

# O PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE APLICADO NA DISTRIBUIÇÃO DE PEÇAS/COMPONENTES DO ALMOXARIFADO PARA A MONTAGEM DE CAMINHÕES ESPECIAIS EM UMA LINHA DE PRODUÇÃO NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

## THE PROBLEM OF TRAVELING SALESMAN APPLIED IN DISTRIBUTION PARTS/ WAREHOUSE COMPONENTS FOR SPECIAL TRUCK ASSEMBLY IN A PRODUCTION LINE IN AUTOMOTIVE INDUSTRY

Data de entrega dos originais à redação em: 16/10/2016  
e recebido para diagramação em: 08/12/2017

Prof. Me. Paulo Henrique Lixandrão Fernando <sup>1</sup>  
Post. Doc. Dr<sup>a</sup>. Kelly Cristina de Lira Lixandrão <sup>2</sup>  
Prof. Dr. Francisco Yastami Nakamoto <sup>3</sup>  
Prof. Dr. Osvaldo Luís Asato <sup>4</sup>  
Prof. Dr. Silvio Antônio Bueno Salgado <sup>5</sup>

O presente trabalho visou resolver um problema real modelado com o Problema do Caixeiro Viajante (PCV), em uma indústria automobilística, localizada na região de São Bernardo do Campo – SP, que procurou minimizar a rota que a paleteira pode entregar as peças para quinze células de montagem existentes na fábrica. Para resolver o problema utilizou-se o solver disponível no software MS Excel.

Palavras-chave: Problema do Caixeiro Viajante. Roteirização. Programação Matemática. Otimização.

*This work consists of optimizing a real problem modeled with the Traveling Salesman Problem (TSP) in an automotive industry, located in the region of São Bernardo do Campo - SP, which seeks to minimize the route that the pallet truck you can deliver the parts to fifteen existing assembly cells at the factory. To solve the problem we use the solver available in MS Excel Software.*

*Keywords: Traveling Salesman Problem. Routing. Mathematical Programming. Optimization.*

## 1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho buscou-se identificar o problema que os engenheiros de processo e gestores de planejamento de produção de grandes empresas fabricante de veículos de grande porte como caminhões, encontram em relação a minimização de prazo de fabricação e montagem dos veículos na sua área, denominada célula de montagem. Tem-se atualmente, devido ao cenário econômico atual, de baixa produção na indústria automobilística, uma necessidade de produzir e diversificar com novos produtos, sendo assim, as empresas buscam técnicas para maximizar a produção, com o mesmo número de células (capacidade física) de produção.

Desta forma a questão para resolver o problema investigado foi: Como minimizar a rota de distribuição de peças em uma linha de montagem na indústria automobilística? Para minimizar o tempo de montagem e também do prazo de entrega dos produtos ao cliente, eliminando assim, os possíveis riscos de falta de peças utilizou-se o PCV com apoio do software MS Excel por meio da ferramenta solver (FRONTLINE, 2016).

Denota-se como objetivo do estudo verificar a técnica matemática do PCV para solucionar um problema

de roteirização que é o movimento aleatório de um local a outro local, visando definir o menor caminho que as peças da linha de montagem da empresa deve percorrer para a montagem dos veículos especiais tendo o custo mínimo para o tempo de montagem destes equipamentos nas células, portanto, utilizou-se o algoritmo computacional do software MS Excel por meio de seu solver para definir a menor rota, permitindo a redução de custos para a empresa estudada e minimizando o tempo/prazo de entrega do produto montado. A necessidade atual de redução de custos de fabricação na indústria automobilística é fortemente solicitada aos engenheiros do produto e processo. Por este fato, engenheiros buscam em outras áreas as técnicas modernas que podem ser introduzidas ou utilizadas em seus processos, como por exemplo, os métodos computacionais para otimização com o PCV que pode ser aplicada na indústria e utilizada em vários locais dentro de um ciclo produtivo.

Por meio da solução do problema proposto, foi possível reduzir o tempo de distribuição das peças do almoxarifado para a linha de montagem dos veículos especiais desta empresa. Os resultados contribuirão para uma nova aplicação no meio acadêmico e uso industrial.

1 - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Câmpus São Paulo - Universidade Federal de São João del-Rei – Câmpus São João del-Rei. < paulo.lixandrao@ifsp.edu.br >.

2 - Universidade Federal do ABC – Câmpus Santo André. < kelly.silva@ufabc.edu.br >.

3 - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Câmpus São Paulo. < nakamoto@ifsp.edu.br >.

4 - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Câmpus Suzano. < asato@ifsp.edu.br >.

5 - Universidade Federal de Alfenas – Câmpus Varginha. < silvio.salgado@unifal-mg.edu.br >.

As células de montagem de veículos, podem ser fixas ou em linha. No caso da empresa de pesquisa encontramos células de montagem fixas onde os mecânicos e operadores se movimentam em função dos processos de montagem dos produtos, estes que podem ser de vários tipos, que serão definidos posteriormente junto com a formulação matemática do problema.

Com base na necessidade da diminuição dos custos logísticos e ao processo de distribuição das peças/componentes, o presente trabalho visou aperfeiçoar a rota de entrega já existente de uma determinada empresa, melhorando-as por meio da aplicação do problema do caixeiro viajante para uma única paleteira de peças que faz o percurso na distribuição da mercadoria. Com bases em uma planta industrial que contempla as dimensões da fábrica para poder medir com o software AUTOCAD, as distâncias entre as células, necessitou-se a produção do grafo, que após resolvido o problema demonstra-se a melhor rota dentre as células nas quais os mecânicos precisam receber estas peças para produzir o caminhão especial.

Para levantamento de dados utilizou-se referencial documental da empresa de estudo, considerando os possíveis problemas que a empresa poderia ter como falta de componentes, distância de áreas de montagem etc.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Grafos

Dado um conjunto  $V$ , denota-se por  $V^2$  o conjunto de todos os pares não ordenados de elementos de  $V$ . Assim, um elemento de  $V^2$  tem a forma  $\{v,w\}$  em que  $v$  e  $w$  são elementos de  $V$ .

Um grafo  $G$  é um par  $(V,A)$  em que  $V$  é um conjunto arbitrário e  $A$  é um subconjunto de  $V^2$ . Os elementos de  $V$  são chamados de vértices e os elementos de  $A$  são chamados de arestas.

Uma aresta  $\{v,w\}$  será denotada por  $vw$  ou por  $wv$ . Dado um grafo  $G$ , o conjunto de seus vértices será denotado por  $V(G)$  e o conjunto de suas arestas por  $A(G)$ .

Um caminho é um grafo  $C$  cujo conjunto de vértices admite uma permutação  $(v_1, \dots, v_n)$  tal que

$$\{v_1 v_2, v_2 v_3, \dots, v_{n-1} v_n\} = A(C)$$

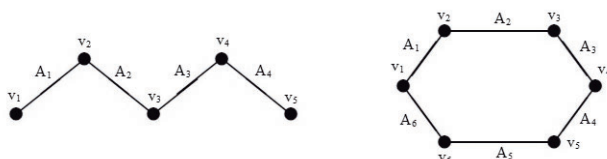
Os vértices  $v_1$  e  $v_n$  são os extremos do caminho.

Um circuito é um grafo  $O$  com número de vértices sempre maior do que ou igual a 3 e cujo conjunto de vértices admite uma permutação  $(v_1, v_2, \dots, v_n)$  tal que

$$\{v_1 v_2, v_2 v_3, \dots, v_{n-1} v_n\} \cup \{v_n v_1\} = A(O)$$

Tal circuito pode ser denotado simplesmente por  $v_1 v_2 \dots v_n v_1$ .

