de capacidade  $C$ . O problema consiste em agrupar os itens  $b$  de forma que se gaste o mínimo possível de caixas  $J$ , respeitando sempre a capacidade  $C$  de cada caixa  $J$ . Se assumirmos que os itens são bobinas e as caixas são os caminhões e que para todo item  $b_i \in B, p(b_i) \leq C$  (que representa o peso da bobina em toneladas), podemos desenvolver um problema de empacotamento unidimensional que consiste em colocar as bobinas no menor número possível de caminhões.

Após a determinação de em qual caminhão cada bobina deve ser alocada, há a necessidade de sequenciar o abastecimento dos caminhões, determinando qual ponte rolante será utilizada e qual a melhor forma de sequencia-las, assim temos um clássico problema de sequenciamento. No problema de sequenciamento, podemos considerar que um determinado número de atividades  $j$ , devem ser realizadas por um grupo finito de máquinas  $m$ . [Pinedo, 2008] define que os problemas de sequenciamento possuem três dimensões  $\alpha$  que descreve as características das máquinas, única máquina, máquinas idênticas paralelas, máquinas paralelas com tempos diferentes, máquinas paralelas não relacionadas, *flow shop*, *flow shop* flexível, *job shop*, *job shop* flexível e *open shop*. A segunda dimensão dos problemas de sequenciamento trata de  $\beta$  que diz respeito aos processamentos e restrições, quanto a isso os problemas podem ser *preemptions*, *breakdowns*, *permutation*, *blocking* e *No-wait*. A última dimensão  $\gamma$  diz respeito aos objetivos do problema de sequenciamento que podem ser a minimização do *makespan*, a minimização do atraso máximo, ou a minimização do tempo de conclusão ponderado.



As decisões de sequenciamento não devem ser tomadas de maneira isolada, apesar de não abordar, diretamente, o caso de decisões de alocação de carga e sequenciamento de caminhões, [Tan e Khoshnevis, 2000] destaca que 30% das decisões de sequenciamento precisam ser modificadas por não terem sido tomadas em conjunto com decisões de planejamento e que essas modificações, em sua maioria, são realizadas de maneira informal, constatamos nisso uma semelhança com os problemas de alocação de carga e sequenciamento de caminhões a ser estudado. Quando [Menezes et.al., 2017] aborda o problema da integração entre o planejamento e o sequenciamento para o funcionamento de um porto com um produto a granel, minério de ferro, onde temos o descarregamento dos trens, a estocagem (ou não) nos pátios, o carregamento de navios e a preocupação com a operacionalização de máquinas, a fim de minimizar custos operacionais e atrasos de carga e descarga. Vemos a constante necessidade de integração entre decisões.

[Van Belle et. Al.,2012] em seu artigo sobre o estado da arte dos problemas de *cross-docking* apontam parâmetros de níveis estratégicos, táticos e operacionais para avaliar os problemas. Entre os parâmetros táticos eles discutem a capacidade temporária de armazenamento, que analisa o como proceder com cargas que quando chegam ao centro de distribuição, não tem um caminhão de saída disponível. Segundo [Ladier e Alpan,2015] a literatura aborda a capacidade temporária considerando que os centros de distribuição possuem uma capacidade infinita de armazenagem e que o tempo que uma carga pode permanecer é o necessário para que a alocação de carga e o sequenciamento dos caminhões sejam o melhor possível; mas na sua pesquisa com oito empresas de *cross-docking* na França [Ladier e Alpan,2015] constataram que o espaço de armazenamento é bastante limitado e que os produtos, de maneira geral, não permanecem mais que 24 horas nos centros de distribuição. Problemas de *cross-docking* com consideração de armazenagem temporária se assemelham bastante com o problema estudado nesse artigo.

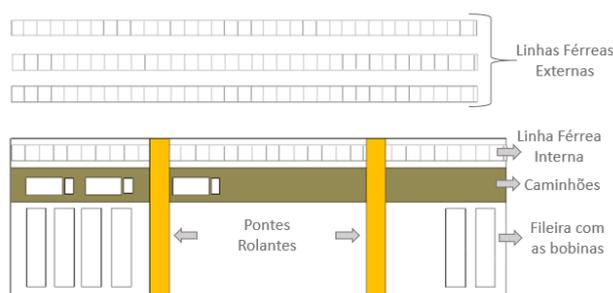
[Van Belle et. Al.,2012] também destaca diversos trabalhos sobre a alocação de caminhões as docas, de em qual doca deve ser alocado e quando esse caminhão deve deixar sua carga ou ser carregado em direção ao cliente. Os trabalhos citados que consideram o carregamento e descarregamento de caminhões a curto prazo, ou seja, os caminhões são alocados as docas para receber produtos e transportarem para os clientes sem considerar a localização desse cliente, se assemelham com o problema de sequenciamento a ser abordado nesse trabalho. [Chen e Lee, 2009] apresentam um artigo sobre o *cross-docking* utilizando duas máquinas em *flow shop* para o descarregamento e carregamento de caminhões através da minimização do *makespan*. Também como tendo como objetivo a minimização do *makespan* o trabalho de [Chen e Song, 2009] modela o problema onde os caminhões podem ser carregados e descarregados ao mesmo tempo usando máquinas paralelas. No trabalho de [Larbi et. Al., 2011] os produtos retirados de um caminhão podem ser encaminhados diretamente a outro para serem enviados aos clientes ou serem encaminhados a uma área de armazenagem considerada de capacidade infinita, o objetivo é encontrar o melhor sequenciamento de caminhões de forma a minimizar os custos gerais (de carga e descarga, e armazenagem temporária).

