

ACADEMIA DA FORÇA AÉREA
DIVISÃO DE ENSINO

JHANMICHEL SILVA CÂNDIDO GOMIDES

**Otimização de fluxo de materiais em armazéns sob a perspectiva da
Pesquisa Operacional**

Pirassununga
2018

ACADEMIA DA FORÇA AÉREA
DIVISÃO DE ENSINO

JHANMICHEL SILVA CÂNDIDO GOMIDES

**Otimização de Fluxo de Materiais em Armazéns sob a Perspectiva da
Pesquisa Operacional**

Trabalho Monográfico apresentado no curso
de Formação de Oficiais Intendentes da
Academia da Força Aérea – AFA
Orientadora: Profa. Dra. Renata Belluzzo
Zirondi Mori

Pirassununga
2018

JHANMICHEL SILVA CÂNDIDO GOMIDES

**Otimização de Fluxo de Materiais em Armazéns sob a Perspectiva da
Pesquisa Operacional**

Trabalho Monográfico apresentado no curso
de Formação de Oficiais Intendentes da
Academia da Força Aérea – AFA

Data de aprovação: 29/10/2018.

MEMBROS COMPONENTES DA BANCA EXAMINADORA

Orientador: Profa. Dra. Renata Belluzzo Zironi Mori

Membro Titular: Prof Dr. Paulo César Rioli Duarte de Souza

Membro Titular: Cap Int Raphael Coutinho Stauffer

Local: Divisão de Ensino
Academia da Força Aérea
Pirassununga

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua graça incondicional, nos amando primeiro, quando ainda estávamos mortos em nossas ofensas e pecados, e por ter me dado a oportunidade de ingressar nesta academia.

Aos meus pais, minha irmã e demais familiares, pelo seu incentivo, amor e apoio.

Aos meus amigos, pelo auxílio e por muitas vezes tolerarem minhas falhas e reclamações.

À minha orientadora, por ter acreditado na viabilidade do trabalho, por ter compartilhado de seus conhecimentos e pela constante disponibilidade demonstrada.

E à Força Aérea Brasileira, pelas oportunidades e meios disponibilizados.

“Levantarei os meus olhos para os montes,
de onde vem o meu socorro. O meu socorro
vem do Senhor que fez o céu e a terra.”

Salmos 121:1, 2

RESUMO

A missão da intendência está ligada diretamente à provisão dos recursos necessários ao cumprimento das atividades da Força Aérea. Neste contexto, otimizar a gestão da cadeia logística com o objetivo de garantir a rapidez no envio do suprimento solicitado é fundamental. Dentre os diversos elos da cadeia logística, a armazenagem possui grande destaque, pois promove o alinhamento entre oferta e demanda, diminuindo o tempo de resposta do sistema. Em um armazém, o *layout* e os locais de armazenamento dos itens possuem grande influência no tempo e no esforço gastos com movimentação durante a separação dos pedidos. Assim, otimizar o fluxo de materiais em um armazém implica não somente a redução dos tempos de movimentação e conseqüentemente do tempo de resposta do sistema, mas também a redução dos custos de armazenagem, dos riscos de acidentes de trabalho e de doenças ocupacionais. Diante disso, este trabalho monográfico de curso tem como objetivo principal otimizar o fluxo de materiais em armazéns. Para tanto, foi desenvolvido um modelo matemático de otimização linear inteira que permitiu definir os locais de armazenagem de forma a minimizar os esforços de movimentação dos itens. Para sua implementação, foi utilizado um armazém hipotético simulado com dois diferentes tipos de layout (direcionado e quebrado) e de itens fictícios com características determinadas aleatoriamente em planilha eletrônica. Para otimização dos modelos matemáticos, foi utilizado o *software* Lingo, que encontrou as soluções ótimas indicando as posições de cada item no armazém. A rapidez no processo de simulação e a obtenção de soluções ótimas adequadas para o sistema, faz da Pesquisa Operacional uma importante área de conhecimento dentro do estudo da logística.

Palavras-chave: Armazém. *Layout*. Pesquisa Operacional. Otimização Linear. Lingo.

ABSTRACT

The mission of the Military Area of Logistics is directly linked to the provision of resources necessary to fulfill the activities of the Air Force. In this context, optimizing the logistics chain management with the purpose of guaranteeing the rapid delivery of the requested supply is fundamental. Among the several links in logistic chain, storage has a great importance, as it promotes the alignment between supply and demand, reducing the response time of the system. In a warehouse, the layout and storage locations of the items have a large influence on time and effort spent on handling orders. Thus, optimizing the flow of materials in a warehouse implies not only the reduction of handling times and consequently the system response time, but also the reduction of storage costs, risks of accidents and occupational diseases. In view of this, this final paper has as the main objective to optimize the flow of materials in warehouses. For that, a mathematical model of integer linear optimization was designed, which allowed to define the storage locations in order to minimize the efforts of handling items. For its implementation, a simulated hypothetical warehouse was used with two different layout configurations (flow-through and U-flow) and with fictitious items with characteristics determined randomly in spreadsheet. To optimize the mathematical models, the Lingo software was used, and it found the optimal solutions indicating the positions of each item in the warehouse. The speed in the simulation process and the obtaining of optimal and appropriate solutions for the systems highlight Operations Research as an important area of knowledge within the study of logistics.

Keywords: Warehouse. Layout. Operations Research. Linear Optimization. Lingo.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1.1 - Operações típicas de um armazém.....	21
FIGURA 1.2 - Uso de área de superfície de um armazém por atividades.	21
FIGURA 1.3 - Distribuição do tempo de um operador de <i>picking</i>	21
FIGURA 1.4 - Representação do <i>layout</i> de armazém em fluxo direcionado e em fluxo quebrado.....	23
FIGURA 1.5 - Exemplos de corredores de movimentação.....	25
FIGURA 1.6 - Esquema representativo de uma operação <i>single-cycle</i> e outra <i>dual-cycle</i>	30
FIGURA 1.7 - Método de roteirização em S e de retorno.....	31
FIGURA 2.1 - Divisão em etapas do problema proposto.....	40
FIGURA 2.2 - Modelo da etapa 2 na linguagem Lingo.....	44
FIGURA 2.3 - Modelo da etapa 3 na linguagem Lingo.....	49
FIGURA 3.1 - Vista lateral e frontal de um <i>macroslot</i> e seus <i>slots</i>	52
FIGURA 3.2 - Vista lateral e frontal do armazém.....	53
FIGURA 3.3 - <i>Layouts</i> de fluxo direcionado e quebrado.....	53
FIGURA 3.4a - Esquema de numeração dos <i>slots</i>	54
FIGURA 3.4b - Esquema de numeração dos <i>slots</i> (detalhamento da numeração <i>macroslot</i> 1).....	55
FIGURA 3.5 - Grafo do <i>layout</i> direto e quebrado.....	56
FIGURA 3.6 - Grafo de um <i>macroslot</i> nos <i>layouts</i> direcionado e quebrado.....	57
FIGURA 3.7 - Informações do modelo de alocação das classes nos <i>macroslots</i> quanto a processamento e outras características.....	62
FIGURA 3.8 - Posicionamento das famílias nos <i>macroslots</i> do armazém	62
FIGURA 3.9 - Informações do modelo de alocação dos itens nos <i>slots</i> quanto a processamento e outras características no fluxo direcionado....	64
FIGURA 3.10 - Localização dos itens nos <i>slots</i> do armazém.....	66
FIGURA 3.11 - Informações do modelo de alocação dos itens nos <i>slots</i> quanto a processamento e outras características no fluxo direcionado....	65
FIGURA 3.12 - Localização dos itens nos <i>slots</i> do armazém.....	68

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 - Tabela comparativa das vantagens dos modelos de <i>layout</i> quebrado e direcionado.....	24
TABELA 1.2 - Fatores considerados pela literatura para um SLAP.....	26
TABELA 1.3 - Fatores considerados por diferentes autores.....	27

LISTA DE QUADROS

QUADRO 3.1 - Distância de cada <i>macroslot</i> ao ponto de recebimento (R) e expedição (E).....	57
QUADRO 3.2 - Informações utilizadas na simulação.....	59
QUADRO 3.3 - Classificação ABC.....	61
QUADRO 3.4 - Solução do problema de alocação das famílias nos <i>macroslots</i>	63
QUADRO 4 - Distâncias de cada posição aos pontos de recebimento (R) e expedição (E).....	79

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
1. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE ARMAZENAGEM	15
1.1. Os Armazéns e o Processo de Armazenagem	17
1.1.1. O <i>layout</i> dos armazéns e a movimentação de materiais.....	22
1.1.2. Problemas de Atribuição de Locais de Armazenagem, Políticas de armazenagem e Classificação ABC	25
1.1.3. Roteirização, as atividades de separação e as distâncias percorridas: um problema de pesquisa operacional.....	30
1.2. Modelos de designação e o problema do caixeiro viajante (PCV)	37
2. DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO	40
2.1. O modelo matemático	41
2.1.1. Modelo de alocação das classes em <i>macroslots</i> (etapa 2)..	41
2.1.2. O modelo de atribuição dos itens nos <i>slots</i> (etapa 3).....	44
3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO REALIZADA	51
3.1. O armazém simulado	51
3.2. Os dados utilizados na simulação	55
3.3. A classificação dos itens	60
3.4. Otimização da alocação das classes nos <i>macroslots</i>	62
3.5. Otimização da determinação dos locais de armazenagem dos itens nos <i>macroslots</i>	64
3.5.1. Determinação dos locais de armazenagem no <i>layout</i> de fluxo direcionado.....	64
3.5.2. Determinação dos locais de armazenagem no <i>layout</i> de fluxo quebrado.....	65
3.6. Análise das soluções encontradas	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
ANEXO A – Resposta da solicitação da <i>license key</i> do software Lingo....	78
APÊNDICE A - Distâncias de cada posição aos pontos de recebimento e expedição	79

INTRODUÇÃO

A missão da intendência está diretamente ligada à provisão dos recursos necessários ao cumprimento das atividades da Força Aérea.

Missão de superfície destinada a identificar, prever, obter, estocar, conservar e distribuir todo o material e prestar os serviços necessários à sustentação física do pessoal e à vida vegetativa das Unidades, a fim de contribuir para a plena capacidade operacional da Força. (BRASIL, 2008, p. 10)

Para o cumprimento dessa missão, otimizar a gestão da cadeia logística com vistas a garantir a rapidez no envio do suprimento solicitado é fundamental.

A armazenagem é uma importante etapa na gestão da cadeia logística e engloba o recebimento dos materiais, a estocagem propriamente dita, bem como as atividades de *picking* que consistem na separação dos pedidos.