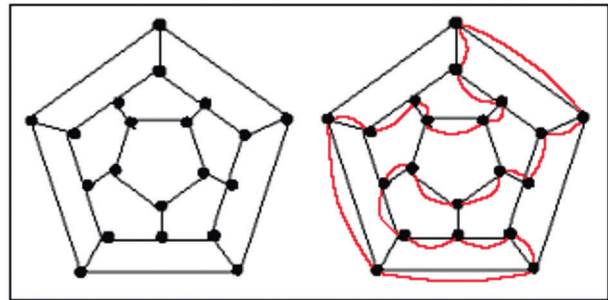
Figura 1 – Um caminho e um circuito



Fonte: (FEOFILOFF; KOHAYAKAWA; WAKABAYASHI, 2011)

Um circuito hamiltoniano é um circuito que passa exatamente uma vez por cada vértice do grafo (exceto pelo vértice de onde se origina). Segundo Andreolla e Kripka (2011), foi William Rowan Hamilton que definiu esse tipo de circuito em 1857, propondo um jogo denominado *Around the World*. Tinha-se nesse jogo um dodecaedro e cada vértice se definia como uma cidade importante, sendo que o objetivo era encontrar uma rota, através dos vértices, que iniciasse e terminasse em uma mesma cidade, sem nunca repetir a mesma cidade, conforme demonstrado na figura 2.

Figura 2 – Solução para o jogo Around the World

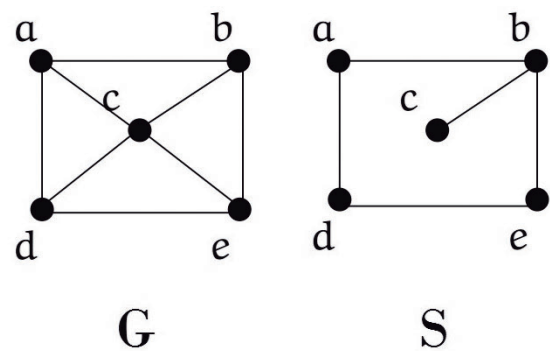


Fonte: (ANDREOLLA; KRIPKA, 2011)

Tal problema está intimamente relacionado ao problema do caixeiro viajante.

Um subgrafo de um grafo  $G$  é qualquer grafo  $S$  tal que  $V(S) \subseteq V(G)$  e  $A(S) \subseteq A(G)$ .

Figura 3 – Subgrafo S do Grafo G.



Fonte: Adaptado de Matsushigue (2010)

### 2.2 Problema do Caixeiro Viajante

O Problema do caixeiro viajante (PCV), muito utilizado no experimento de diversos métodos de otimização, é uma técnica que consiste em aproveitar o tempo, por meio da modelagem matemática, utilizados para resolver problemas de otimização combinatórios, portanto, é um exemplo clássico de problema de otimização combinatória.

De acordo com Goldbarg e Luna (2005), o PCV, que em inglês é definido como *Travelling Salesman Problem (TSP)*, foi um dos primeiros problemas de otimização estudados na programação matemática, e atualmente é um dos problemas mais conhecidos.

Godel (1956), escreveu uma carta a John von Neumann postulando a existência de uma única prova

que podia abrir as leis fundamentais que unem o nosso universo. Fantástica no momento, as inovações tecnológicas e avanços conceituais do último século, tem trazido muito conhecimento para descobrir o potencial incontestável da prova. Hoje, é considerado o mais importante problema sem solução da ciências da computação, e é conhecido simplesmente como  $P$  vs  $NP$ .  $P$  seria os problemas fáceis, resolvidos por algoritmos polinomiais, e  $NP$  os problemas que podem ser completos e difíceis, em que atualmente há apenas alguns algoritmos exponenciais para resolvê-los. O PCV é um problema difícil e complexo a ser resolvido denominado NP-completo (do inglês, *hard-Non-Deterministic Polynomial time* - tempo polinomial não determinístico). Godel (1956), tentou por meio da carta, dar argumentos a Neumann para tentar resolver os problemas  $NP$ s na mesma facilidade com que os problemas  $P$ s seriam resolvidos, mas não teve uma boa aceitação por Neumann naquele momento da história, no entanto a carta até hoje instiga pesquisadores a procurarem algoritmos para fazer com que os problemas complexos sejam resolvidos de forma simples.

Segundo Carvalho (2016), o PCV consiste em determinar um ciclo hamiltoniano de custo mínimo em um grafo ponderado direcionado ou não. Há uma grande complexibilidade em encontrar o ciclo hamiltoniano, por isto o problema é considerado NP-Difícil. Ainda segundo este autor, o PCV é um clássico de otimização combinatória, e de acordo com o trabalho 'On the history of combinatorial optimization', de 1960, a ideia do ciclo hamiltoniano de custo mínimo como problema de aplicação, surgiu em 1920 em Viena, atribuído a Karl Menger. Entre 1931 e 1932, Kar Menger conhece Hassler Whitney, e em 1934 publicaram um trabalho na Princeton University (GOLDBARG; LUNA, 2005), que foi designado o termo o Problema do Caixeiro Viajante. Após este período outros pesquisadores estudaram o problema como Menger (1940), Milgran (1940), Mehalanobis (1940), Jessen (1942), Gosh (1948), Marks (1948), Flood (1956), etc.

O PCV é caracterizado com elementos como um dado conjunto, de  $n$  cidades e a distância (ou custo da viagem) entre elas, estes dados do conjunto, podem ser representados em uma matriz, e com o uso de um *solver* como o do MS Excel, o PCV procura uma rota que percorra as  $n$  cidades uma única vez e retorne a sua origem, assim a distância percorrida passa a ser a mínima, fazendo com que tenha-se um menor custo. De uma forma geral, segundo Andreolla e Kripka (2010), o objetivo do PCV é encontrar o circuito hamiltoniano de menor custo.

Segundo Goldbarg e Luna (2005) o PCV é importante em pelo menos três características:

- Grande número de aplicações práticas.
- Grande relação com vários outros problemas e muitas variantes.
- Grande dificuldade de solução exata.

Por este fato hoje o PCV, é um problema de otimização combinatória mais intensamente

pesquisados até o momento. Várias aplicações podem ser desenvolvidas com o PCV, como programação de operações de máquinas em manufatura, programa de transporte entre células de manufatura, etc.

Uma diferença encontrada no PCV é a simetria ou assimetria do grafo, assim ele pode ser:

- Simétrico: Grafo não orientado, não há a dependência da direção ou sentido das arestas.
- Assimétrico: Grafo orientado em que considera-se o sentido das arestas.

### 2.3 Complexidade Computacional do PCV

O PCV é considerado um problema da classe difíceis, pois a considerada "solução ótima", pode custar caro, devido a quantidade do número de vértices e o tempo para resolução do problema. Existem situações em que a quantidade de vértices é tão significativa, que os computadores atuais não conseguem resolver o PCV.

O PCV, portanto, é considerado  $NP$  - *difícil*, que significa ordem de complexidade não polinomial. Isto ocorre pois existe uma quantidade  $(n-1)!$  que cresce rapidamente a medida que  $n$  cresce, e o computador torna-se incapaz de executar problemas de grande porte.

Para que não tenha um grande problema em resolver o PCV em muitos vértices, executa-se aproximações que garantem uma determinada porcentagem da solução ótima, garantindo uma solução correta.

Como não é possível resolver problemas  $NP$  que resistem as tentativas de crescimento, não é possível encontrar soluções determinísticas (exatas) com resolução ótima, assim, utiliza-se métodos heurísticos nas respectivas soluções.

### 2.4 Modelagem do problema

Por meio da teoria de grafos, e do estudo apresentado, observa-se que o problema se modelará melhor com o grafo hamiltoniano.

Há várias formulações matemáticas para o PCV. Neste trabalho utiliza-se a formulação de *Dantzig-Fulkerson-Johnson* de 1954, presente em Goldbarg e Luna (2005) para o PCV, esta é frequentemente utilizada na literatura, pois o PCV é de fácil compreensão. Nesta formulação estes autores previram 49 cidades, com um problema de programação 0-1 sobre o Grafo  $(V,A)$ , e também previu-se como condições do problema, restrições tanto no controle do fluxo de nós, que é como chega e sai o caixeiro numa cidade, como na eliminação de possíveis sub-rotas. O modelo é dado de acordo com a modelagem a seguir, e também é apresentado por Tauffer (2009).