### 3. Descrição do Problema

O CD da empresa a ser estudado é composto por um galpão de aproximadamente 6 mil m<sup>2</sup>. O recebimento das bobinas ocorre através de três linhas férreas externas, onde os vagões provenientes da usina ficam aguardando o descarregamento. A política de descarregamento dos vagões ocorre, em sua maioria das vezes, de acordo com a ordem de chegada, ou seja, um sistema *FIFO (First In First Out)*. Quando há disponibilidade para realizar o descarregamento, o vagão é encaminhado para a linha férrea interna onde uma das duas pontes rolantes move as bobinas dos vagões para as fileiras. No CD estudado temos noventa e oito fileiras onde as bobinas serão colocadas até serem enviadas aos clientes. A figura 1 a seguir representa no CD o posicionamento das linhas férreas, das pontes rolantes, das fileiras de bobinas e do espaço dos caminhões.



Figura 1-Representação do Centro de Distribuição



Adaptado de Silva Neto (2013)

Após o descarregamento os materiais são empilhados nas fileiras de acordo com o tipo, tamanho, destino, cliente e peso. O peso é importante para determinar o empilhamento das bobinas, bobinas mais leves não devem ser colocadas sob bobinas mais pesadas, a fim de garantir a qualidade do produto e a segurança do CD. Quando é feito o descarregamento registra-se a fileira onde cada bobina está, porém a sua posição exata não está registrada.

Diariamente é expedida uma ordem para quais bobinas devem ser encaminhadas naquele dia. Cada bobina é produzida para ser enviada especificamente a um cliente, ou seja, uma bobina é destinada ao centro de distribuição com a informação de para qual cliente ela será encaminhada. Como a saída dos materiais do CD ocorre pelo modal rodoviário, a empresa conta com uma série de transportadoras que disponibilizam diversos tipos de caminhões para realizar o transporte das bobinas aos clientes.

Destaca-se dois desafios operacionais na administração do CD que estão sendo abordados nesse trabalho. O primeiro é a determinação de uma alocação entre as bobinas e os caminhões. Com o conhecimento do cliente ao qual cada bobina é destinada e as especificações das bobinas, é possível determinar como realizar o transporte do material utilizando os caminhões disponíveis. Nesse artigo apresentaremos duas formas de se alocar as bobinas aos caminhões, um algoritmo aleatório e um modelo matemático, comparamos os resultados desses dois tipos de alocação de bobinas aos caminhões.

O segundo desafio operacional a ser abordado é a sequência em que os caminhões (que já possuem as bobinas que devem transportar atribuídas) vão ser carregados. O CD possui duas pontes rolantes, que são responsáveis por mover as bobinas das fileiras para os caminhões. Determinar uma sequência ótima de carregamento dos caminhões reduz significativamente os tempos de saída das bobinas do CD, proporcionando melhorias significativas na operacionalização.

#### 4. Alocação

Foi desenvolvido um algoritmo de alocação aleatória, no qual os clientes que possuem entregas de bobinas naquele dia têm sorteado um caminhão, com garantia de compatibilidade, para realizar a entrega. Quando um caminhão é escolhido para realizar a entrega ao cliente as bobinas destinadas ao cliente são analisadas para a possibilidade de, havendo mais que uma bobina, elas sejam colocadas no mesmo caminhão. O fator decisório é o peso das bobinas, caso não seja possível que um único caminhão leve todas as bobinas outro caminhão será sorteado. Os dados utilizados no algoritmo, são idênticos aos utilizados no modelo de alocação proposto por [Silva Neto, 2014].