Sua importância reside no fato de que os armazéns são elementos centrais do processo logístico, o que permite à cadeia logística responder rapidamente às variações de demanda e preço no mercado consumidor (BARTHOLD; HACKMAN, 2014). Isso porque os itens armazenados criam uma margem de segurança (*buffer*) entre oferta e demanda, necessária em virtude da dificuldade em “sincronizar os requisitos precisos para atender à demanda com as imprevisões da oferta” (RUSHTON *et al.*, 2010, p.174).

Assim, de acordo com o exposto, é possível relacionar a eficiência e a eficácia do processo de armazenagem com a própria missão da Intendência.

A eficiência das atividades inerentes ao processo de armazenagem está diretamente relacionada ao *layout* do armazém. Segundo Karásek (2013), a implantação de um *layout* eficiente para a movimentação de materiais pode trazer diversos benefícios para uma organização, tais como a melhoria do fluxo dos materiais pelos corredores de movimentação com redução da distância percorrida, do tempo de separação de pedidos e dos custos associados à atividade de *picking*. Além disso, uma menor movimentação dos materiais reduz o risco de acidentes de trabalho e de doenças ocupacionais.

A literatura descreve várias ferramentas que podem ser utilizadas com esse propósito, dentre elas está a Pesquisa Operacional.

Segundo Shukla *et al.* (2017), a pesquisa operacional faz uso de vários métodos científicos que são combinados com um planejamento razoável para resolver problemas reais de logística e armazenamento.

Pesquisa Operacional (PO) pode ser definida como:

A aplicação de métodos científicos a modelos complexos para auxiliar no processo de tomada de decisões, tais como projetar, planejar e operar sistemas em situações que requerem alocação eficiente de recursos escassos (ARENALES *et al.*, 2015, p. 7).

Ou ainda, como define Churchman (1957, p. 3), um dos pioneiros nesta área, a pesquisa operacional é “a aplicação de métodos, técnicas e ferramentas científicas a problemas que envolvam as operações de um sistema, de modo a fornecer àqueles que o controlam soluções ótimas”

Dentre os métodos de otimização da PO está a Otimização Linear (OL), que utiliza de:

Modelos matemáticos para descrever um problema de interesse. Assim, a programação linear envolve o planejamento de atividades para obter um resultado ótimo, ou seja, um resultado que atinja melhor o objetivo especificado (de acordo com o modelo matemático) entre todas as alternativas viáveis. (HILLIER; LIEBERMAN, 2001, p. 24).

Diante disso, este trabalho monográfico tem por objetivo geral otimizar o fluxo de materiais em armazéns utilizando ferramentas da Pesquisa Operacional, mais especificamente de Otimização Linear.

Para atender aos objetivos pretendidos, foi realizada uma revisão bibliográfica a fim de definir quais os parâmetros importantes a serem considerados na modelagem do esforço de movimentação de itens em um armazém qualquer, bem como quais os modelos clássicos de Pesquisa Operacional que poderiam orientar o desenvolvimento do modelo matemático para este trabalho.

Assim, foi desenvolvido um modelo matemático de programação linear inteira baseado nos modelos clássicos de designação e do caixeiro viajante. Esse modelo teve por finalidade definir os locais de armazenagem de um conjunto de produtos considerando a demanda anual, o peso e o volume do item bem como as distâncias entre os pontos de armazenagem e de recebimento e separação. Foi hipótese que, esses parâmetros sejam suficientes para definir o esforço de movimentação de itens em um armazém.

Em seguida, o modelo foi aplicado para realizar simulações por meio do *software* Lingo 17, cuja licença para pesquisa foi cedida pela empresa proprietária. Estas simulações foram realizadas considerando um armazém com fluxo quebrado e outro com fluxo direcionado ambos com corredores de movimentação tradicionais. A relevância institucional deste trabalho reside em apresentar aos futuros Oficiais Intendentes a Pesquisa Operacional como ferramenta capaz de melhorar a eficiência na gestão dos recursos públicos, na satisfação dos clientes internos e na agilidade e prontidão do atendimento às forças militares.

Sua relevância científica e social consiste no uso de métodos pertencentes à área de PO, mais especificamente à OL, sendo de interesse público e privado que tais estudos se desenvolvam, haja vista o seu variado escopo de aplicações na “indústria, transporte, construção, telecomunicações, planejamento financeiro, saúde, estratégias militares e serviços públicos” (HILLIER; LIEBERMAN, 2001, p. 2).

Para um melhor entendimento, este trabalho está organizado da seguinte forma:

- O capítulo 1 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os assuntos relevantes ao entendimento deste trabalho tais como, as características do *layout* de armazéns e dos métodos de otimização do fluxo de materiais em armazéns que utilizam a pesquisa operacional;
- O capítulo 2 apresenta o modelo de otimização desenvolvido com o objetivo de otimizar o fluxo de materiais em um armazém genérico;
- O capítulo 3 apresenta as simulações realizadas utilizando o modelo matemático desenvolvido e o *software* Lingo versão 17 para um armazém com *layout* de fluxo quebrado e outro de fluxo direcionado;
- Finalmente, as considerações finais estão apresentadas.

1. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE ARMAZENAGEM

O costume de armazenar surgiu quando o ser humano teve a necessidade de acumular mais do que o iminentemente necessário a fim de garantir reservas de comida para os tempos de escassez.

Segundo Houaiss e Villar (2009), a palavra armazém tem sua origem na palavra árabe *al-mahazan*, que significa “botica, celeiro, sótão, entreposto”.

Testart (1982, p. 523) afirma que a atividade de estocagem ajudou nossos ancestrais a “desenvolver-se além dos parâmetros normais de caça e coleta, particularmente no campo sociológico, filosófico e religioso”.

A importância do armazenamento é amplamente reconhecida pelos pré-historiadores, em primeiro lugar como uma característica pré-adaptativa que leva à invenção da agricultura no Oriente Próximo e em segundo lugar como uma prática ligada ao sedentarismo no caso de grupos pré-históricos de coleta de alimentos (...). Reed (1969, p 367) indica que a vida na aldeia implica na existência de um recurso alimentar estabelecido que pode ser reunido em quantidade e armazenado em lugares especiais: ‘As primeiras aldeias simples podem ter crescido em torno desses locais de armazenamento’.

(TESTART, 1982, p. 524)

Descobertas realizadas por Ian Kuijt e Bill Finlayson (2009), do *Council for British Research in the Levant*, em uma escavação no sítio arqueológico de Dhra’, perto do Mar Morto, fornecem evidências de celeiros que antecedem, por pelo menos mil anos, o surgimento de plantas totalmente domesticadas e de comunidades sedentárias em grande escala.

Já na Roma antiga, a enorme população e as necessidades de crescimento da economia forçaram o avanço das técnicas de armazenagem. De acordo com Henrich (2006), Aelius Aristides, um autor grego do século II, descreveu Roma como o armazém da Terra devido ao grande número de armazéns existentes. As *horrea*, grandes armazéns encontrados em cidades portuárias e acampamentos militares romanos, são as estruturas que mais se assemelham aos armazéns atuais por serem retangulares, de pedra, com dois ou mais andares e térreo suspenso. Estas estruturas armazenavam azeite de oliva, vinho, grãos, roupas e até mármore (RICHARD JR, 1992). O complexo *Horrea Galbae* possuía 140 cômodos somente no térreo, cobrindo uma área de cerca de 21.000 m² (POTTER; MATTINGLY, 1999).

À medida que o tempo passou, o número de armazéns bem como o seu tamanho e variedade de itens estocados cresceram enormemente em função de uma economia globalizada. Da mesma forma, cresceu também a complexidade na sua gestão.

Nos últimos anos, o processo de armazenamento passou por profundas transformações em virtude, principalmente, da necessidade da diminuição dos custos associados à aplicação de sistemas de informação na gestão, de sistemas automatizados de movimentação e de sistemas de endereçamento e localização móvel na separação de pedidos. (FLEURY et al, 2000, *apud* VERÍSSIMO; MUSETTI, 2003).

Apesar da notória evolução das ferramentas e técnicas utilizadas na gestão, armazenar itens é uma atividade que insere um elevado custo à cadeia logística. Assim, nos últimos anos, várias técnicas foram desenvolvidas com a finalidade de reduzir a necessidade de se manter estoques, tais como *Just-in-Time* (JIT)¹, *Vendor Managed Inventory* (VMI - Estoques Gerenciados pelo Fornecedor)², *Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment* (CPFR - Planejamento, Previsão e Reposição Cooperativos)³ e o *Efficient Consumer Response* (ECR – Resposta Eficiente ao Consumidor)⁴. Entretanto, ainda é infactível eliminar a atividade de armazenagem na cadeia logística devido a diversas razões. Kiisler (2014, p.3) cita alguns motivos pelos quais empresas em

¹ “*Just-in-Time* é um sistema que tem por objetivo produzir a quantidade demandada a uma qualidade perfeita, sem excesso e de forma rápida, transportando o produto para o lugar certo no tempo desejado” (HALL, 1983).

² “VMI é um sistema de parceria, onde o fornecedor é o responsável por abastecer o estoque de seu cliente, sempre que existir a necessidade de reposição de um determinado produto, cabendo ao fornecedor abastecer seu cliente no momento certo” (NOGUEIRA, 2012).

³ No CPFR, semelhantemente ao ECR, “fabricantes e varejistas compartilham sistemas e o processo de previsão de vendas. O objetivo principal é identificar qual empresa gera previsões de vendas mais precisas para um determinado SKU (que é a menor unidade física de um produto que é manuseada por uma organização), numa determinada região geográfica, num determinado horizonte de planejamento” (WANKE, 2004).

⁴ O ECR é “um procedimento, ágil e voltado para a tecnologia, baseado num conjunto de ferramentas de gestão e de operações, através do qual, parceiros comerciais (fornecedores e supermercadistas) trabalham em harmonia no final da cadeia de suprimentos, com o objetivo de reduzir estoques, tempos e custos e oferecer maior valor ao consumidor final” (REIS, 2008).

geral mantém estoques em armazéns:

- cobrir flutuações de oferta e de demanda;
- economia com transporte;
- economia de produção (taxa de produção estável);
- aproveitamento de descontos de compra em quantidade;
- suporte à uma política firme de atendimento ao cliente (por exemplo, preenchendo todos os pedidos recebidos em 24 horas);
- superar os diferenciais de tempo e espaço que existem entre produtores e consumidores;
- suporte à política *just-in-time* para fornecedores e/ou clientes;
- acumulação de estoques para uma temporada/estação;
- manter um estoque de segurança contra problemas de suprimento ou ter estoques extraordinários para casos extraordinários;
- acumulação de ampla gama de materiais adquiridos de diferentes fornecedores em diferentes momentos;
- fornecer armazenamento temporário de materiais a serem eliminados ou reciclados (logística reversa⁵).

Diante disso, otimizar o processo de armazenagem com a melhoria do tempo de resposta no abastecimento e nos custos associados é de grande relevância para qualquer cadeia logística.