Minimizar:

$$z = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N c_{ij} x_{ij}$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j \in \mathbb{N} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \in \mathbb{N} \quad (2)$$

$$\sum_{i,j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subset \mathbb{N} \quad (3)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in \mathbb{N} \quad (4)$$

Em que:

- $c_{ij}$  – Custo de ir da cidade  $i$  até a cidade  $j$ ;
- $x_{ij} = 1$ , se o arco  $(i,j) \in A$ , ou seja, for escolhido o caminho da cidade  $i$  até a cidade  $j$  para integrar a solução;
- $x_{ij} = 0$ , caso contrário;
- $S$  é um subgrafo de  $G$ ;
- $|S|$  é o número de vértice do subgrafo  $S$ ;
- $\mathbb{N}$  é o conjunto dos números naturais;

Nessa formulação assume-se que:

- $x_{ii}$  ou  $x_{jj}$  não existe, pois é sem sentido sair da cidade e retornar para ela mesmo;
- $n(n-1)$  é o número de variáveis;
- As variáveis são inteiras e binárias;
- O problema possui número de restrições na ordem  $2^n$ ;

Em (1) temos as restrições do fluxo de chegada em cada cidade ou nó  $j$  de valor 1.

Em (2) temos as restrições do fluxo de saída de cada cidade ou nó  $j$ .

Em (3) temos as restrições para eliminar os circuitos pré-hamiltonianos, evitando subciclos.

Em (4) temos as restrições que determinam que as variáveis são binárias, ou seja, que podem assumir, valores entre 0 e 1.

Se o problema é combinatório, temos um número de rotas definidos para o caso de  $n$  cidades. Por exemplo em  $n=4$  cidades, temos  $3 \cdot 2 \cdot 1 = 6$  rotas. Assim, como temos  $n$  cidades, e a primeira é fixa, o número total de possibilidades é  $(n-1) \cdot (n-2) \dots 1$ . Ou seja temos  $(n-1)!$  de possibilidades de posições de partidas e chegadas nestas cidades.

## 2.5 Processo de produção da empresa

Processo é um conjunto de recursos e atividades inter-relacionadas que transformam insumos em produtos ou resultados, desta forma podemos organizar metodologicamente as entradas (input) como a chegada dos insumos, e os produtos conseqüentemente são as saídas (output).

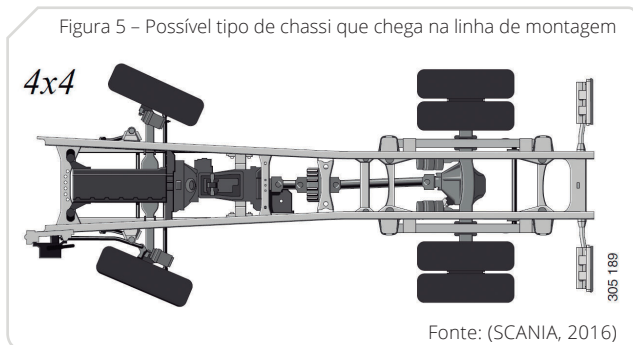
Hammer e Champy (1994) definem processos em função da gerência corporativa, ou seja, enfatizam que muitas pessoas de negócios estão "orientadas aos processos", e estes estão focadas em tarefas, ofícios, pessoas, estruturas, e não propriamente dito em processos, sendo assim a caracterização de processos de negócios é um conjunto de atividades que recebe um ou mais insumos e apresenta um produto de valor para o cliente.

Os processos de produção da empresa transformam componentes/peças em caminhões com diversos tipos de superestruturas a vários tipos de aplicação, como bombeiro, ambiental etc.

## 2.6 Montagem de peças/componentes de caminhões

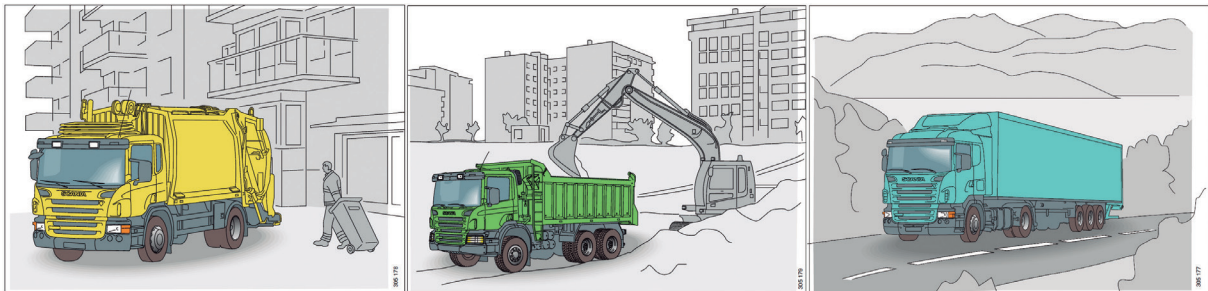
A linha de montagem da empresa fabrica diversas superestruturas de veículos, como caminhões de lixo, caminhões de bombeiro, etc. Os caminhões atendem 3 segmentos: Aeroportos, Ambiental e Bombeiros. Há uma média de 1000 peças/componentes em cada um dos equipamentos montados. Cada peça de um equipamento é catalogada e disponibilizada ao almoxarifado, para quando for emitido a ordem de produção, estes componentes possam ser alimentados na linha de produção, conforme figura 4.

O chassi do veículo é entregue à planta industrial, este é o primeiro componente que chega na montagem do veículo, conforme figura 5.



Fonte: (SCANIA, 2016)

Figura 4 – Tipos de carroceria aplicados no chassi



Fonte: (SCANIA, 2016)



Há vários tipos de chassis e configurações diferentes, 4x2, 4x4, 6x2, 6x4, 6x6, etc. Na figura destacada observa-se um chassi na configuração 4x4, em que tem-se dois eixos com 4 rodas e todas as 4 rodas tem tração, seja ela por meio de componentes mecânicos oriundos da caixa de transmissão do veículo, ou de componentes hidráulicos com transmissão hidrostática. Na empresa em estudo há várias montagens nestas células, em que a demanda do mercado define qual equipamento ou qual configuração será montado em cada uma destas células.

### 3 METODOLOGIA

O trabalho visa dar uma contribuição à área em questão no âmbito de propor por meio de modelagem matemática uma nova distribuição de componentes/peças para a linha de montagem da fábrica de veículos com superestruturas.

A metodologia foi aplicada no presente trabalho mediante a execução de estudos bibliográficos para se delinear a fronteira do objeto e caracterização do estado da arte relacionado ao tema em questão.

Na elaboração do trabalho, foi adotado uma metodologia que pode ser estruturada pela sequência de passos representados graficamente na Figura 6.

Por meio da técnica proposta inicialmente, realizou-se uma pesquisa bibliográfica de referência, com enfoque nas áreas de Processos de produção, Modelagem Matemática e Processos de Fabricação, representadas na Figura 7. Considerou-se estas áreas por estarem mais associadas a delimitação do tema. Os conceitos abordados a estas três áreas contemplam o interesse da pesquisa.

Sendo assim, foi realizado uma pesquisa da bibliografia de referência, levantando-se os principais itens relativos à questão da pesquisa (objeto de estudo). Também foi definido os aspectos como características do produto para estruturar o estudo.

Como principal técnica para atingir os objetivos deste trabalho, foi utilizado a pesquisa documental, que segundo Godoy (1995) é o exame de materiais de natureza diversa, que ainda não receberam um tratamento analítico, ou que podem ser reexaminados, buscando-se interpretações novas ou complementares.

Foi caracterizado a empresa e o problema que envolve o processo de produção da empresa, e o problema consiste na implementação no *solver* do MS Excel de valores das células e o almoxarifado desta empresa com relação as suas distâncias para que seja utilizado o processo de otimização, definindo o menor caminho, ou a solução ótima do trajeto que a paleteira fará após este estudo.

### 3.1 Caracterização da empresa

A empresa em estudo está atuando no ramo a 44 anos, e é líder na fabricação de veículos para apoio nas operações de abastecimento de aeronaves. Está localizada em São Bernardo do Campo – SP (sede), região do Grande ABC, denominada Unidade 2, nesta unidade está localizada a parte administrativa, de engenharia e de processo, e a fábrica de montagem de veículos, objeto deste estudo, conforme figura 8.