##### 4.1. Modelo De Alocação

O modelo de alocação de bobinas a caminhões proposto por [Silva Neto, 2013] possui algumas premissas para realizar a montagem de cargas aos caminhões de forma a minimizar o peso morto. Cada bobina possui um peso associado e está destinada a um cliente específico antes de chegar ao CD. No que diz respeito aos caminhões cada um possui uma capacidade associada



ao seu tipo e não é permitido ultrapassar essa capacidade de carga. Quanto aos clientes só podem receber mercadoria através de caminhões que sejam compatíveis e em um mesmo caminhão não pode haver bobinas de clientes diferentes.

O modelo conta com quatro conjuntos: o conjunto  $C$  que representa os grupos de clientes  $1, \dots, ng_c$ , o conjunto  $J$  dos produtos a serem expedidos  $1, \dots, np$ , o conjunto  $J_c$  de produtos do cliente  $c$  a serem expedidos  $1, \dots, np_c$  e o conjunto  $K$  dos caminhões disponíveis  $1, \dots, k$ . Os parâmetros que foram considerados no modelo são:  $np$ , número de produtos a serem expedidos,  $np_c$ , números de produtos do cliente  $c$  a serem expedidos,  $ng_c$ , número de grupos de clientes,  $l_k$ , número de caminhões do tipo  $k$  disponíveis,  $w_k$ , capacidade dos caminhões do tipo  $k$ ,  $f_k$ , folga permitida nos caminhões do tipo  $k$ ,  $b_j$ , que é o peso da bobina  $j$ , e  $r_{kc}$ , que é a matriz binária de compatibilidade entre os tipos de caminhões  $k$  e o cliente  $c$ .

Das variáveis de decisão que são consideradas no modelo temos duas variáveis binárias:  $x_{jk}^q$  e  $y_{ck}^q$ . A primeira assume o valor de 1 se o produto  $j$  é alocado no  $q$ -ésimo caminhão do tipo  $k$ , e 0 caso contrário. A segunda ( $y_{ck}^q$ ), que assume o valor de 1 se o  $q$ -ésimo caminhão do tipo  $k$  é utilizado pelo cliente  $c$ , e 0 caso contrário. As outras duas variáveis de decisão são:  $h_{kc}^q$  representa a folga do  $q$ -ésimo caminhão do tipo  $k$  utilizado pelo cliente  $c$  e  $z_{kc}^q$  representando o peso morto do  $q$ -ésimo caminhão do tipo  $k$  utilizado pelo cliente  $c$ .

A seguir temos o modelo proposto:

Função Objetiva:

$$\text{Minimizar } \sum_{k \in K} \sum_{q=1}^{l_k} \sum_{c \in C} z_{kc}^q \quad (5.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k \in K} \sum_{q=1}^{l_k} x_{jk}^q = 1 \quad \forall c \in C, j \in J_c, \quad (5.2)$$

$$\sum_{j \in J_c} b_j \cdot x_{jk}^q + h_{kc}^q = w_k \cdot y_{kc}^q \quad \forall k \in K, c \in C, \quad (5.3)$$

$$x_{jk}^q \leq r_{kc} \quad \forall k \in K, c \in C, j \in J_c, \quad (5.4)$$

$$h_{kc}^q - z_{kc}^q \leq f_k \quad \forall k \in K, c \in C, \quad (5.5)$$

$$y_{kc}^q - x_{jk}^q \geq 0 \quad \forall j \in J_c, k \in K, c \in C, \quad (5.6)$$

$$\sum_{q=1}^{l_k} \sum_{c \in C} y_{kc}^q \leq l_k \quad \forall k \in K \quad (5.7)$$

$$x_{jk}^q, y_{kc}^q \in \{0, 1\}, z_{kc}^q, h_{kc}^q \geq 0 \quad \forall j \in J_c, k \in K, c \in C, \quad (5.8)$$

No modelo de alocação proposto apresentado acima, a função objetiva (5.1) minimiza o peso morto dos caminhões utilizados para fazer o transporte das bobinas para os clientes. O conjunto de restrições (5.2) determina que cada bobina seja alocada a apenas um caminhão. Os conjuntos de restrições (5.3), (5.4) e (5.5), dizem respeito aos caminhões, o primeiro calcula a folga de cada caminhão, ou seja, a diferença entre a capacidade e a carga alocada a ele, o conjunto (5.4) determina que a compatibilidade entre cliente e tipo de caminhão seja respeitada, o último conjunto (5.5) define o peso morto de cada caminhão, que é a diferença entre a folga do caminhão e a folga permitida. O conjunto de restrições (5.6) determina que uma bobina só pode ser alocada a um caminhão que está sendo utilizado pelo cliente. O conjunto (5.7) garante que a quantidade de caminhões disponíveis seja respeitada. (5.8) representa o domínio das variáveis.