1.1. Os Armazéns e o Processo de Armazenagem

Armazém é um local ou espaço físico onde são depositados materiais (matéria-prima, produto semiacabado ou acabado) que aguardam ser transferidos para outro lugar. De acordo com Barthold e Hackman (2014),

⁵ Logística Reversa é “um processo pelo qual uma empresa controla o retorno de seus produtos, peças e materiais dos locais de consumo, a fim de reutilizá-los, recuperar seu valor residual ou descartá-los”. (GANDOLFO; SBRANA, 2008, p. 31-32).

denomina-se SKU (*Stock Keeping Unit*) a menor unidade física de um produto que é controlado pelo armazém.

O processo de armazenagem, em linhas gerais, engloba as atividades de recebimento dos materiais, a estocagem propriamente dita (organização e conservação), as atividades de *picking* que consistem na separação dos pedidos e a expedição. Dias (2005) acrescenta que em algumas situações, o tempo de espera de um item no armazém é utilizado para incorporar valor ao produto de variadas formas, tais como a personalização do produto, os acabamentos finais, a embalagem e a rotulagem.

Segundo Rushton *et al* (2010), os armazéns são elementos centrais do processo logístico que permitem responder rapidamente às variações de demanda e preço, criando uma margem de segurança entre eles.

Os armazéns são parte integrante das cadeias de suprimentos nas quais operam e, portanto, as tendências recentes, como aumentar a volatilidade do mercado, a proliferação da gama de produtos e encurtar os prazos de entrega dos clientes, têm um impacto sobre os papéis que os armazéns precisam desempenhar. (RUSHTON *et al*, 2010, p. 225).

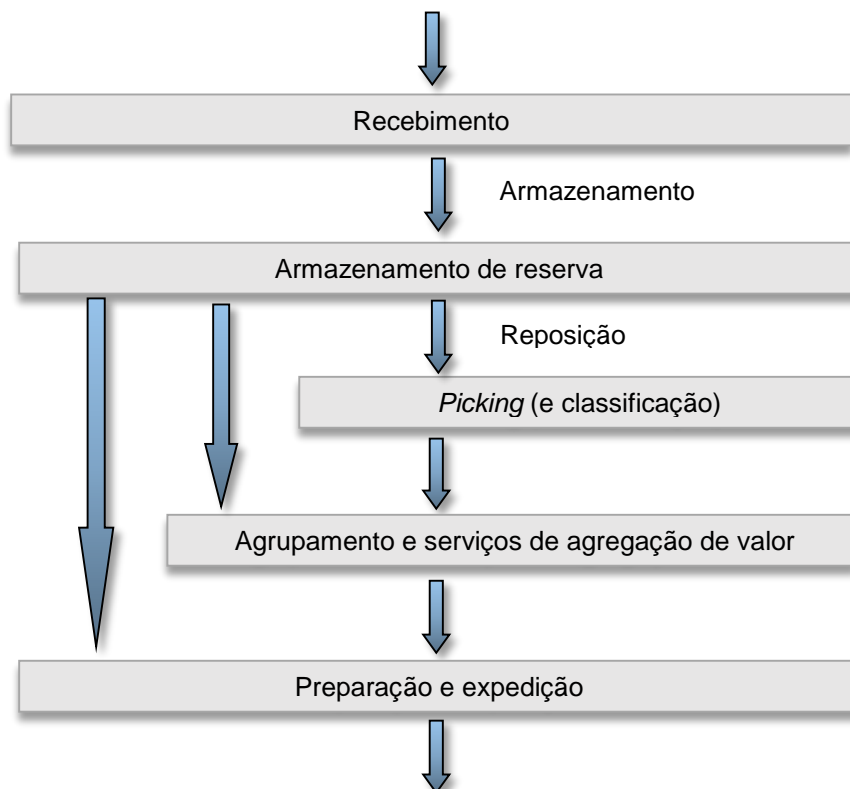
As instalações, equipamentos e pessoal fazem com que os armazéns sejam, frequentemente, um dos elos mais dispendiosos da cadeia de suprimento, requerendo uma gestão eficiente em termos de custo e de serviço. Estima-se que de 20 a 30% dos custos logísticos são relacionados a atividades de armazenagem, sendo assim, é a dinâmica da cadeia de suprimento que determina os requisitos de como devem ser operados e projetados os seus armazéns, de modo a minimizar o seu custo e proporcionar níveis de serviço adequados aos clientes (Rushton *et al*, 2010).

No atual ambiente de negócios, as formas pelas quais o armazenamento pode agregar valor foram alteradas por mudanças estruturais na logística do negócio. O gerente de logística de hoje pode estar lidando com um sistema que gerencia compensações entre compras, fabricação, transporte e armazenamento. Por exemplo, as decisões de compra podem ser alteradas para fornecer uma rota de transporte bidirecional equilibrada. Os gerentes de compras e distribuição podem trabalhar juntos para posicionar o armazenamento em um local que ajuda a criar esse equilíbrio. Quando as operações multinacionais são desenvolvidas, o trabalho de armazenamento torna-se muito mais complexo. Na medida que o capital permanecer escasso, o gerente de logística continuará a trabalhar na redução do estoque. Movimentadores lentos serão expurgados da linha de produtos, e todos os esforços serão feitos para acelerar a rotatividade nos armazéns. Tirar o máximo proveito dos recursos de estocagem

tornou-se uma tarefa fundamental para o gerente de logística (ACKERMAN, 1997, p. 28-29).

Embora cada armazém seja projetado para atender às demandas de sua própria cadeia de suprimento, existem certas operações que são comuns à maioria dos armazéns, como demonstra a Figura 1.1.

FIGURA 1.1 - Operações típicas de um armazém.



Fonte: Traduzido e adaptado de RUSHTON *et al* (2010, p. 230).

Segundo os autores, cada uma das etapas pode ser descrita da seguinte forma:

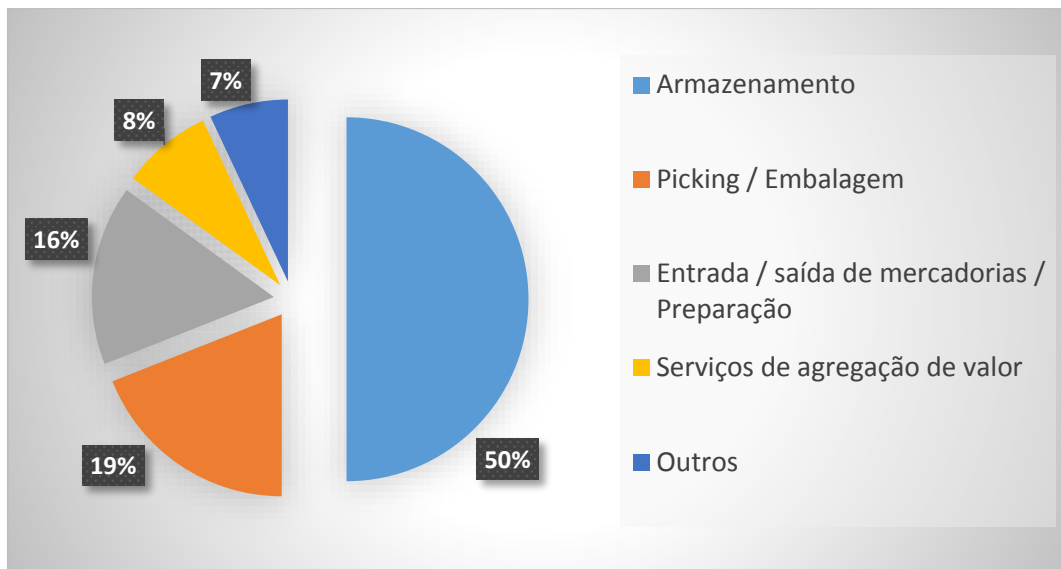
- a) *Recebimento*: engloba as atividades de descarregamento das cargas recebidas, verificação do estado do material, conferência dos mesmos com o que consta na relação de pedido de compra e registro em sistema apropriado;
- b) *Armazenamento de reserva*: após o recebimento, os materiais seguem para a área de armazenamento de reserva ou *backup*, que ocupa a maior parte do espaço e detém a maior parte do estoque. Dali, se necessário,

- são retirados e podem reabastecer um local de *picking* ou ir diretamente para a preparação e expedição como palete completo;
- c) *Picking*: é a coleta do material no armazenamento de reserva na quantidade e no tempo corretos de modo a atender ao pedido do cliente. Geralmente, um pedido contém várias linhas e tipos de produtos, com quantidades diferentes. Se a quantidade solicitada for inferior a uma unidade de carga, normalmente serão coletadas do local de *picking*, se não, serão coletadas diretamente da área de armazenamento de reserva. O *picking* é uma operação chave do armazém por conta do custo, do nível de serviço e devido à quantidade necessária de pessoal para a sua execução;
 - d) *Classificação*: algumas vezes é apropriado agrupar um número de pedidos pequenos e tratá-los como um único pedido para fins de *picking* e momentos antes do envio serem classificados e separados novamente em pedidos individuais;
 - e) *Agrupamento e serviços de agregação de valor*: Os materiais individuais coletados no *picking* são agrupados, compondo o pedido completo do cliente, e preparados para o envio, passando ou não por uma estação de embalagem. Esse processo também pode envolver atividades de *postponement*⁶ e serviços de agregação de valor, como rotulagem;
 - f) *Preparação e expedição*: nesta etapa, os materiais são reunidos para formar as cargas a serem transportadas pelos veículos na área de expedição, partindo, em seguida, para o próximo elo na cadeia de suprimentos.

Cada uma dessas operações ocupa, em média, determinada porcentagem da área de superfície disponível nos armazéns, conforme demonstra a Figura 1.2.

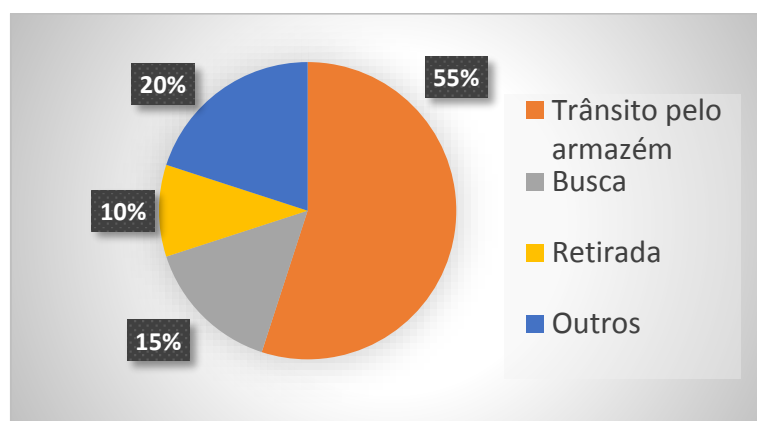
⁶ *Postponement* “implica em configurar ou montar mercadorias especificamente para a demanda do cliente, para que uma menor variedade de produtos genéricos seja mantida em estoque” (BAKER; CANESSA, 2009).