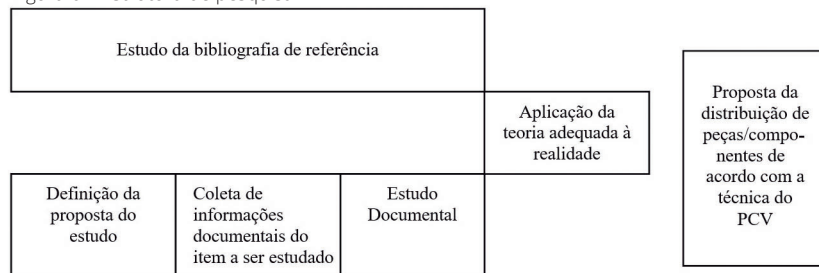
Na região tem-se um grande polo industrial do ramo automobilístico, empresas como General Motors do Brasil (GM), Mercedes Benz do Brasil (MBB), Ford, Scania, Volkswagen estão localados nesta região.

Figura 8 – Imagem da planta de montagem de componentes em SBC



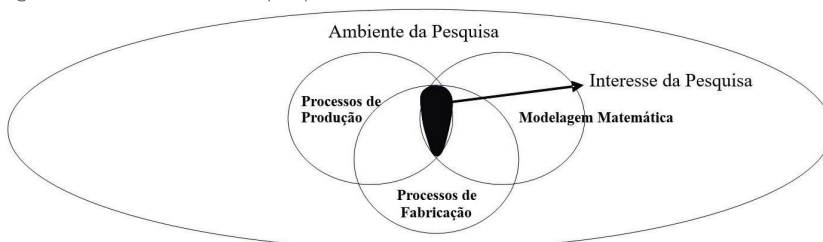
Fonte: (LAVRITA, 2016)

Figura 6 – Estrutura de pesquisa



Fonte: Do autor

Figura 7 – Área de interesse da pesquisa



Fonte: Do autor

Esta empresa, assim como as outras citadas possuem linhas de montagem industriais específicas a produção de veículos automotores.

Em Mauá, uma cidade vizinha a SBC e pertencente ao Grande ABC, tem-se localizado a Unidade 1, que possui toda

a linha de processo de produção de caldeiraria (corte/soldagem/pintura), conforme figura 9. Esta unidade não será avaliada no projeto, focaremos a unidade 2 apenas que é a unidade de montagem.

A empresa tem em sua unidade 2, uma capacidade de montagem física de 15 células, sendo que a média de montagem de cada veículo é em torno de 30 dias/veículo. Assim tem-se uma capacidade de montagem de aproximadamente 180 veículos por ano. Pelo fato dos veículos serem especiais, esta oferta de produção de veículos atende satisfatoriamente a demanda da produção no Brasil para os próximos 5 anos.

Há uma grande motivação da empresa em exportar produtos montados, portanto este trabalho irá contribuir com a visão da empresa que é aumentar a venda no número de produtos para os próximos anos. Uma necessidade de adequação da linha de montagem desta empresa será necessária para que com estas 15 células seja possível aumentar o número de produtos/mês que atualmente a mesma possui.

Figura 9 – Imagem da planta de caldeiraria de componentes em Mauá



Fonte: (LAVRITA, 2016)

### 3.2 Caracterização do problema (Processo da produção de veículos)

A empresa possui um almoxarifado central para distribuir as peças/componentes para as linhas de montagem. Pelo fato dos produtos serem especiais, e não exigirem uma produção de alta capacidade, é definido a montagem em célula fixa. Para um determinado equipamento temos aproximadamente a seguinte montagem:

- i. Montagem do chassi Scania/Mercedes Benz, Volkswagen/MAN etc.
- ii. Montagem do sobre chassi da superestrutura.
- iii. Montagem do sistema hidráulico (bomba/motores/mangueiras).
- iv. Montagem dos reservatórios de água etc.
- v. Montagem do sistema elétrico.
- vi. Montagem dos componentes gerais (parafusos, válvulas etc.)

Para que ocorra a montagem destes componentes conforme sequência acima, existem equipes definidas de montagem conforme segue:

- Equipe de mecânicos para posicionamento de sobre chassi e reservatórios.
- Equipe de mecânicos para montagem do sistema hidráulico.
- Equipes de elétricos para montagem elétrica.
- Etc.

O problema ocorre quando uma equipe precisa se deslocar ao almoxarifado para procurar alguma peça que pode ser um simples parafuso para fixar o sobre chassi, etc.

O problema poderia ser solucionado caso em períodos do trabalho durante dia o almoxarifado pudesse alimentar as 15 células de montagem devido a distância em que cada célula a compõe. Considera-se que o tempo de distribuição utilizado atualmente pela empresa não é o mais eficiente e poderia ser melhorado.

### 3.3 Layout da célula de montagem

Um layout dentro de uma empresa é bem planejado e distribuído para que ocorra a melhor logística de materiais.

Segundo Houaiss (2001), a palavra layout vem do inglês, em alguns casos traduzidos para "leiaute" que significa o modo de distribuição de elementos num determinado espaço. Nas empresas, segue os mais modernos requisitos de ergonomia. Pode-se também definir layout como a concepção ou projeto delineado em seus traços gerais, visando sua exposição.

De acordo com Gaither e Frazier (2001), verifica-se que: Planejar o layout da instalação significa planejar a localização de todas as máquinas, utilidades, estações de trabalho, áreas de atendimento ao cliente, áreas de armazenamento de materiais, corredores, banheiros, refeitórios, bebedouros, divisórias internas, escritórios e salas de computador, e ainda, os padrões de fluxo de materiais e de pessoas que circulam nos prédios.

Os arranjos físicos podem ser propostos de acordo com Lorini (1993) em três sistemas básicos encontrados nas instalações industriais que são: arranjos em linha, funcional e de grupo. O arranjo em linha consiste em ordenar uma sequência de processos determinados ao tipo do produto por meio de uma forma sequencial dentro de uma linha de produção. O layout funcional, que é um dos mais antigos e comuns encontrados na maioria das instalações industriais é caracterizado pela disposição das máquinas em blocos, ou seja, há uma especialização por processo. O layout de grupo (celular) é caracterizado por reunir equipamentos a fim de constituírem células de produção destinadas a atender inteiramente a produção.

Na empresa em estudo temos o layout de grupo (celular), pois são definidos em função das equipes que a percorrem a linha de produção para montar os equipamentos, afim de atenderem a produção. O layout do processo produtivo é apresentado na figura 10.

Figura 10 – (a) Almoxarifado central. (b) Células 1 a 12. (c) Células 13, 14 e 15



Assim, foi possível por meio da planta baixa da figura 11, verificar todo o percurso que a paleteira pode fazer para distribuir os componentes nas células.

Observa-se aqui que não há na empresa uma estrutura clara de como o percurso deve ser feito entre as células. São 15 células em posições distintas, e há uma grande perda no tempo de montagem dos equipamentos pelo fato de faltar peças nas células.

Por análise experimental de observação e prática, verifica-se que o caminho que a paleteira faz, levando e voltando várias vezes peças do almoxarifado até as células durante o dia, percorrem um grande caminho, que expresso em números acredita-se ser em torno de 500 metros.

### 3.4 Resolução dos problemas por meio do solver do Excel

Utilizou-se o *solver* do MS Excel para os cálculos de otimização para a resolução do PCV da empresa caso. Este *software* é uma ferramenta simples e prática de ser utilizada para a resolução deste tipo de problema.

No MS Excel temos um *solver* que resolve problemas lineares e não-lineares. Este *solver* foi

desenvolvido para auxiliar os programadores devido a facilidade de inserção do modelo matemático, que representa o modelo em questão, pois o MS Excel é um programa robusto e amplamente utilizado na resolução de problemas de engenharia, Lachtermacher (2004).