## 5. Sequenciamento para o carregamento dos caminhões

### 5.1. Algoritmo de Johnson

O algoritmo de Johnson considera que existem  $n$  itens que devem passar por uma fase de produção ou máquina e, em seguida, por uma segunda fase de produção ou máquina. Existe apenas uma máquina para cada estágio e apenas um item pode estar em uma máquina em cada momento. Deve-se considerar também  $A_i$  e  $B_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , onde  $A_i$  é o tempo de processamento do item  $i$  na máquina um e  $B_i$  é o tempo de processamento do item  $i$  na máquina dois. Existe então uma regra que possibilita determinar o sequenciamento das tarefas de forma que todas sejam realizadas no menor tempo possível.

Intuitivamente devemos iniciar o sequenciamento das tarefas com a tarefa com o menor tempo de processamento na máquina um, permitindo assim que o processamento das tarefas comecem o mais cedo possível e terminar o sequenciamento com as tarefas com o menor tempo na máquina dois, porque a máquina um vai estar ociosa durante esse intervalo de tempo.

Existem casos particulares em que o algoritmo de Johnson pode ser bem aplicado, como no caso de tarefas que são processadas primeiro na máquina dois e depois na um, e casos em que há tarefas a serem processadas em apenas uma máquina. Para mais detalhes consultar [Johnson, 1954].

No problema abordado nesse trabalho os itens a serem considerados são os caminhões, as máquinas são as pontes rolantes responsáveis por realizar o carregamento dos caminhões. Os tempos de processamentos dos itens, é o tempo total gasto para cada uma das pontes rolantes buscar as bobinas localizadas entre as fileiras responsáveis. Nesse problema para carregar o caminhão uma das pontes rolantes é responsável pela retirada das bobinas localizadas na primeira metade do CD e a segunda ponte rolante é responsável pela segunda metade do armazém.

### 5.2. Modelo de Sequenciamento

O modelo matemático proposto em [Maschietto, 2015] trata do sequenciamento para o abastecimento de caminhões no CD por duas pontes rolantes trabalhando como máquinas paralelas. O modelo considera  $B$  o conjunto de bobinas a serem processadas pelas máquinas do conjunto  $M = \{1, 2\}$ , sabendo que  $Q_j \subseteq B$  é o conjunto de bobinas que devem ser carregadas no caminhão  $j \in J$ .  $H$  representa o horizonte de planejamento, tal que  $t = 1, \dots, H$

No modelo matemático descrito abaixo devemos considerar  $l_i$  a fileira em que se encontra a bobina  $i$  e que todos os itens  $i \in B$  possuem um tempo de processamento pela máquina  $m$ ,  $p_i^m$ . O parâmetro  $w_j$  é o peso, ou fator prioridade, de se carregar um caminhão  $j$ .

As variáveis de decisão do modelo são  $C_j$  que representa o tempo total gasto para se processar o abastecimento de um caminhão  $j$ . A variável binária  $y_{jt}^m$  assume o valor de 1 se o caminhão  $j$  é processado pela máquina  $m$  no início do período  $t$ , e 0 caso contrário, e  $x_{it}^{em}$  assume o valor de 1 se a bobina  $i$  assume a posição  $e$  sendo processada pela máquina  $m$  no início do período  $t$ , e 0 caso contrário

A seguir temos o modelo proposto:

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{j \in J} w_j \cdot C_j \quad (6.1)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{e=1}^{q_j} \sum_{m \in M} \sum_{t=0}^{H-p_i^m} x_{it}^{em} = 1 \quad \forall i \in B \quad (6.2)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{t=0}^{H-p_i^m} \sum_{i \in Q_j} x_{it}^{em} = 1 \quad \forall j \in J, \forall e \in \{1, \dots, q_j\} \quad (6.3)$$



$$\sum_{e \in B} x_{vt}^{em} + \sum_{j \in J} \sum_{e=1}^{q_j} \sum_{z=t}^{\min(t+p_v^m-1, H-p_i^m)} x_{iz}^{em} \leq 1 \quad \forall m \in M, \forall t \in \{0, \dots, H-p_v^m\}, \forall v \in B, \forall i \in B | v \neq i \quad (6.4)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{t=0}^{H-p_0} y_{jt}^m = 1 \quad \forall j \in J \quad (6.5)$$

$$y_{jt}^m - \sum_{i \in Q_j} x_{it}^{1m} = 0 \quad \forall m \in M, \forall j \in J, \forall t \in \{0, \dots, H-p_0\} \quad (6.6)$$

$$x_{it}^{em} - \sum_{v \in Q_j | i \neq v} x_{vt}^{e+1m} \leq 0 \quad \forall m \in M, \forall j \in J, \forall i \in Q_j, \forall e \in \{1, \dots, q_j-1\}, \forall t \in \{0, \dots, H-p_i^m\} | q_j \geq 2 \quad (6.7)$$