FIGURA 1.2 - Uso de área de superfície de um armazém por atividades.



Fonte: Traduzido e adaptado de RUSHTON *et al* (2010, p. 232).

De acordo com a figura 1.2, a armazenagem propriamente dita é a atividade que ocupa a maior parcela da área disponível do armazém. Assim, a atividade de *picking*, nesta área, pode implicar em grandes deslocamentos a serem executados pelos funcionários e equipamentos de movimentação. A figura 1.3 apresenta uma estimativa de consumo de tempo em relação às atividades que ocorrem durante a separação dos pedidos.

FIGURA 1.3 - Distribuição do tempo de um operador de *picking*

Fonte: Traduzido e adaptado de Frazelle (2002; *apud* KIISLER, 2014).

Assim, otimizar o *layout* dos armazéns bem como a designação dos locais de armazenagem de cada item deve propiciar a redução da movimentação de produtos diminuindo

1. o custo com equipamentos de movimentação associados a aquisição, manutenção e descarte;
2. os riscos de acidentes de trabalho devido ao uso de equipamentos de movimentação tais como empilhadeiras e transportadores bem como da retirada do item das prateleiras. Os procedimentos de segurança a serem cumpridos no ambiente de trabalho, quanto ao transporte, à movimentação, à armazenagem e ao manuseio de materiais, seja de forma mecânica ou manual estão regulamentados na NR 11 - Transporte, Movimentação, Armazenagem e Manuseio de Materiais (BRASIL, 2016);
3. os riscos de doenças ocupacionais: as doenças ocupacionais provocam o afastamento do trabalhador das suas atividades, custos ao sistema de saúde e aposentadorias por invalidez. Merino (1996) relata que 67,8% dos trabalhadores, segundo pesquisa realizada na Comunidade Européia, que movimentavam cargas pesadas manualmente, apresentaram problemas crônicos, como deformações da coluna. Destes, 71,4% apresentaram quadros agudos, com dores ou desconfortos na região lombar;
4. o tempo de separação de pedidos e, conseqüentemente, o tempo de resposta do sistema às necessidades da cadeia logística.

1.1.1. O *layout* dos armazéns e a movimentação de materiais

Ao analisar a influência de diferentes tipos de layout na distância percorrida, Caron et al (2000, *apud* KARASÉK, 2013) inferiu que variações nos primeiros respondem por mais de 60% das variações da distância total percorrida em um armazém, e que

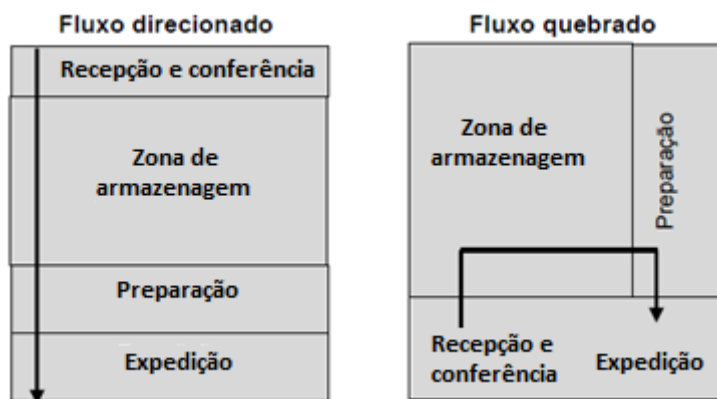
existem alguns fatores a serem considerados no design de um *layout*, como: o número de caixas; o comprimento, a largura e o número de corredores de *picking*; o número e a forma dos corredores transversais, se estiverem presentes; o número de níveis das prateleiras; e a posição

dos portões de entrada e saída do armazém. (KOSTER; LE-DUC; ROODBERGEN, 2007; HERAGU, 2008 *apud* KARASÉK, 2013, p. 1-2)

Segundo Karasék (2013), estabelecer um *layout* adequado para o armazém é fundamental quando se busca a otimização de fluxo de materiais, pois possui influência significativa na atividade de *picking* e conseqüentemente na distância total percorrida no interior dos armazéns.

Para Cravo (2012), o *layout* do armazém diz respeito à disposição das áreas de recebimento e conferência, armazenagem, preparação, expedição, entre outras, dentro do espaço disponível. Segundo a autora, os *layouts* são classificados em dois tipos, os *layouts* de fluxo direcionado e os de fluxo quebrado. Observe a figura 1.4.

FIGURA 1.4 - Representação do *layout* de armazém em fluxo direcionado e em fluxo quebrado



Fonte: Adaptado de Cravo (2012, p. 10)

Barthold e Hackman (2014) apontam as vantagens de cada um desses modelos de *layout*. Observe a tabela 1.1.

Segundo Karasék (2013) e Barthold e Hackman (2014), o desempenho do *layout* está relacionado com o *design* dos corredores, que apesar de proverem acessibilidade, consomem espaço que poderia ser utilizado em armazenamento. Isso faz com que muitos adotem como meta o seu estreitamento, o que acarreta maior dificuldade de movimentação e congestionamento de trabalhadores ou equipamentos.

De acordo com esses mesmos autores, por permitirem um acesso direto ao ponto central de recebimento e expedição, modelos de *layout* como *Flying-V* e o *Fishbone* reduzem de 10% a 20% a distância total percorrida no armazém

com relação aos *layouts* tradicionais e o *Inverted-V* em mais 3%. A figura 1.5 ilustra esses modelos analisados pelos autores.

TABELA 1.1: Tabela comparativo das vantagens dos modelos de *layout* quebrado e direcionado

Configuração quebrada ou em U	Configuração de fluxo direcionado
<ul style="list-style-type: none"> •Recebimento e expedição localizados no mesmo lado do depósito; •Torna os locais mais convenientes em ainda mais convenientes, e menos convenientes em ainda menos convenientes; •Apropriado quando o movimento do produto tem uma forte inclinação ABC, ou seja, quando muito poucos SKUs são responsáveis pela maior parte da atividade; •Proporciona flexibilidade nas docas tanto para expedição quanto para recebimento: se a pessoa experimenta uma onda de atividade, pode usar portas adicionais de outras funções; •Permite o uso mais eficiente de empilhadeiras: quando uma empilhadeira executa um armazenamento e um <i>picking</i> alternadamente, combinadas para reduzir a distância percorrida; •Diminui o pátio e a pista do caminhão; •Permite a expansão ao longo dos outros três lados do armazém. 	<ul style="list-style-type: none"> •Recebimento e expedição em lados opostos do armazém; •Todos os produtos fluem na mesma direção, pois há menos oportunidades de interferência; •Torna muitos locais de armazenamento de igual conveniência; •Design conservador: locais de armazenamento mais convenientes são menos convenientes.

Fonte: Traduzido e adaptado de Barthold e Hackman (2014, p. 66)

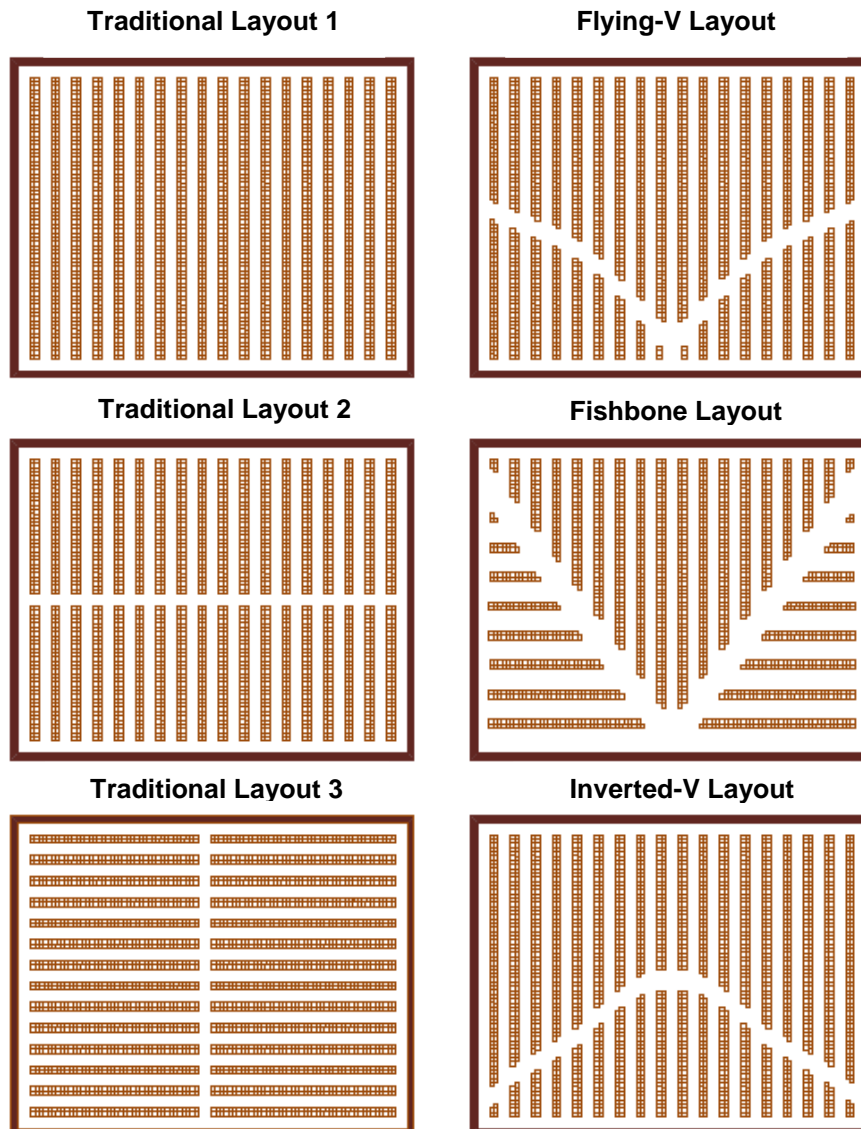
Já Capellato e Melo (2012) ressaltam que deve ser considerado, também, o espaço vertical disponível a ser utilizado tendo em vista que a verticalização do armazém favorece o melhor aproveitamento da área disponível entretanto sem incorrer em incompatibilidade, no caso de materiais grandes demais.

Alves (2012) lembra que a opção por um determinado tipo *layout* e seu dimensionamento, em geral, é complexa uma vez que podem gerar restrições a longo prazo nas operações realizadas no armazém.

Além da disposição dos postos de trabalho e dos corredores de movimentação, os itens armazenados necessitam estar alocados de maneira

adequada e de forma com que possam ser acessados e recolhidos no menor tempo e com o menor esforço possíveis. E, a disposição dos itens depende das políticas de armazenagem estabelecidas por cada gestor.