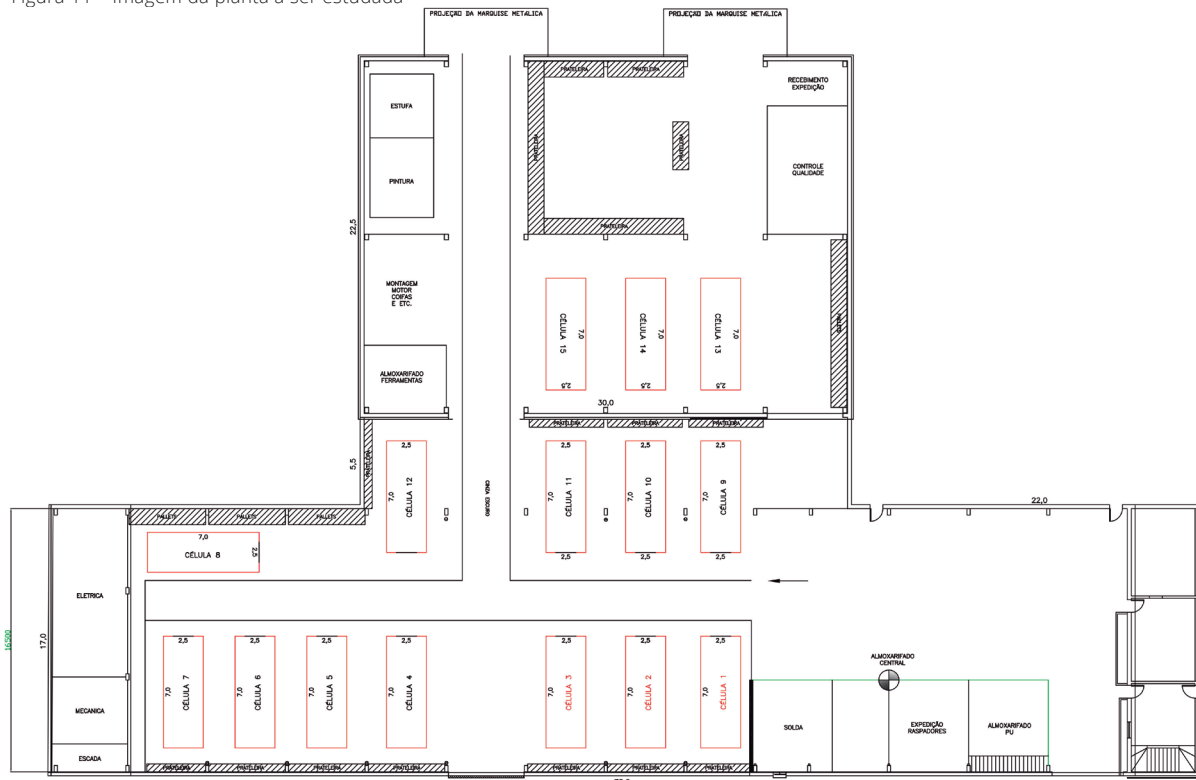
Segundo Taufer (2009), tanto a função objetivo, como as restrições, podem ser lineares ou não lineares, já as variáveis de decisão podem ser contínuas e discretas, e os parâmetros podem ser determinísticos ou probabilísticos.

Otimização linear baseia-se em encontrar uma solução ótima, em que a função objetivo e as restrições são apresentadas por funções lineares, já otimização não-linear é aquela em que a função objetivo ou as restrições do problema são funções lineares.

No *solver* do MS Excel encontramos alguns métodos de solução, que podem ser descritos como:

- Gradiente Reduzido Generalizado (GRG2) Não Linear: Usa-se para problemas simples suaves e não lineares.

Figura 11 – Imagem da planta a ser estudada



Fonte: Do autor



- LP Simplex: Usa-se para problemas lineares.
- Evolucionário: Usa-se para problemas complexos e não suaves.

De acordo com Frontline (2016), o código GRG2 foi desenvolvido por Leon Lasdon da Universidade de Austin e Texas, e Alan Waren da Universidade do estado de Cleveland e melhorada pela Frontline Systems Inc. Sacoman (2012) descreve todo o histórico do método que foi apresentado por Rosen em 1960 em que consistia o Método do Gradiente Projetado. Este autor também descreve a citação de outros pesquisadores, inclusive por Carpentier e Abadie (1966) que melhoraram o método anteriormente feito por Rosen (1960) e que ficou conhecido como GRG.

Já o método LP Simplex (DANTZIG 1951) para programação linear, usa o Simplex e o Simplex duplo com limite sobre as variáveis, e problemas com restrições de integridade adotando o método de limite e derivadas implementado por Joh Watson e Daniel Fylstra da Frontline Systems Inc. Segundo estudos, os dois utilizaram os tipos de abordagem de otimização provindo da programação Linear, formulada para o uso de funções lineares, que foi denominado por Dantzig (1951) como método simplex, permitindo assim a solução de problemas de programação linear com maior eficiência.

O Método evolucionário para otimização complexa, utiliza uma variedade de algoritmos genéticos e métodos de procura local, e foi implementado por vários indivíduos da Frontline Systems Inc.

Segundo Casarini (2013), o método evolutivo simula o processo de seleção natural e evolução das espécies. Um dos mais importantes tipos de método dentro do grupo evolutivo é o método por algoritmos genéticos. Como o método é probabilístico e não determinístico, ele utiliza a função objetivo no ponto de interesse, sem se importar com as derivadas, assim o custo computacional é maior comparado com os métodos diretos, no entanto por ser probabilístico tem resultados mais rápidos de acordo com o problema a ser otimizado. No algoritmo genético temos como o mais importante, a evolução de uma população de indivíduos, que são os candidatos a solução do problema, assim no fim do processo a população é adaptada as restrições em que algum indivíduo seja o ponto ótimo.

Como o problema que foi resolvido tratava-se de movimentações entre possível cidades, denominadas na aplicação como células de trabalho, e estas células tem posição física que não são alteradas, porém considerando-se pela teoria do PCV que é um problema NP-Difícil entende-se que a otimização pode ser resolvida com a otimização do tipo não-linear e com restrições por meio de uma função objetivo.

Temos algumas etapas no algoritmo genético, a primeira é a criação da população de soluções

aleatórias, assim cada indivíduo tem uma resposta e este é seu código genético. Após isto temos o cálculo da função objetivo para cada um dos resultados da população. Em seguida temos a imitação da seleção natural das espécies, assim alguns dos indivíduos são escolhidos e forma-se a população de geração seguinte, e no processo há uma preferência para a população que tem melhor pontuação, e recombinao códigos tem ainda uma melhor pontuação, tentando chegar a soluções próximas de ótimas. Ainda segundo Casarini (2013), o método é definido da seguinte maneira:

$F=f(g_1, \dots, g_n)$ , em que  $F$  é uma função arbitrária de ponderação entre as  $n$  funções objetivos  $g_i, i=1:n$ .

E teremos um loop das seguintes etapas:

- $X = (X_1, \dots, X_n)$ , onde  $X$  é o vetor resposta com  $n$  parâmetros.
- $X_i$  a  $X_p$  são criadas aleatoriamente dentro dos intervalos aceitáveis para cada parâmetro.
- $F_1$  a  $F_p$  são calculados e  $q$  soluções são selecionadas, priorizando as melhores.
- São criados os indivíduos da geração seguinte utilizando os valores dos parâmetros das soluções selecionadas, sendo que algumas destas poderiam ser mantidas na geração seguinte formando o novo vetor  $X$ .
- Repetir o loop até atingir  $r$  iterações ou obter a convergência pelo método de parada.

Segundo Rojas (2013), o *solver* é um suplemento (add in) do MS Excel, sendo fornecido junto com o pacote Office e é pouco conhecido dos usuários de Pesquisa Operacional, no entanto, apresenta boa performance na solução dos problemas sem acréscimo de custos. Para resolver o PCV, encontrando uma melhor roteirização, que sai de uma única origem (no caso o almoxarifado), passa pelas células (C1 a C15) e retorna para a origem (ver figura 10), inserimos o grafo com a distância entre as células de montagem e o almoxarifado, ver tabela 1.