$$\sum_{e \in B} x_{it}^{em} + \sum_{j \in J} \sum_{e=1}^{q_j} \sum_{z=\max(0, t-p_v^n+1)}^{\min(t+p_i^m-1, H-p_v^n)} x_{vz}^{en} \leq 1 \quad \forall m \in M, \forall n \in M | n > m, l_i \geq l_v - \Delta \quad (6.8)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{t=0, \dots, H-p_0} \left( t + \sum_{i \in Q_j} p_i^m \right) \cdot y_{jt}^m - C_j = 0 \quad \forall j \in J \quad (6.9)$$

$$x_{it}^{em} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in B, \forall j \in J, \forall e \in \{1, \dots, q_j\}, \forall t \in H, \forall m \in M \quad (6.10)$$

$$y_{jt}^m \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J, \forall t \in H, \forall m \in M \quad (6.11)$$

$$C_j \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (6.12)$$

A função objetiva (6.1) minimiza o tempo total ponderado de realização dos trabalhos, ou seja, do abastecimento dos caminhões  $j$ . O conjunto de restrições (6.2) determina que cada bobina só pode ser processada uma única vez (6.3) garante que cada bobina a ser processada para um caminhão ocupe apenas uma posição de processamento, por exemplo, se em um mesmo caminhão serão enviadas duas bobinas sendo  $a$  uma delas ela pode ser processada em primeiro ou segundo lugar. O conjunto de restrições (6.4) garante que cada máquina processe apenas uma bobina por período e (6.5) determina que cada caminhão seja processado uma única vez. Para garantir que a bobina da posição  $e = 1$  comece a ser processada no instante em que o caminhão  $j$  começa a ser processado temos o conjunto de restrições (6.6). (6.7) determina que as bobinas de um mesmo caminhão sejam processadas de maneira cronológica. A questão quanto a interferência das pontes rolantes ao processar as bobinas tem o conjunto de restrições (6.8), que garante uma distância segura  $\Delta$  entre as filas onde bobinas estão sendo processadas e (6.9) calcula o tempo total para se abastecer um caminhão  $j$ . (6.10), (6.11) e (6.12) são os domínios das variáveis do modelo.

## 6. Resultados

O algoritmo de alocação de bobinas de maneira aleatória aos caminhões foi testado para um grupo de instâncias artificiais geradas a partir dos dados fornecidos pela empresa, para mais detalhes consultar [Silva Neto, 2013].

O primeiro grupo de dados apresentados a quantidade de caminhões disponíveis era alta, 200 de cada tipo, a quantidade de clientes disponíveis variava entre 10 e 49, ou seja, mesmo que todos os clientes fossem compatíveis com o mesmo tipo de caminhão, por exemplo os 49 clientes precisassem de um caminhão tipo 4 haveria disponibilidade. O algoritmo achou uma solução viável para todas as instâncias.

Na tabela a seguir temos na primeira coluna a quantidade de bobinas, na segunda temos o valor médio do peso morto dos caminhões para aquele determinado número de bobinas,



lembrando que esse peso morto é a diferença entre a carga mínima que um caminhão tem que assumir para sair do CD e a carga real. A terceira coluna apresenta o número médio de caminhões utilizados e a última o número médio de clientes.

*Tabela 1-Instâncias alta disponibilidade de caminhões*

Quant. De Bobinas	Valor médio do peso Morto (ton.)	Número médio de caminhões utilizados	Número médio de clientes
20	161.72	17	12.5
50	324.18	39	21.5
100	473.93	70.5	32
200	731.75	135	45.5

Podemos perceber que o número médio de caminhões utilizados é superior ao número de clientes, o que implica que determinados clientes estão recebendo mais de um caminhão. Como o algoritmo tem caráter aleatório para alocar as bobinas aos caminhões e os caminhões possuem diferentes capacidades, uma análise é que caminhões de baixa capacidade transportam bobinas para clientes que estão recebendo mais de um produto, ou seja, um possível remanejamento de cargas poderia conduzir a uma diminuição do peso morto, respeitando a compatibilidade sempre.

No segundo grupo de instâncias a disponibilidade de caminhões foi bastante reduzida, para as instâncias com 20 bobinas a quantidade de caminhão de cada tipo variava entre 6 e 10, nas com 50 bobinas entre 10 e 15, nas com 100 bobinas entre 15 e 20 e nas com 200 bobinas entre 30 e 40. Com os caminhões mais restritos o algoritmo não conseguiu achar solução para todas as instâncias. Em algumas instâncias de 100 e 200 bobinas se um determinado cliente só é compatível com tipos de caminhões que tiveram toda a sua disponibilidade alocada, não há como enviar essa bobina ao cliente. O comportamento do algoritmo nesse grupo de instâncias ressalta a importância de que as atribuições de bobinas a caminhões e clientes não seja feita de maneira aleatória.