FIGURA 1.5 - Exemplos de corredores de movimentação.



Fonte: Karasék (2013, p. 2)

1.1.2. Problemas de Atribuição de Locais de Armazenagem, Políticas de armazenagem e Classificação ABC

A capacidade de armazenamento, o rastreamento dos itens e a separação de pedidos são fortemente afetados pela atribuição dos itens (SKUs) aos seus

respectivos locais de armazenagem (GU *et al.*, 2007, *apud VILA NOVA et al.*, 2017).

Segundo Karasék (2013), quando os itens armazenados estão bem organizados, reduzem a necessidade de espaço e conseqüentemente a distância total percorrida na movimentação.

Conforme Vila Nova *et al* (2017), um Problema de Atribuição de Local de Armazenagem (SLAP – *Store Location Assignment Problem*), consiste em encontrar uma maneira eficiente de alocar produtos, com o fim de melhorar os processos de separação de pedidos.

Segundo Chan & Chan (2011, *apud VILA NOVA et al*, 2017), são fatores afetam essa atribuição o método de *picking*, o sistema de manuseio, as características do produto, a demanda, os requisitos de espaço, entre outros. Entretanto, parece não haver um consenso sobre isso.

Diferentes autores utilizaram diversos critérios para a definir os locais de armazenagem. Vila Nova *et al* (2017) classificou alguns critérios de acordo com o número de ocorrências na literatura. Observe a tabela 1.2.

TABELA 1.2 – Fatores considerados pela literatura para um SLAP

Ranque	Critérios
1	Espaço e popularidade
2	Custo e tempo
3	Distância percorrida
4	Demanda, contribuição marginal e cliente
5	EQ, EN, QI, IK ⁷
6	Peso, volume da SKU, volume de negócios e tamanho da SKU

Fonte: Vila Nova *et al* (2017, p. 7)

⁷ Fazem parte da chamada Análise EIQ (*Entry, item, quantity*). EQ faz referência à quantidade de expedições, à distribuição quantitativa de cada pedido, à determinação dos pedidos mais importantes e à estratégia de *picking* correspondente; EN se refere a controlar os pedidos de expedição de cada item e determinar o método de *picking* apropriado; QI se refere à quantidade de remessa de um único item, determinação de níveis de estoque e métodos de processamento de itens diferentes; IK se refere à frequência de envio de *commodities* e determinação de itens regulares, e também pode cooperar com QI para determinar a seleção da estratégia de *picking* (LU, 2015).

A Tabela 1.3, apresenta uma síntese elaborada pelo autor deste trabalho monográfico dos critérios considerados por diferentes autores.

TABELA 1.3 – Fatores considerados por diferentes autores

Autor	Objetivo	Considerou
Bergue (2000)	Análise das potencialidades do uso da ferramenta de simulação computacional em operações logísticas	Ordens de serviço (tempo de chegada, quantidade), separadores (quantidade, jornada de trabalho), atividade de separação (tempo de execução e roteiro com endereços para formação do palete), <i>layout</i> , locais, entidade (ordem de serviço), recursos (separadores), processos (fluxo das entidades), turnos, redes de percurso, variáveis (número de paletes a ser processado, o número de paletes processados acumulado, o número de paletes processados ao dia)
Fontana; Cavalcante (2013)	Índices baseados no número de clientes para localização de itens em armazéns	Demanda, nível de inventário, períodos, <i>layout</i> armazém (com cada local de armazenagem), classe, área do local a ser ocupado, distância do local ao ponto de origem, custo do espaço no horizonte de planejamento, custo do <i>order picking</i> por metro percorrido
Sakaguti (2007)	Otimização do processo de <i>picking</i> de um centro de distribuição através da programação dinâmica	Número do bloco (lote), número da família a que o item pertence (classificação do autor com base na fragilidade do item), rua, nível, coluna, lado, código do item, quantidade do item, quantidade de produtos em um palete fechado, peso de todos os produtos do item, quantidade percentual ocupada pelo item no palete. O veículo transportador foi considerado de capacidade de peso limitada
Sanei <i>et al</i> (2011)	Algoritmo heurístico para o problema de atribuição de espaço no armazém considerando restrições operacionais: com aplicação em um estudo de caso	<i>Layout</i> do armazém, quantidade e penalidade atribuída a cada posição existente adjacente, não-adjacente, oposta e traseira, capacidade armazenamento de produtos em cada palete, fluxo de produtos por dia, distância do local de armazenagem à doca, área (capacidade) de armazenagem de determinado local

Contudo, antes de atribuir um local de armazenagem a algum item, é importante definir a política de armazenagem, que, segundo Teodoro (2016), consiste num conjunto de regras que busca atribuir produtos a determinados locais. O autor classifica as políticas de armazenagem da seguinte forma:

- *Aleatória*: os itens a serem estocados podem ser alocados em qualquer local ou no mais próximo, de forma aleatória. Este tipo de distribuição possui a vantagem de utilizar melhor o espaço disponível no armazém. Entretanto, isso ocorre à custa de aumento da distância média percorrida na atividade de separação, pois resulta em rotas de separação mais longas;

- *Dedicada*: neste tipo de alocação, há um local específico para cada item. Possui como vantagem uma maior familiarização dos separadores com os locais onde cada produto está armazenado, e em contrapartida, consome muito espaço, pois reserva espaço para a quantidade máxima de cada produto. Ackerman (1997) acrescenta como vantagem deste tipo de política a simplicidade e a redução de erros. Já segundo Barthold e Hackman (2014), no armazenamento dedicado é possível observar muitos locais de armazenamento, aqui denominados *slots*, com sua capacidade ociosa.
- *Baseado em classes de materiais*: os itens são divididos em classes de materiais, geralmente três (a depender das necessidades operacionais e dos itens armazenados), e cada uma delas possui sua área exclusiva dedicada no armazém.

Mansuri (1997, *apud* TEODORO, 2016) acrescenta que o armazenamento dedicado maximiza o rendimento do sistema, o aleatório maximiza a utilização do espaço e o baseado em classe, além de maximizar o rendimento, apresenta também uma ocupação de espaço próxima à proporcionada pelo aleatório. Para Derickx (2012), uma boa análise das possibilidades, das necessidades operacionais e das restrições ambientais deve ser feita pelo gestor para uma boa tomada de decisão.

Segundo Vila Nova *et al* (2017), a escolha correta da política de atribuição de locais de armazenamento, gerará uma melhor disposição dos itens no armazém, maior agilidade na separação de pedidos, menor distância percorrida, redução de custos e proporcionará um melhor serviço ao cliente. No entanto, uma má escolha gerará operações de armazenagem ineficientes e consequente elevação desses custos.

A política de armazenagem baseada em classes de materiais será adotada neste trabalho monográfico de curso a fim de atribuímos os locais de armazenagem para um conjunto de produtos genéricos.

A adoção de uma política de armazenagem baseada em classes torna fundamental que ferramentas de classificação de itens em estoques sejam utilizadas. Dentre as mais utilizadas está o Diagrama de Pareto, também chamada de Classificação ABC.

Para Henrique (2010) tal nomenclatura deve-se a Vilfredo Pareto, um economista italiano que constatou que 20% da população detinha 80% das riquezas de seu país. Posteriormente, foi popularizado por Joseph Moses Juran, que havia constatado que 80% dos problemas eram decorrentes de somente 20% dos fatores.

A Classificação ABC é uma ferramenta muito utilizada na gestão de armazéns, pois permite determinar os itens de maior importância para a organização e dedicar maior cuidado e atenção a eles. De modo geral, os SKUs são classificados em classes A, B e C, conforme sua relevância, sendo os da classe A de alta, os da classe B de média e os da C de baixa. (HENRIQUE, 2010)

Para classificar itens por meio da curva ABC, Da Silva *et al.* (2015, apud VILA NOVA *et al.*, 2017) argumenta que podem ser adotados critérios variados, tais como peso, volume, tamanho, demanda, entre outros, porém considerar todos simultaneamente dificulta a atribuição de locais.

Henrique (2010) enfatiza que não há uma regra para definição dos critérios utilizados para a classificação ABC, pois variam de organização para organização a depender do objetivo, nível e da natureza da atividade desempenhada por cada uma.

Lima (2016) e Gava (2018) propõem que os seguintes passos sejam utilizados para realizar a Classificação ABC.

1. Identificar quais critérios serão adotados. Por exemplo, a demanda, a lucratividade, o volume, o peso, dentre outros ou uma combinação desses;
2. Calcular o valor resultante para cada item com base nos critérios selecionados;
3. Ordená-los de maneira decrescente;
4. Calcular a porcentagem que cada um desses valores representa com relação ao valor total;
5. Calcular a porcentagem acumulada de cada item; e
6. Separar os itens em A, B e C, ao serem atingidas as porcentagens acumuladas de 80%, 95% e 100%, respectivamente.

1.1.3. Roteirização, as atividades de separação e as distâncias percorridas: um problema de pesquisa operacional

Como define Teodoro (2016), os métodos de roteirização têm a finalidade de determinar o menor percurso a ser percorrido no *picking* de itens pertencentes a uma lista de separação.

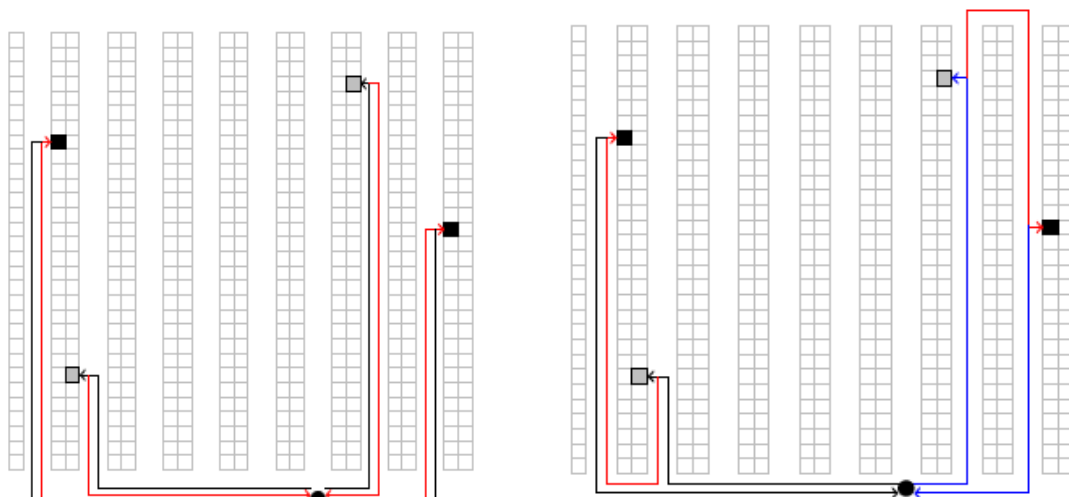
Assim, será possível otimizar as atividades de *picking*, diminuindo o tempo necessário para a separação do pedido, e conseqüentemente os custos associados, por meio da definição eficiente dos locais de armazenagem.