Tabela 1 – Distância entre as células e o almoxarifado. Unidade: metros (m)

|     | ALM  | C1   | C2   | C3   | C4   | C5   | C6   | C7   | C8   | C9   | C10  | C11  | C12  | C13  | C14  | C15  |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ALM | 0    | 13,6 | 17,2 | 22   | 31,8 | 36,7 | 41,3 | 45,7 | 41   | 13,6 | 17,2 | 22   | 31,8 | 33,2 | 37,8 | 42,8 |
| C1  | 13,6 | 0    | 4,7  | 9,7  | 19,7 | 24,7 | 29,2 | 33,7 | 29,1 | 5,3  | 7,1  | 9,7  | 20,4 | 30,6 | 35,2 | 40,2 |
| C2  | 17,2 | 4,7  | 0    | 5    | 15   | 20   | 24,5 | 29   | 24,8 | 7    | 5,3  | 7,3  | 15,9 | 30,9 | 35,5 | 40,5 |
| C3  | 22   | 9,7  | 5    | 0    | 10   | 15   | 19,5 | 24   | 19,3 | 11   | 7,3  | 5,3  | 11,3 | 41,1 | 36,4 | 31,5 |
| C4  | 31,8 | 19,7 | 15   | 10   | 0    | 5    | 9,5  | 14   | 10,6 | 20,4 | 15   | 11,3 | 5,3  | 41,1 | 36,4 | 31,5 |
| C5  | 36,7 | 24,7 | 20   | 15   | 5    | 0    | 4,5  | 9    | 6,7  | 25,3 | 20,7 | 15,9 | 7,3  | 45,6 | 40,9 | 35,9 |
| C6  | 41,3 | 29,2 | 24,5 | 19,5 | 9,5  | 4,5  | 0    | 4,5  | 5,3  | 29,7 | 25   | 20,1 | 10,9 | 49,9 | 45,2 | 40,2 |
| C7  | 45,7 | 33,7 | 29   | 24   | 14   | 9    | 4,5  | 0    | 7    | 34,1 | 29,5 | 24,6 | 15   | 54,3 | 49,6 | 44,7 |
| C8  | 41   | 29   | 24,8 | 19,3 | 10,6 | 6,7  | 5,3  | 7    | 0    | 29   | 24,3 | 19,3 | 9,3  | 48   | 43,2 | 38,3 |
| C9  | 13,6 | 5,3  | 7    | 11   | 20,4 | 25,3 | 29,7 | 34,1 | 29   | 0    | 4,7  | 9,7  | 19,7 | 26,9 | 31,5 | 36,5 |
| C10 | 17,2 | 7,1  | 5,3  | 7,3  | 15   | 20,7 | 25   | 29,5 | 24,3 | 4,7  | 0    | 5    | 15   | 31,6 | 36,2 | 41,2 |
| C11 | 22   | 9,7  | 7,3  | 5,3  | 11,3 | 15,9 | 20,1 | 24,6 | 19,3 | 9,7  | 5    | 0    | 10   | 38,4 | 33,6 | 28,7 |
| C12 | 31,8 | 20,4 | 15,9 | 11,3 | 5,3  | 7,3  | 10,9 | 15   | 9,3  | 19,7 | 15   | 10   | 0    | 38,4 | 33,6 | 28,7 |
| C13 | 33,2 | 30,6 | 30,9 | 41,1 | 41,1 | 45,6 | 49,9 | 54,3 | 48   | 26,9 | 31,6 | 38,4 | 38,4 | 0    | 4,7  | 9,7  |
| C14 | 37,8 | 35,2 | 35,5 | 36,4 | 36,4 | 40,9 | 45,2 | 49,6 | 43,2 | 31,5 | 36,2 | 33,6 | 33,6 | 4,7  | 0    | 5    |
| C15 | 42,8 | 40,2 | 40,5 | 31,5 | 31,5 | 35,9 | 40,2 | 44,7 | 38,3 | 36,5 | 41,2 | 28,7 | 28,7 | 9,7  | 5    | 0    |

Fonte: do autor.



De acordo com este grafo verificamos todas as 15 células e a posição do almoxarifado entre elas. Para chegar nestas distâncias foi traçado linhas entre as células simulando a posição que a paleteira poderá ter para distribuir as peças nas células. As linhas constituem um grafo de possibilidades de deslocamentos, ver figura 12.

Figura 12 – Representação gráfica do grafo de distâncias



Fonte: do autor

Figura 13 – Função índice da matriz de distâncias. Unidade metros (m)

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a resolução do PCV e em função da matriz de distâncias, primeiramente encontramos a soma das distâncias para um caminho real. Desejou-se que a paleteira saísse do almoxarifado, passasse por todas as células e voltasse ao almoxarifado, conforme figura 13.

Para resolver o problema utilizamos a função ÍNDICE do MS Excel, que retorna um valor ou a referência a um valor de dentro de uma tabela ou intervalo.

A função índice seleciona um caminho qualquer e retira da matriz valores aleatórios. Na nossa tabela encontramos a seguinte sequência que a função índice selecionou:

ALM - C1 - C2 - C3 - C4 - C5 - C6 - C7 - C8 - C9 - C10 - C11 - C12 - C13 - C14 - C15

3    X    fx    =ÍNDICE(\$C\$4:\$R\$19;C22;D22)

|     | ALM | C1   | C2   | C3   | C4   | C5   | C6   | C7   | C8   | C9   | C10  | C11  | C12  | C13  | C14  | C15  |      |
|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ALM | 1   | 0    | 13,6 | 17,2 | 22   | 31,8 | 36,7 | 41,3 | 45,7 | 41   | 13,6 | 17,2 | 22   | 31,8 | 33,2 | 37,8 | 42,8 |
| C1  | 2   | 13,6 | 0    | 4,7  | 9,7  | 19,7 | 24,7 | 29,2 | 33,7 | 29,1 | 5,3  | 7,1  | 9,7  | 20,4 | 30,6 | 35,2 | 40,2 |
| C2  | 3   | 17,2 | 4,7  | 0    | 5    | 15   | 20   | 24,5 | 29   | 24,8 | 7    | 5,3  | 7,3  | 15,9 | 30,9 | 35,5 | 40,5 |
| C3  | 4   | 22   | 9,7  | 5    | 0    | 10   | 15   | 19,5 | 24   | 19,3 | 11   | 7,3  | 5,3  | 11,3 | 41,1 | 36,4 | 31,5 |
| C4  | 5   | 31,8 | 19,7 | 15   | 10   | 0    | 5    | 9,5  | 14   | 10,6 | 20,4 | 15   | 11,3 | 5,3  | 41,1 | 36,4 | 31,5 |
| C5  | 6   | 36,7 | 24,7 | 20   | 15   | 5    | 0    | 4,5  | 9    | 6,7  | 25,3 | 20,7 | 15,9 | 7,3  | 45,6 | 40,9 | 35,9 |
| C6  | 7   | 41,3 | 29,2 | 24,5 | 19,5 | 9,5  | 4,5  | 0    | 4,5  | 5,3  | 29,7 | 25   | 20,1 | 10,9 | 49,9 | 45,2 | 40,2 |
| C7  | 8   | 45,7 | 33,7 | 29   | 24   | 14   | 9    | 4,5  | 0    | 7    | 34,1 | 29,5 | 24,6 | 15   | 54,3 | 49,6 | 44,7 |
| C8  | 9   | 41   | 29   | 24,8 | 19,3 | 10,6 | 6,7  | 5,3  | 7    | 0    | 29   | 24,3 | 19,3 | 9,3  | 48   | 43,2 | 38,3 |
| C9  | 10  | 13,6 | 5,3  | 7    | 11   | 20,4 | 25,3 | 29,7 | 34,1 | 29   | 0    | 4,7  | 9,7  | 19,7 | 26,9 | 31,5 | 36,5 |
| C10 | 11  | 17,2 | 7,1  | 5,3  | 7,3  | 15   | 20,7 | 25   | 29,5 | 24,3 | 4,7  | 0    | 5    | 15   | 31,6 | 36,2 | 41,2 |
| C11 | 12  | 22   | 9,7  | 7,3  | 5,3  | 11,3 | 15,9 | 20,1 | 24,6 | 19,3 | 9,7  | 5    | 0    | 10   | 38,4 | 33,6 | 28,7 |
| C12 | 13  | 31,8 | 20,4 | 15,9 | 11,3 | 5,3  | 7,3  | 10,9 | 15   | 9,3  | 19,7 | 15   | 10   | 0    | 38,4 | 33,6 | 28,7 |
| C13 | 14  | 33,2 | 30,6 | 30,9 | 41,1 | 41,1 | 45,6 | 49,9 | 54,3 | 48   | 26,9 | 31,6 | 38,4 | 38,4 | 0    | 4,7  | 9,7  |
| C14 | 15  | 37,8 | 35,2 | 35,5 | 36,4 | 36,4 | 40,9 | 45,2 | 49,6 | 43,2 | 31,5 | 36,2 | 33,6 | 33,6 | 4,7  | 0    | 5    |
| C15 | 16  | 42,8 | 40,2 | 40,5 | 31,5 | 31,5 | 35,9 | 40,2 | 44,7 | 38,3 | 36,5 | 41,2 | 28,7 | 28,7 | 9,7  | 5    | 0    |

| ALM  | C1  | C2 | C3 | C4 | C5  | C6  | C7 | C8 | C9  | C10 | C11 | C12  | C13 | C14 | ALM  |
|------|-----|----|----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|
| 1    | 2   | 3  | 4  | 5  | 6   | 7   | 8  | 9  | 10  | 11  | 12  | 13   | 14  | 15  | 1    |
| 13,6 | 4,7 | 5  | 10 | 5  | 4,5 | 4,5 | 7  | 29 | 4,7 | 5   | 10  | 38,4 | 4,7 | 5   | 42,8 |