*Tabela 2-Instâncias Média disponibilidade de caminhões*

Quant. De Bobinas	Peso Morto (ton.)	Número médio de caminhões utilizados	Número médio de clientes
20	167.21	17	12.5
50	332.34	39.5	22.5
100	478.96	72.5	32
200	716.96	139	44

No último grupo de instâncias a disponibilidade de caminhões para as instâncias com 20 bobinas a quantidade de caminhão de cada tipo variava entre 1 e 5, nas com 50 bobinas entre 3 e 8, nas com 100 bobinas entre 7 e 12 e nas com 200 bobinas entre 15 e 20.

*Tabela 3-Instâncias Baixa disponibilidade de Caminhões*

Quant. De Bobinas	Peso Morto (ton.)	Número médio de caminhões utilizados	Número médio de clientes
20	142.55	16	12
50	331.13	41.5	22.5
100	542.22	74.5	33.5
200	693.99	113	43.5

Os resultados para os três grupos de instâncias artificiais demonstram que a questão central da alocação aleatória não é falta de caminhões; pois dentro das 120 instâncias testadas em apenas duas houve bobinas que não foram enviadas aos clientes por falta de caminhão compatível. Outra análise que devemos ressaltar é que quando restringimos o número de caminhões, o peso



morto médio e a quantidade de caminhões utilizados para transportar as bobinas não alteram muito, se mantivermos a quantidade de bobinas constantes.

### 6.1. Comparação aos resultados do Modelo de Alocação

Podemos comparar o algoritmo desenvolvido com o modelo de alocação proposto por [Silva Neto, 2013]. Na tabela abaixo temos a média das folgas para os grupos de instâncias com alta, média e baixa quantidade de caminhões disponíveis.

Tabela 4- Comparação entre o algoritmo e o modelo de alocação

Quantidade de Bobinas	Resultado Algoritmo	Resultado Modelo	Quantidade de Bobinas	Resultado Algoritmo	Resultado Modelo
20 bobinas			100 bobinas		
Disp. Alta	162	41	Disp. Alta	474	131
Disp. Média	167	46	Disp. Média	479	120
Disp. Baixa	143	55	Disp. Baixa	542	136
50 bobinas			200 bobinas		
Disp. Alta	324	95	Disp. Alta	732	151
Disp. Média	332	99	Disp. Média	717	171
Disp. Baixa	331	93	Disp. Baixa	694	174

Podemos analisar pela tabela que os resultados do algoritmo de alocação são piores aos resultados obtidos pelo modelo, no caso das instâncias com 20 bobinas o algoritmo chega a ser, aproximadamente, quatro vezes pior. A medida que a quantidade de bobinas aumenta a diferença média entre a folga total do algoritmo e do modelo cresce também chegando a cinco vezes na instância de duzentas bobinas. Pelos resultados percebemos também que se reduzirmos a quantidade de caminhões disponíveis, ou seja, tornar as instâncias mais restritivas não diminui o valor das folgas totais.

O gráfico a seguir temos a quantidade de bobinas pelo valor médio das folgas, a curva 1 representa o algoritmo e a curva 2 o modelo. Podemos perceber que o valor das folgas do algoritmo é sempre superior ao obtido pelo modelo e que cresce de maneira mais rápida para o algoritmo do que para o modelo.

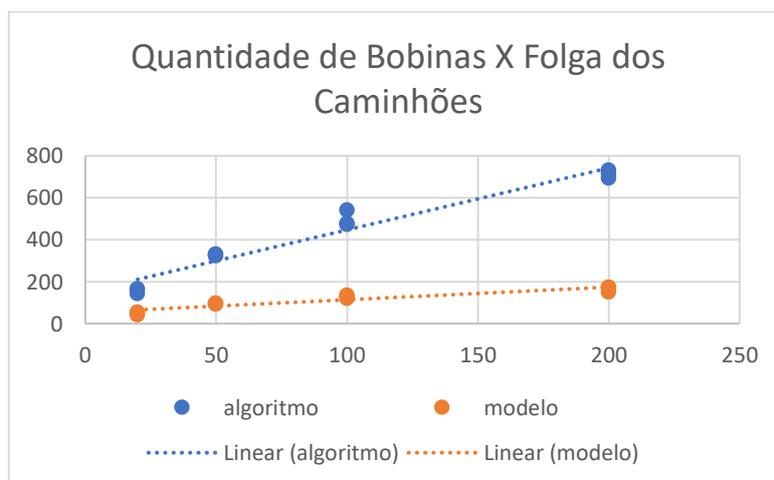


Gráfico 1-Quantidade de Bobinas e Folgas dos Caminhões

### 6.2. Algoritmo de Johnson

O algoritmo de [Johnson, 1954] foi testado para as trinta instâncias com 20 bobinas processadas pelo algoritmo. Para a execução do modelo foi determinada uma posição aleatória para as bobinas entre as fileiras um e noventa e oito. Na tabela a seguir temos na primeira coluna



o número da instância, na segunda o número de caminhões utilizados, na terceira o tempo final de processamento máximo.