Para Karasék (2013) e Barthold e Hackman (2014), as “viagens” podem ocorrer das seguintes formas:

- para atender a um pedido de cada vez (*single-cycle operation* - mais utilizado);
- para atender a vários pedidos menores simultaneamente, conhecido como em lote (*batching*); ou ainda,
- alternando armazenamento e *picking*, reduzindo assim a distância percorrida sem material, essa técnica é conhecida como operação de ciclo duplo (*dual-cycle operation*).

Para demonstrar isso, observe a Figura 1.5.

FIGURA 1.1 - Esquema representativo de uma operação *single-cycle* (esquerda) e outra *dual-cycle* (direita).

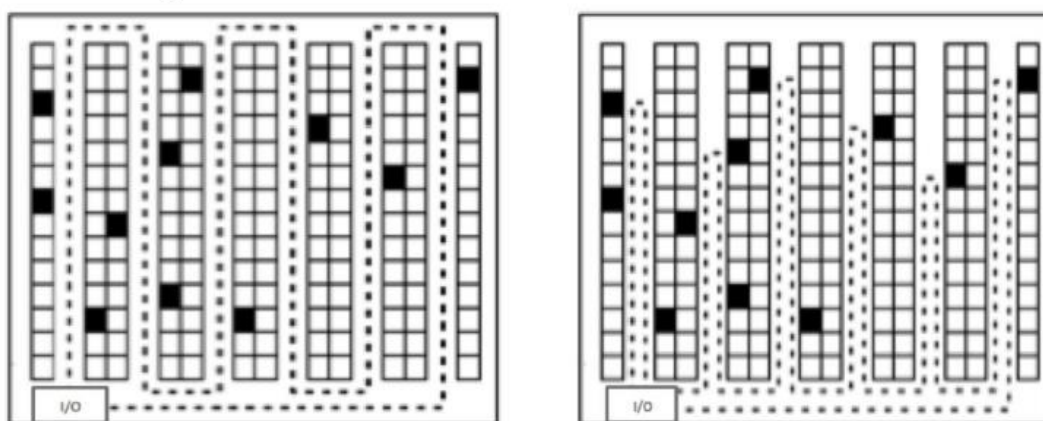


Fonte: Adaptado de Barthold; Hackman (2014, p. 61)

Na parte inferior da figura 1.5, o ponto preto representa o local de recepção e de expedição de materiais. Os trajetos de abastecimento do armazém são marcados pelas linhas pretas e azuis. Os trajetos de separação dos pedidos a serem enviados são representados pelas linhas em vermelho, os quadrados cinzas representam os locais onde os produtos estão sendo armazenados e os pretos aqueles que serão retirados no *picking*.

Já Roodbergen (2001, *apud* TEODORO, 2016) cita o método de roteirização em S, em que uma rua que contenha algum item a ser separado é acessada por um lado e abandonada pelo outro, e o método de roteirização de retorno, em que um corredor é acessado por um lado e abandonada pelo mesmo. Ambos os métodos estão esquematizados na Figura 1.7.

FIGURA 1.2 - Método de roteirização em S (esquerda) e de retorno (direita).



Fonte: Adaptado de Roodbergen (2001, *apud* TEODORO, 2016, p. 29)

Independente da forma com que as rotas de armazenagem e separação são traçadas, o importante é que haja uma otimização das distâncias percorridas ao serem consideradas atividades de armazenagem e *picking*. Neste caso, a pesquisa operacional apresenta-se como uma importante ferramenta.

A pesquisa operacional (do inglês *Operations Research*), ou simplesmente PO, faz uso de vários métodos científicos combinados com um planejamento razoável para resolver problemas reais de logística e armazenagem, conforme afirma Shukla *et al.* (2017). Pode ainda ser definida como:

A aplicação de métodos científicos a modelos complexos para auxiliar no processo de tomada de decisões, tais como projetar, planejar e operar sistemas em situações que requerem alocação eficiente de recursos escassos (ARENALES *et al.*, 2015, p. 7).

Churchman (1957, p. 3), um dos pioneiros nesta área, define PO como “a aplicação de métodos, técnicas e ferramentas científicas a problemas que envolvam as operações de um sistema, de modo a fornecer àqueles que o controlam soluções ótimas”.

Neste mundo globalizado, rápido, com o mercado e tecnologia avançando em áreas cada vez mais complexas e onde o cliente exige pronta-resposta, a PO tem se mostrado de grande auxílio em virtude da sua diversidade de aplicações na “indústria, transporte, construção, telecomunicações, planejamento financeiro, saúde, estratégias militares e serviços públicos”, enumeram Hillier e Lieberman (2001, p. 2).

As origens da PO, se a considerarmos como a busca pela solução ótima de problemas, pode ser traçada desde a antiguidade, onde cientistas, matemáticos, físicos e inventores buscavam soluções para os mais variados problemas por meio da aplicação de métodos científicos. Segundo Gomes (2017), a PO encontrou aplicação na área política e militar quando, no século III A.C, o imperador de Siracusa, Hieron, solicitou a Arquimedes o desenvolvimento de uma forma para se livrarem do cerco naval romano.

Apesar de suas origens remotas, para Hillier e Lieberman (2001), a PO só veio a desenvolver-se efetivamente durante a II Guerra Mundial, período em que a alocação eficiente dos recursos mostrava-se uma necessidade urgente. Mais especificamente, quando o exército Aliado reuniu vários cientistas para lidar com problemas táticos e estratégicos.

Ao desenvolver métodos eficazes de usar a nova ferramenta de radar, essas equipes foram fundamentais para vencer a Batalha Aérea da Grã-Bretanha. Através de suas pesquisas sobre como administrar melhor as operações de comboio e antissubmarino, eles também desempenharam um papel importante na conquista da Batalha do Atlântico Norte. Esforços similares ajudaram a Campanha da Ilha no Pacífico. (HILLIER; LIEBERMAN, 2001, p. 1)

Ainda segundo os autores, a PO foi introduzida nas empresas, indústrias e governo, na década de 50, quando deixou de ser de uso exclusivamente militar. Décadas depois encontrou amplo apoio, aplicação e desenvolvimento com o

surgimento da computação, tornando possível a resolução de problemas consideravelmente mais complexos.

A pesquisa operacional emprega diversas técnicas como a programação inteira (em que as variáveis assumem valores inteiros), programação dinâmica (na qual o modelo original pode ser decomposto em subproblemas mais gerenciáveis), programação em rede (na qual o problema pode ser modelado como uma rede) e programação não-linear (em que as funções do modelo são não-lineares) (TAHA, 2007).

Este trabalho monográfico de curso utilizará de modelos lineares e de programação inteira a fim de atingir o objetivo pretendido.

De acordo com Murthy (2007), a programação linear é uma das ferramentas mais versáteis e úteis para a tomada de decisões da pesquisa operacional, tendo aplicação nas mais variadas áreas. Winston (2004) diz que 85% das empresas da *Fortune 500* (500 maiores empresas do mundo divulgada pela revista *Fortune*) já utilizaram programação linear.

A otimização linear pode ser definida como:

Um modelo, que é usado para a alocação ótima de recursos escassos ou limitados a produtos ou atividades concorrentes sob premissas como certeza, linearidade, tecnologia fixa e lucro constante por unidade [...]. (MURTHY, 2007)

Neste trabalho monográfico, assim como Gomes (2017), o termo “Programação Linear” será utilizado quando o foco estiver na visão matemática de resolução de sistemas lineares; já o termo “Otimização Linear” quando o foco estiver na melhoria de processos ou na solução problemas relativos à tomadas de decisões.

Para utilizar os métodos da pesquisa operacional a fim de otimizar um sistema qualquer é necessário seguir as seguintes etapas:

1º Etapa – Formulação (ou identificação) do Problema:

Murthy (2007) explica que nesta etapa a situação problema deve ser analisada claramente, atentando para o que de fato está acontecendo, definindo e identificando as variáveis e restrições do problema e expondo-as em forma de sentença, ou declaração. A formulação deve conter o objetivo a ser atingido, a

identificação das variáveis controláveis e não-controláveis e as restrições do problema.

2º Etapa: Modelagem Matemática:

Arenales *et al* (2011, p. 3-4) afirmam que modelagem matemática é a representação abstrata de situações reais, em forma de relações matemáticas, implicando, de modo geral, em simplificações razoáveis.

Segundo os autores, “a validação do modelo depende de a solução do modelo matemático ser coerente com o contexto original”.

Marins (2011, *apud* GOMES, 2017) destaca a importância de escolher o método de otimização antes da formulação do modelo matemático, para que este esteja estruturado de acordo com o método de resolução que será empregado.

Murthy (2007) aponta que qualquer problema de otimização linear tem as seguintes propriedades:

- A relação entre variáveis e as restrições deve ser linear;
- O modelo deve ter uma função objetivo;
- O modelo deve ter restrições estruturais; e
- O modelo deve ter restrições (ou condições) de não-negatividade.

Desse modo, um modelo matemático de OL, deve ser estruturado da seguinte forma:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Min ou max} & f(x) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad \text{Função Objetivo} \\
 \text{Suj. a} & a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq/=/\geq b_1 \\
 & a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq/=/\geq b_2 \\
 & \vdots \\
 & a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq/=/\geq b_m \\
 & x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0 \quad \text{Condições de não-negatividade}
 \end{array}
 \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \\ \end{array}} \right\} \text{Restrições}$$

Podendo também ser transcrito desta maneira:

$$\begin{aligned} \text{Min ou max} \quad & f(x) = \sum_{n=1}^n c_n x_n \\ \text{suj. a} \quad & \sum_{n=1}^n a_{mn} x_n \leq / = / \geq b_m \quad \forall m = 1, \dots, m \\ & x_n \geq 0 \quad \forall n = 1, \dots, n \end{aligned}$$

onde:

x_1, x_2, \dots, x_n são as variáveis de decisão que quantificam o nível de operação da atividade n ;

b_m é a quantidade do m -ésimo recurso disponível ou a exigência que deve ser cumprida;

c_n representa o custo associado à n -ésima atividade;

a_{nm} é a quantidade do recurso n (ou exigência a ser cumprida) em uma unidade da atividade m .

Winston (2004) destaca quatro hipóteses a serem assumidas em um modelo de otimização linear:

- **Proporcionalidade:** a contribuição de cada atividade à função objetivo ou para as restrições é proporcional ao nível de cada uma dessas atividades.
- **Aditividade:** o valor da função objetivo ou das restrições é a soma das contribuições de cada variável.
- **Divisibilidade (ou fracionalidade):** todas as variáveis de decisão podem assumir valores fracionados, ou seja, não são somente permitidos números inteiros.
- **Certeza:** cada parâmetro utilizado no modelo matemático é uma constante conhecida (c_n, a_{nm}, b_m).