FO 194

Fonte: do autor

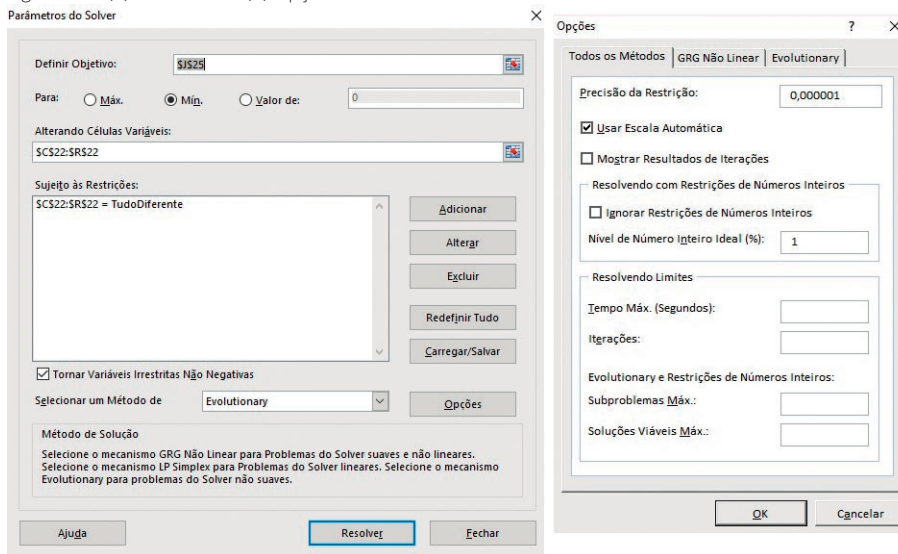
A partir disto, utilizou-se a função SOMA do MS Excel, para somar todos os índices sequenciais calculados e encontrar o número daquele determinado caminho, que encontrou a distância, conforme segue. Resultado encontrado: 194 metros.

Relata-se que foi apenas um caminho aleatório que o programa inicialmente apresentou, mas ainda não se trata de uma solução ótima.

No entanto, com o auxílio do *solver*, conseguimos definir o objetivo que é minimizar a função para achar o melhor caminho para o menor custo de transporte.

Na figura 14 observa-se a tela do *solver*, e as definições da célula da função objetivo, das restrições, e das variáveis a serem alteradas, que são os parâmetros do *solver*, e também as opções.

Figura 14 – (a) Parâmetros. (b) Opções do *solver*



Fonte: do autor

Configurou-se por meio das opções do *solver*, os dados em que utilizamos a escala automática, definindo-se a precisão da restrição e limitando-se a porcentagem do nível de número inteiro ideal.

Na própria célula da soma dos índices que tem a posição J25 que é a posição no MS Excel entre as linhas e colunas, encontra-se os novos resultados, pois o objetivo é minimizar o número aleatório encontrado de 192 metros ao menor caminho. As células variáveis são as próprias células, que vão desde o Almoarifado (ALM) até a Célula 15 (C15) e retornam ao ALM. São estas células que queremos "calcular" para encontrar o melhor caminho, e como restrição, dizemos que queremos encontrar um valor das variáveis da matriz (posição C22:R22) que não seja a mesma encontrada, no caso 192 metros, por meio da sequência das células já mencionadas.

Assim, após isto foi executado o *solver* com os 3 métodos de otimização existentes no MS Excel. A seguir observa-se os resultados encontrados em cada um dos métodos.

1 - Pelo método GRG Não Linear: problema rodou vários minutos e não convergiu, provavelmente entrou em um ciclo pré-hamiltoniano.

2 - No método LP Simplex o problema não convergiu, deu algum tipo de erro não evidenciado.

3 - Já no Método Evolucionário, o método convergiu e apresentou o valor de 118 metros, que foi uma redução bem significativa comparado com a medida inicial que era de 194 metros. Sendo assim, observa-se por meio das tabelas 3 e 4 os resultados encontrados:

Resultado encontrado: 118 metros.

Este resultado foi produto do uso máximo de iterações. É válido enfatizar que o resultado encontrado pode não ser considerado uma solução ótima pelo fato do método evolucionário ser discreto em relação as suas

funções e probabilístico, portanto apresentando uma não linearidade devido à complexidade matemática, assim, por ele ter estas características acaba ficando com uma resolução mais simplificada em relação a outros métodos como o Simplex por exemplo que é essencialmente linear. É apresentado bons resultados em termos de redução e viabilidade do projeto.

Além disso, a nova sequência abaixo otimizada das etapas de movimentação da paleta foi demonstrada de acordo com a tabela 4.

ALM - C13 - C14 - C15 - C12 - C8 - C7 - C6 - C5 - C4 - C3 - C11 - C10 - C2 - C1 - C9 - ALM

Tabela 2 – Resultados do *solver*

| Problema                   | Método        | Percurso (m) |
|----------------------------|---------------|--------------|
| Inicial (atual empresa)    | Empírico      | 500          |
| Aleatório                  | SomarProduto  | 194          |
| Com solução probabilística | Evolucionário | 118          |

Fonte: do autor.

Tabela 3 – Resultados do *solver*

| Problema       | Convergência no método adotado |
|----------------|--------------------------------|
| GRG Não Linear | Não                            |
| LP Simplex     | Não                            |
| Evolucionário  | Sim                            |

Fonte: do autor.