*Tabela 5-Resultado Do Algoritmo de Johnson*

Instância	Caminhões utilizados	Tempo total máximo	Instância	Caminhões utilizados	Tempo total máximo
1	17	73	16	17	67
2	16	66	17	17	73
3	17	77	18	16	93
4	15	60	19	16	97
5	18	62	20	18	91
6	18	93	21	16	63
7	16	93	22	16	86
8	16	107	23	16	62
9	20	59	24	16	83
10	19	81	25	17	70
11	18	67	26	16	47
12	18	62	27	16	84
13	16	63	28	19	77
14	19	72	29	15	71
15	15	65	30	16	69

No algoritmo de proposto por [Johnson, 1954] os caminhões a serem carregados passam pela ponte rolante um e são abastecidos com as bobinas destinadas a eles localizadas entre as fileiras um e quarenta e oito, depois seguem para a segunda ponte rolante onde recebem as bobinas localizadas entre as fileiras quarenta e nove a noventa e oito. Quando há caminhões que possuem bobinas de fileiras atendidas por uma das pontes rolantes, podem ocorrer carregamentos simultâneos. Os tempos gastos para o abastecimento dos caminhões variaram de acordo com a posição das bobinas, e se há bobinas a serem retiradas antes da bobina a ser abastecida no caminhão. O tempo gasto para a programação de abastecimento dos caminhões tem baixa relação com a quantidade de caminhões a serem abastecidos e maior relação com o posicionamento das bobinas. Quando a maior parte dos caminhões a serem carregados em um dia possui bobinas a serem processadas por apenas uma das pontes rolante e a outra encontra-se ociosa o tempo de carregamento total fica elevado.

### 6.3. Modelo de Sequenciamento

O modelo de sequenciamento proposto por [Maschietto, 2015] foi testado para as mesmas trinta instâncias, que foram sequenciadas anteriormente pelo algoritmo de [Johnson, 1954]. Na tabela a seguir temos na primeira coluna o número da instância, na segunda o número de caminhões utilizados, na terceira o tempo final de processamento máximo e na quarta o valor da função objetiva.

*Tabela 6- Resultados Modelo de Sequenciamento*

Instância	Caminhões utilizados	Tempo total máximo	Valor da F.O.	Instância	Caminhões utilizados	Tempo total máximo	Valor da F.O.
1	17	55	217.88	16	17	45	152.56
2	16	33	155.65	17	17	53	183.46
3	17	58	200.73	18	16	51	182.97
4	15	51	195.39	19	16	44	179.15



Instância	Caminhões utilizados	Tempo total máximo	Valor da F.O.	Instância	Caminhões utilizados	Tempo total máximo	Valor da F.O.
5	18	50	168.23	20	18	42	180.17
6	18	41	210.99	21	16	40	146.62
7	16	56	234.61	22	16	51	219.79
8	16	48	228.12	23	16	58	225.87
9	20	56	151.21	24	16	51	195.14
10	19	52	148.51	25	17	50	179.59
11	18	55	186.16	26	16	41	171.83
12	18	33	137.05	27	16	56	230.38
13	16	41	199.58	28	19	48	204.06
14	19	45	198.43	29	15	56	208.77
15	15	45	194.19	30	16	52	216.59

Podemos observar que o tempo total máximo, ou seja, o tempo que o ultimo caminhão foi processado, possui uma baixa relação com a quantidade de caminhões que estão sendo processados. A relação direta entre quantidade de caminhões e o tempo total máximo demonstrou ser baixa. Ao analisar os dados isso ficou evidente que a questão central é a incompatibilidade entre os caminhões. No modelo de sequenciamento proposto por [Maschietto, 2015] temos um grupo de restrições que garante que uma ponte rolante não pode estar mais próxima que uma distância segura  $\Delta$  dá outra. Isso determina uma situação de incompatibilidade entre os caminhões. Quando dois caminhões possuem bobinas que para serem transportadas do CD para eles as pontes rolantes não estarão a uma distância segura, esses caminhões tornam-se incompatíveis entre si. Um caminhão pode acabar se tornando incompatível com todos os outros que serão carregadas no mesmo dia o que levaria a um carregamento individual, causando um tempo total máximo de carregamento alto.