3º Etapa - Obtenção da solução

Existem vários métodos disponíveis para a obtenção de soluções para os modelos lineares, dentre os quais podem ser citados o método de tentativa-e-

erro (quase sempre inviável), a resolução gráfica, o algoritmo do simplex, entre outros (MURTHY, 2007).

Hillier e Lieberman (2001) destacam a utilização de algoritmos, que são uma sequência de regras aplicadas repetidamente ao problema, aproximando-o da solução ótima. Segundo Erickson (2015, p. 1), um algoritmo é “uma sequência explícita, precisa, inequívoca e mecanicamente executável de instruções elementares”. Este tipo de técnica é altamente eficiente e usada rotineiramente na resolução de problemas de PO.

Alguns modelos de OL podem ser resolvidos manualmente quando são de estrutura simples e poucas variáveis. Entretanto, otimizar problemas e objetos reais, que estão submetidos às mais variadas restrições e possuem uma infinidade de variáveis, tornam-se extremamente complexos, difíceis e demorados de serem resolvidos, quando não insolúveis.

Daí surge o auxílio da Tecnologia da Informação à PO, de forma que é possível otimizar modelos matemáticos por meio dos mais variados pacotes de *software* disponíveis, tais como o Lindo, o Lingo, o CPLEX, o Solver (suplemento do Microsoft Excel), o R, dentre outros.

Neste trabalho monográfico será utilizado no software Lingo 17.

4º Etapa - Teste do modelo e da solução obtida:

Hillier e Lieberman (2001) destacam que a solução encontrada na otimização do modelo matemático é ótima para o modelo e não necessariamente para a situação ou objeto real, da qual o modelo é mera abstração. Isso torna necessária a validação do modelo, ou seja, verificar o grau de confiabilidade e efetividade do modelo em relação à situação-problema real (HILLIER; LIEBERMAN, 2001).

5º Etapa – Implementação da solução:

De acordo com Hillier e Lieberman (2001), depois de validado o modelo, o mesmo servirá de apoio ao processo de tomada de decisões do administrador, e é nesta fase que os benefícios do uso da PO são obtidos. Os autores ainda apontam algumas etapas para uma correta implantação da solução encontrada:

Primeiro, a equipe de PO fornece à gerência operacional uma explicação cuidadosa do novo sistema a ser adotado e como ele se relaciona com as realidades operacionais. Em seguida, essas duas partes compartilham a responsabilidade de desenvolver os procedimentos necessários para colocar esse sistema em operação. A gerência operacional então vê que uma doutrinação detalhada é dada ao pessoal envolvido, e o novo curso de ação é iniciado. Se bem sucedido, o novo sistema pode ser usado nos próximos anos. Com isso em mente, a equipe de PO monitora a experiência inicial com o curso de ação tomada e procura identificar quaisquer modificações que devam ser feitas no futuro. (HILLIER; LIEBERMAN, 2001, p. 20).

Depois de implantada a solução encontrada, segundo Winston (2004), é necessário uma ampla coordenação de todos os envolvidos na administração monitorando, estimulando a comunicação e o *feedback* contínuo com a finalidade de manter sistema e modelo alinhados.

1.2 Modelos de designação e o problema do caixeiro viajante (PCV)

Os problemas de atribuição de locais de armazenamento, objeto deste trabalho monográfico de curso, é um tipo específico de otimização linear inteira denominado problema de designação.

De acordo com Arenales *et al* (2011), os problemas de designação consistem na atribuição de n tarefas a n agentes, cada agente executa uma única tarefa e cada tarefa é executada por um único agente a um custo $c_{i,j}$. Tais problemas são estruturados da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{i,j} x_{i,j} \\ & \sum_{i=1}^n x_{i,j} = 1, \quad j = 1, \dots, n \\ & \sum_{j=1}^n x_{i,j} = 1, \quad i = 1, \dots, n \\ x = & \begin{cases} 1, & \text{se a tarefa } i \text{ é executada pelo agente } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \end{aligned}$$

Como o objetivo do problema de atribuição de locais de armazenamento é minimizar o esforço de movimentação dos materiais nas atividades de *picking*, a fim de diminuir o tempo e o custo desta atividade, analisar a estrutura do Problema do Caixeiro Viajante torna-se interessante.

O Problema do Caixeiro Viajante (PCV), ou em inglês *Travelling Salesman Problem (TSP)*, é um caso específico dos problemas de designação em que o objetivo é minimizar a distância percorrida (e conseqüentemente, tempo, custo, consumo de combustível, entre outros) por um indivíduo que parte de uma origem, passa por vários pontos única vez e retorna a origem (SAKAGUTI, 2007).

Taufer e Pereira (2011) explicam que o problema torna-se complexo quando é levado em conta que o número total de rotas possíveis, considerando $n - 1$ pontos a serem visitados, é $\frac{(n-2)!}{2}$. Ainda segundo os autores, para muitas situações torna-se impraticável a enumeração de todas as rotas possíveis, requerendo até mesmo de computadores horas ou dias para processamento.

Taufer e Pereira (2011) e Brucato (2013) destacam que o PCV pertence ao ramo da PO que utiliza a Teoria dos Grafos. Brucato (2013) define grafo como estruturas que representam relações entre pontos, como $G(V, E)$, possuindo V vértices e E pares não ordenados desses pontos.

Existem vários métodos para a construção de um PCV. Siqueira (2005, p. 31-32) cita: “Algoritmos Genéticos, Têmpera Simulada, Busca Tabu, Busca Local, Colônia de formigas, Redes Neurais, dentre outros”.

Assim, como em Taufer e Pereira (2011) e Goldberg e Luna (2000), o presente trabalho monográfico fará uso do método de Dantzig, Fulkerson e Johnson, bastante utilizado na literatura e de fácil compreensão. Sendo assim, considerando $G(N, A)$ o grafo dado, tem-se:

$$\begin{array}{ll} \text{Min} & f(x) = \sum_{j=1}^j \sum_{i=1}^i c_{ij} x_{ij} \\ \text{suj. a} & \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \\ & \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \end{array}$$

$$\sum_{i,j \in S}^n x_{ij} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subset N$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i,j \in N$$

Sendo:

c_{ij} o custo de ir do ponto i ao ponto j ;

$x_{ij} = 1$, se o arco (i,j) pertencer a A , ou seja, se for escolhido como integrante da solução;

$x_{ij} = 0$, caso contrário;

S : é um subgrafo de G ;

$|S|$: número de vértices do subgrafo S .

2. DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO

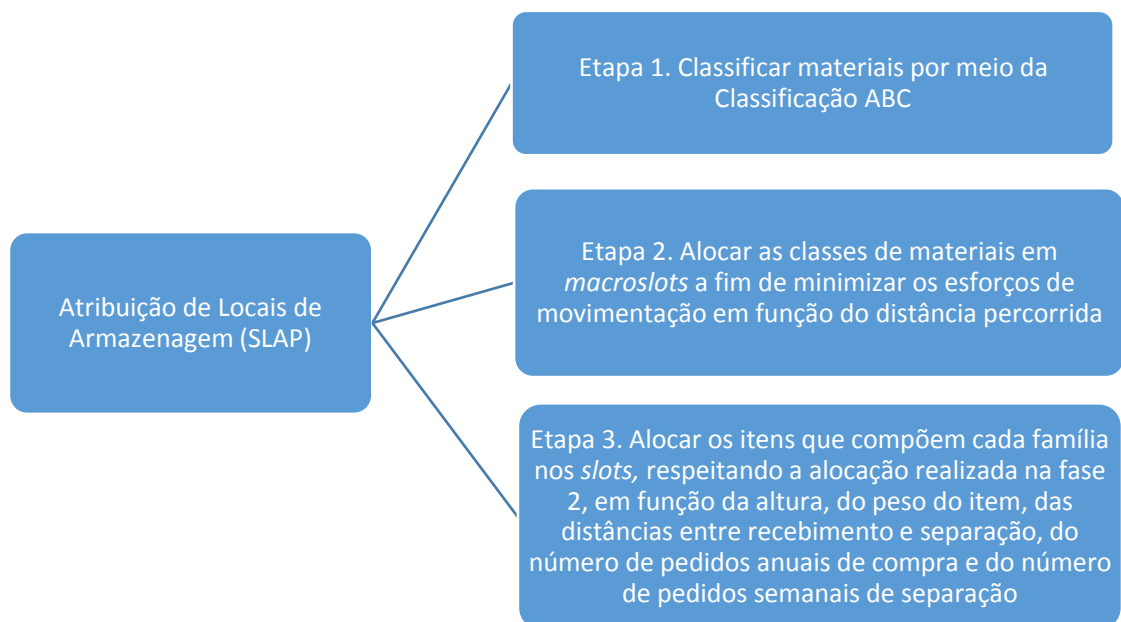
Como dito anteriormente, em um armazém, grande parte do tempo e recursos são empregados na movimentação dos itens armazenados.

Assim, definir locais de armazenagem que otimizem os fluxos de materiais em um armazém diminui não só o tempo de movimentação mas também o custo da atividade bem como os riscos de acidentes de trabalho e de doenças ocupacionais.

Atualmente, modernas técnicas e ferramentas de endereçamento e localização do estoque diminuíram a necessidade de que os itens iguais estejam organizados em único endereço. Portanto, esse não será um fator crítico a ser considerado neste trabalho monográfico.

Em função da adoção da política de armazenagem em classes de materiais, a abordagem dada aqui ao problema de definir os locais de armazenagem possui três etapas distintas. Observe a figura 2.1.

FIGURA 2.1 - Divisão em etapas do problema proposto



Para a execução da etapa 1 utilizou-se a metodologia proposta por Pareto para a Classificação ABC, apresentada no capítulo 1.

Em função do objetivo deste trabalho ser de otimizar o fluxo de materiais, adotou-se como critérios para essa classificação a relação entre peso unitário e demanda do item. A esta relação foi dado o nome de peso do consumo.

Assim, os itens a serem armazenados foram separados em 3 famílias (A, B e C), sendo que a família A é aquela de maior relação peso demanda e a C é a de menor.

A etapa 2 alocou cada uma das famílias em seus respectivos *macroslots* (conjunto de *slots*) com o objetivo de minimizar os esforços de movimentação. Assim, espera-se que as famílias de maior peso do consumo sejam alocadas mais próximas do ponto de expedição do armazém.

Em função dos resultados da etapa 2, a etapa 3 teve por objetivo definir os locais de armazenamento dos itens pertencentes a uma mesma família em função do esforço de movimentação. Este último foi definido em função do peso unitário dos itens, da altura do local de armazenagem, das distâncias entre recebimento e separação, do número de pedidos anuais de compra e do número de pedidos semanais de separação.