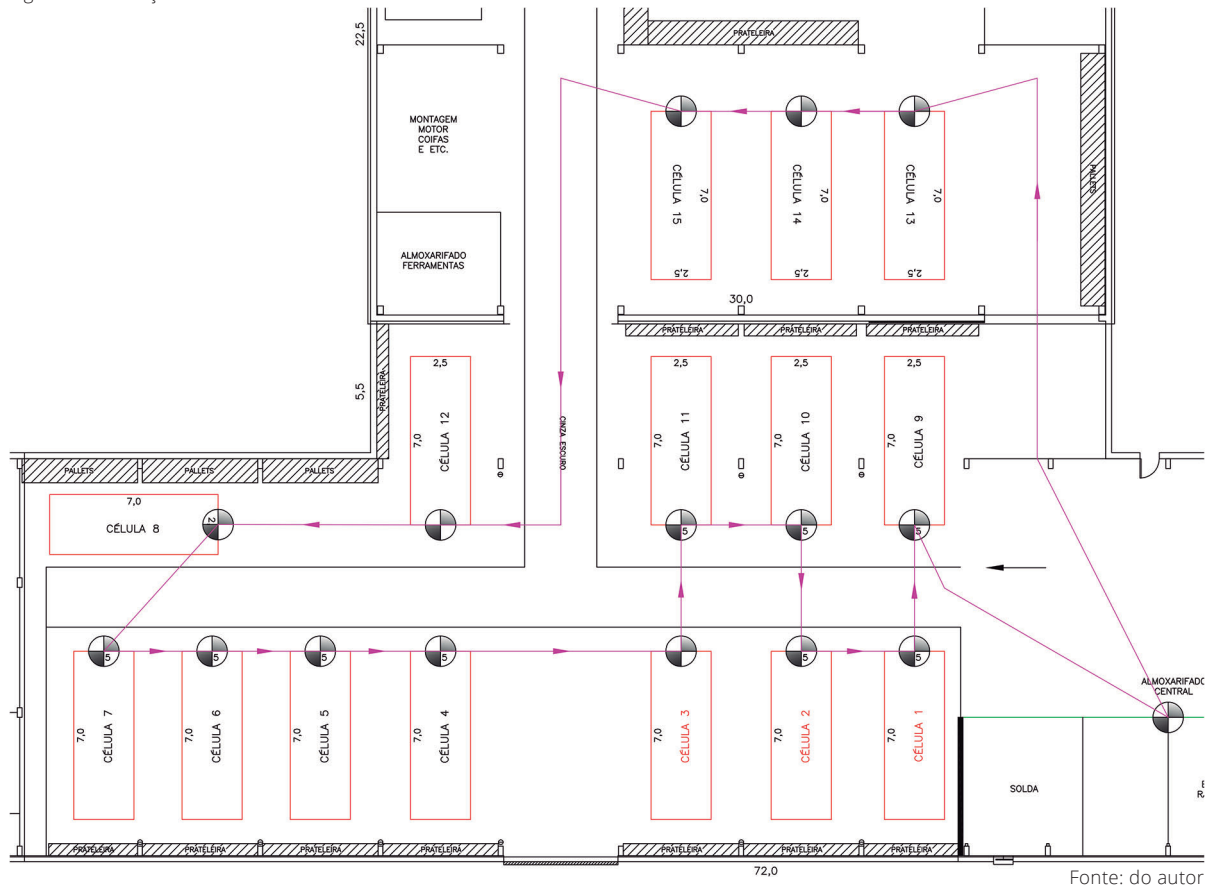
Tabela 4 – Melhor distribuição do PCV para o estudo

| Nº Células    | C13 | C14 | C15 | C12 | C8 | C7  | C6  | C5 | C4 | C3  | C11 | C10 | C2  | C1  | C9   | ALM | ALM |
|---------------|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|
| Distância (m) | 4,7 | 5   | 29  | 9,3 | 7  | 4,5 | 4,5 | 5  | 10 | 5,3 | 5   | 5,3 | 4,7 | 5,3 | 13,6 | 0   | 0   |

FO 118 metros

Fonte: do autor

Figura 15 – Solução ótima do caminho



Fonte: do autor

método matemático utilizado com base no PCV e através do solver do MS Excel é bem utilizado para este fim.

Esta sequência é desenhada na planta da fábrica e apresenta a solução mais próxima de ótima do percurso da paleteira, conforme demonstrado na figura 15.

## 6 CONCLUSÃO

Encontrou-se uma redução de **39 %** em relação a distâncias originalmente apresentadas resultando em uma solução ótima de **118 metros**.

Verificou-se, portanto, que o PCV é uma ferramenta de alta eficácia em várias aplicações, não somente na logística de caminhões ao longo de estradas, mas também pode ser aplicada dentro de uma empresa como demonstramos. Ela é útil pois está localizada na classe de problemas denominados *NP-Difícil* que são os problemas que envolvem cálculos complexos.

A leitura deste trabalho demonstra o quanto a modelagem matemática é importante, e é possível redefinir todo o layout de uma empresa visando a redução de custos, se o PCV determinar um melhor caminho para a paleteira e locomoção das peças como foi o caso.

Para problemas futuros sugere-se verificar o PCV por dois caminhos, que poderia ser definido pelo uso de distribuição de duas paleteiras ao invés de somente uma. Sugere-se também trabalhar matematicamente o método Evolucionário no sentido de procurar minimizar o número de permutações para o PCV, para que tenhamos uma redução do custo computacional para minimizar o tempo do processo de iterações para este problema.

## REFERÊNCIAS

ANDREOLLA, L.; KRIPKA, R. M. L. Otimização de roteiros para o setor de vigilância da universidade de passo fundo. **Revista CIATEC-UPF**, v.2, n.2, p. 46-61, 2011. Disponível em: < <http://seer.upf.br/index.php/ciatec/article/download/1892/1204> >. Acesso em: 8 dez. 2017.

CARVALHO, M. A. M. **Apresentação das aulas BCC204 – Teoria dos Grafos**. Universidade de Ouro Preto – MG, 2016. Disponível em: < [http://www.decom.ufop.br/marco/site\\_media/uploads/bcc204/17\\_aula\\_17.pdf](http://www.decom.ufop.br/marco/site_media/uploads/bcc204/17_aula_17.pdf) >. Acesso em: 8 dez. 2017.

CASARINI, F. **Método de Otimização Evolutivo – Algoritmo Genético**. Campinas – SP, 2013. Disponível em: < <http://dprengenharia.com/metodo-de-otimizacao-evolutivo-algoritmo-genetico/> >. Acesso em: 8 dez. 2017.

DANTZIG, G. B. **Maximization of a linear function of variables subject to linear inequalities, in activity analysis of production and allocation**. Wiley, 1951.

FEOFILOFF, P.; KOHAYAKAWA, Y.; WAKABAYASHI, Y. **Uma introdução sucinta à teoria dos grafos**. 2011. Disponível em: < <https://www.ime.usp.br/~pf/teoriadosgrafos/> >. Acesso em: 8 dez. 2017.

FRONTLINE. **Excel Solver – Algorithms and methods used**. NV – EUA, 2016. Disponível em: < <https://www.solver.com/excel-solver-algorithms-and-methods-used> >. Acesso em: 8 dez. 2017.

GAITHER, N.; FRAZIER, G. **Administração da produção e operações**. SP. Editora Pioneira Thomson Learning, 2001.



GODEL, K. **The Godel Letter**. Princeton, 1956. Disponível em: < <https://rjlipton.wordpress.com/the-gdel-letter/> >. Acesso em: 8 dez. 2017.

GODOY, A. S. Pesquisa qualitativa: tipos fundamentais. **Revista de Administração de empresas**, SciELO Brasil, v. 35, n. 3, p. 20-29, 1995.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear**: modelos e algoritmos. Rio de Janeiro. Elsevier, 2005.

HAMMER, M.; CHAMPY, J. **Reingenieria**. Bogotá: Editorial Norma, 1994.

HOUAISS, A. **Dicionário eletrônico Houaiss da língua portuguesa**. Rio de Janeiro. Ed. Objetiva, 2001.

LACHTERMACHER G. **Pesquisa operacional na tomada de decisões**: modelagem em Excel. Rio de Janeiro. Elsevier, 2004.

LAVRITA. SBC, 2016. Disponível em: < <http://www.lavrita.com.br/equipamentos/combate-a-incendio-aeroporto.html> >. Acesso em: 8 dez. 2017.

LORINI, F.J. **Tecnologia de grupo e organização da manufatura**. Florianópolis. Universidade Federal de Santa Catarina, 1993.

MATSUSHIGUE, C. A. H. **Notas de aula de conceitos básicos de grafos**. Brasília, 2010. Disponível em: < <http://www.mat.unb.br/clusahm/area/Grafo-08.1d/Grafo-08.1d-L3-Text.pdf> >. Acesso em: 8 dez. 2017.

ROJAS, A. Resolvendo problemas de programação linear com o ms solver. **Cadernos do IME – Série Informática**, v.13, p. 69-76, 2013.

SACOMAN, M. A. R. **Otimização de projetos utilizando GRG, Solver e Excel**. Belem-PA, 2012. Disponível em: < <http://198.136.59.239/~abengeorg/CobengeAnteriores/2012/artigos/103911.pdf> >. Acesso em: 8 dez. 2017.

SCANIA. **Informações sobre chassis e designações de modelo – Scania Bodybuilder**. Bodybuilding information, 2016. Disponível em: < [https://til.scania.com/w/bwm\\_0000027\\_16](https://til.scania.com/w/bwm_0000027_16) >. Acesso em: 8 dez. 2017.

TAUFER, F. S. G. **Otimização de problemas com o uso da modelagem matemática do problema do caixeiro viajante**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) – Universidade de passo Fundo, 2009.