## 7. Conclusões e Trabalhos Futuros

O algoritmo proposto para alocar bobinas aos caminhões, respeitando as restrições de compatibilidade entre os caminhões e os clientes, se mostrou satisfatório em encontrar soluções viáveis para todas as instâncias testadas. Porém ao comparar os resultados do algoritmo proposto com o modelo matemático fica claro que o modelo detém melhores resultados, com menos gastos de caminhões e menores valores de folga. Dentro da empresa estudada há um alto custo associado a folga nos caminhões, ou seja, investir em métodos de alocação eficientes de cargas que não só garantam a entrega total de material, mas também reduza as folgas é interessante.

O Algoritmo de Johnson sequencia os caminhões para serem carregados pelas pontes rolantes tratando o problema como um problema *flow shop* flexível, onde cada um dos caminhões passa pela máquina um recebendo as bobinas provenientes da área de atuação da ponte rolante um e depois passa pela ponte rolante dois recebendo as bobinas de sua área de atuação. Em caso de caminhões que possuem bobinas em apenas uma das áreas a flexibilidade do algoritmo permite que sejam sequenciadas como máquinas paralelas. Conclui-se pela análise dos resultados obtidos que há sobrecarga de uma das pontes rolantes, enquanto outra encontra-se ociosa. Esse comportamento se deve a distribuição das bobinas dentro do CD.

Quando tratamos a questão de sequenciamento dos caminhões como um problema de máquinas paralelas [Maschietto, 2015], cada caminhão é atendido por uma das máquinas, assim existe a possibilidade que dois caminhões sejam processados de maneira simultânea devido a existência de duas pontes rolantes. Porém para que ocorra um processamento em paralelo uma ponte rolante não pode interferir no funcionamento da outra, o que ocorre quando há a necessidade de se processar bobinas que se encontram com uma distância inferior a de segurança. A incompatibilidade entre caminhões para garantir a segurança do funcionamento do CD aumenta os tempos de sequenciamento total.



Uma forma de reduzir o tempo total de sequenciamento em ambos os casos, *flow shop* e máquinas paralelas, é alterar a organização do depósito antes de se sequenciar os caminhões. Espera-se em trabalhos futuros testar diferentes cenários de posicionamento de bobinas no centro de distribuição. Há uma pesquisa também para se desenvolver um método iterativo entre a alocação de cargas, bobinas para caminhões, e o sequenciamento, das pontes rolantes para carregar os caminhões, dando uma importância ao posicionamento das bobinas para diminuir a incompatibilidade entre os caminhões na hora do abastecimento, reduzir sobrecarga/ociosidade de pontes rolantes.

## 8. Referências

- Chen, F., & Lee, C. Y. (2009). Minimizing the makespan in a two-machine cross-docking flow shop problem. *European Journal of Operational Research*, 193(1), 59-72.
- Chen, F., & Song, K. (2009). Minimizing makespan in two-stage hybrid cross docking scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 36(6), 2066-2073.
- Johnson, S. M. (1954). Optimal two-and three-stage production schedules with setup times included. *Naval Research Logistics (NRL)*, 1(1), 61-68.
- Johnson, D. S. (1973). Near-optimal bin packing algorithms (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- Ladier, A. L., & Alpan, G. (2015). Cross-docking operations: Current research versus industry practice. *Omega*, 62, 145-162.
- Larbi, R., Alpan, G., Baptiste, P., & Penz, B. (2011). Scheduling cross docking operations under full, partial and no information on inbound arrivals. *Computers & Operations Research*, 38(6), 889-900.
- Maschietto, G. N. (2015). Scheduling problem in a distribution center with two cranes subject to non-interference constraints. Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil. Dissertação de Mestrado.
- Menezes, G. C., Mateus, G. R., & Ravetti, M. G. (2017). A branch and price algorithm to solve the integrated production planning and scheduling in bulk ports. *European Journal of Operational Research*, 258(3), 926-937.
- Naderi, B., & Azab, A. (2014). Modeling and heuristics for scheduling of distributed job shops. *Expert Systems with Applications*, 41(17), 7754-7763.
- Pinedo, M. (2008). *Scheduling-Theory, Algorithms, and Systems*. Springer.
- Silva Neto, J.P.(2013).Montagem de cargas e sequenciamento de caminhões em um centro de distribuição. Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil. Dissertação de Mestrado.
- Van Belle, J., Valckenaers, P., & Cattrysse, D. (2012). Cross-docking: State of the art. *Omega*, 40(6), 827-846.
- Tan, W., & Khoshnevis, B. (2000). Integration of process planning and scheduling—a review. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11(1), 51-63.