Para as etapas 2 e 3 foram desenvolvidos modelos matemáticos de otimização linear inteira que são o objeto central deste capítulo.

2.1. O modelo matemático

Para a realização das etapas 2 e 3, apresentadas anteriormente, foram desenvolvidos modelos de otimização linear para alocar as famílias de itens em *macroslots* bem como armazenar os itens pertencentes a uma mesma família em *slots* de armazenagem. Este modelos estão apresentados a seguir.

2.1.1. Modelo de alocação das classes (famílias) em *macroslots* (etapa 2).

O modelo desenvolvido teve por objetivo minimizar o esforço de movimentação de materiais ao definir os locais de armazém para cada uma das classes.

Na etapa 1, os materiais foram classificados em classes de maneira que a classe A compreende os materiais de maior peso de consumo e a C os de menor.

Para cada classe de materiais foi atribuído um peso. A saber: 3 para a classe A, 2 para a classe B e 1 para a C. Assim, espera-se que a família A, de maior peso do consumo, seja alocada mais próxima ao ponto de expedição.

Foram parâmetros importantes para a modelagem:

- a distância de cada *macroslot* ao ponto de expedição;
- o “peso” atribuído a cada classe de materiais (3 para a família A, 2 para a B e 1 para a C).
- a necessidade de cada *macroslot* abrigar uma única família; e
- cada família será alocada em tantos *macroslots* quanto necessários. A quantidade necessária de *macroslots* para uma família foi definida em função da capacidade máxima em peso e em volume de cada *macroslot*.

A partir daí, o problema foi expresso em forma de sentenças matemáticas. O modelo desenvolvido é uma adaptação dos Problemas de Designação e do Problema do Caixeiro Viajante e está apresentado a seguir:

Definição de variáveis:

m o número de famílias;

N o número de *macroslots*;

i o índice que representa as famílias, sendo $i = 1, \dots, m$;

j o índice que representa os *macroslots*, sendo $j = 1, \dots, N$;

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{se a família } i \text{ está alocada no macroslot } j; \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases};$$

$$y_j = \begin{cases} 1, & \text{se o macroslot } j \text{ abriga a família } i; \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases};$$

d_j a distância do *macroslot* j ao ponto de expedição;

p_i o “peso” atribuído a cada família i em função da sua classe;

S_i a quantidade de *macroslots* necessários para alocar cada família i ;

A equação 2.1. apresenta a função objetivo para o modelo:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^N d_j \cdot p_i \cdot x_{i,j} \quad (2.1)$$

A função objetivo expressa o esforço de movimentação dos materiais em função do peso do consumo de cada família e da distância percorrida até a expedição.

Na sequência, as restrições do problema foram escritas. Observe as equações 2.2 e 2.3.

$$\sum_{j=1}^N x_{i,j} = S_i \quad i = \{1, \dots, m\} \quad (2.2)$$

A restrição expressa pela equação 2.2 garante que as famílias sejam alocadas em tantos *macroslots* quanto necessários em função da capacidade em peso e volume de cada um deles.

$$\sum_{i=1}^m x_{i,j} = y_j \quad j = \{1, \dots, N\} \quad (2.3)$$

A equação 2.3. garante que em cada *macroslot* seja alocado apenas uma ou nenhuma família *i*.

Dessa forma, obteve-se o seguinte modelo de otimização.

<p>Função Objetivo:</p> $\text{Min} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^N d_j \cdot p_i \cdot x_{i,j}$ <p>Sujeito a:</p> $\sum_{j=1}^N x_{i,j} = S_i \quad i = \{1, \dots, m\}$ $\sum_{i=1}^m x_{i,j} = y_j \quad j = \{1, \dots, N\}$ $x_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{se a classe } i \text{ ocupa o macroslot } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$ $y_j = \begin{cases} 1, & \text{o macroslot abriga somente uma única classe} \\ 0, & \text{o macroslot permanece vazio} \end{cases}$

Para posterior utilização do software Lingo 17 na otimização, o modelo matemático foi transcrito na linguagem de modelagem utilizada pelo *software*. A seguir, a figura 2.2 apresenta mostrado o modelo, já transcrito na linguagem Lingo.

FIGURA 2.2: Modelo da etapa 2 na linguagem Lingo

```

MODEL:
TITLE: Alocação das Classes nos macroslots;

SETS:
familia /F1, F2, F3/: S, peso;
macroslots /M1..M14/: distancia, y;
custo(familia, macroslots): x;
ENDSETS

DATA:
distancia, S = @OLE('C:\Users\user\Documents\AFA\MONOGRAFIA\Armazem.xlsx');
peso = 3 2 1;
ENDDATA

!Função Objetivo;
[FO] MIN = @SUM(custo(i,j): distancia(j)*peso(i)*x(i,j));

!Cada família ocupará S macroslots;
@FOR (familia(i): [QntMSFamilia]
@SUM(macroslots(j): x(i,j)) = S(i));

!Cada macroslot abriga uma única classe;
@FOR (macroslots(j): [CadaSlotUmaFamilia]
@SUM(familia(i): x(i,j)) = y(j));

! "x" é uma variável binária que indica se a classe está ou não presente
naquele macroslot;
@FOR (custo(i,j): @BIN(x (i,j)));

! "y" é uma variável binária que indica se o macroslot abriga alguma família
ou não;
@FOR (macroslots(j): @BIN(y(j)));

!Exporta os resultados para o campo de nome "SolucaoAlocMS" no Excel;
DATA:
@OLE('C:\Users\user\Documents\AFA\MONOGRAFIA\Armazem.xlsx', 'SolucaoAlocMS')=
x;
ENDDATA

END

```

2.1.2. O modelo de atribuição dos itens nos *slots* (etapa 3).

A etapa 2 teve por objetivo alocar cada família de produtos em *macroslots*.

Feito isso, teve início o desenvolvimento de um segundo modelo de otimização com o objetivo de alocar cada item (SKU), pertencente a uma determinada família, em seu respectivo *slot*, dentro de seu respectivo *macroslot*.

Para este modelo, o objetivo, ainda, é a minimização dos esforços de movimentação, entretanto os parâmetros considerados importantes ao modelo são diferentes. Isso pode ser explicado pelo fato de que o efeito do peso do consumo já foi considerado na etapa 2. Agora é necessário pensar no esforço de movimentação propriamente dito. A movimentação ocorre quando itens são armazenados e expedidos. Assim, o esforço provocado por ela pode ser escrito em função do peso do item, das distâncias totais percorridas e do esforço para elevar e abaixar um determinado item.

Assim, os seguintes fatores foram considerados importantes para o modelo:

- peso unitário do item;
- número de pedidos de compra anuais;
- número de pedidos de separação do item por semana;
- altura do *slot*, pois considerou-se a verticalização do armazém e a dificuldade em colocar ou retirar um item pesado em locais de maior altura;
- as distâncias entre os pontos de recebimento e expedição;
- a necessidade de cada *slot* armazenar um único SKU;
- os itens serão armazenados em tantos *slots* quanto necessários em função da capacidade de peso e volume do slot.

O modelo desenvolvido está apresentado a seguir.

Definição de variáveis

i o índice que representa os u *slots* pertencentes aos *macroslots* designados para alocar a classe A;

k o índice que representa os v *slots* pertencentes aos *macroslots* designados para alocar a classe B;

m o índice que representa os w *slots* pertencentes aos *macroslots* designados para alocar a classe C;

j o índice que representa os r itens (SKUs) pertencentes à classe A;
 l o índice que representa os s itens (SKUs) pertencentes à classe B;
 n o índice que representa os t itens (SKUs) pertencentes à classe C;

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{se a produto } j \text{ está alocada no slot } i; \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases};$$

$$y_{k,l} = \begin{cases} 1, & \text{se a produto } l \text{ está alocada no slot } k; \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases};$$

$$z_{m,n} = \begin{cases} 1, & \text{se a produto } n \text{ está alocada no slot } m; \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases};$$

$$d_i = \begin{cases} 1, & \text{se o slot } i \text{ abriga um único SKU}; \\ 0, & \text{caso esteja vazio} \end{cases};$$

$$d_l = \begin{cases} 1, & \text{se o slot } l \text{ abriga um único SKU}; \\ 0, & \text{caso esteja vazio} \end{cases};$$

$$d_n = \begin{cases} 1, & \text{se o slot } n \text{ abriga um único SKU}; \\ 0, & \text{caso esteja vazio} \end{cases};$$

T_j a quantidade de *slots* necessária para alocar os itens j , da família A;

U_l a quantidade de *slots* necessária para alocar os itens l , da família B;

V_n a quantidade de *slots* necessária para alocar os itens n , da família C;

$coefA_{i,j}$ o coeficiente calculado que representa o esforço de movimentação a depender de características do *slot* i e do item j alocado;

$coefB_{k,l}$ o coeficiente calculado que representa o esforço de movimentação a depender de características do *slot* k e do item l alocado;

$coefC_{m,n}$ o coeficiente calculado que representa o esforço de movimentação a depender de características do *slot* m e do item n alocado.

A função objetivo está apresentada pela equação 2.4 e representa o esforço de movimentação dos itens no armazém.

$$Min \left(\sum_{i=1}^u \sum_{j=1}^r coefA_{i,j} \cdot x_{i,j} + \sum_{k=1}^v \sum_{l=1}^s coefB_{k,l} \cdot y_{k,l} + \sum_{m=1}^w \sum_{n=1}^t coefC_{m,n} \cdot z_{m,n} \right) \quad (2.4)$$

Em que:

$$coefA_{i,j} = (P_j \cdot dE_i \cdot Ns_j \cdot n_i) + (P_j \cdot dR_i \cdot Nc_j \cdot n_i) \quad (2.5)$$

$$coefB_{k,l} = (P_l \cdot dE_k \cdot Ns_l \cdot n_k) + (P_l \cdot dR_k \cdot Nc_l \cdot n_k) \quad (2.6)$$

$$coefC_{m,n} = (P_n \cdot dE_m \cdot Ns_n \cdot n_m) + (P_n \cdot dR_m \cdot Nc_n \cdot n_m) \quad (2.7)$$

Onde;

P_j, P_l e P_n os pesos unitários dos itens j, l e n ;

NS_j, NS_l e NS_n os números de pedidos de separação na semana dos itens j, l e n ;

NC_j, NC_l e NC_n os números de pedidos de compra dos itens j, l e n ;

n_i, n_k e n_m as alturas (níveis) de cada *slot* i, k e m , assumindo os valores 1, 2, 3 ou 4 se o *slot* estiver no 1º, 2º, 3º ou 4º níveis respectivamente;

dR_i, dR_k e dR_m as distâncias dos *slots* i, k e m , respectivamente, ao ponto de recebimento (Apêndice A); e

dE_i, dE_k e dE_m as distâncias dos *slots* i, k e m , respectivamente, ao ponto de expedição (Apêndice A).

Na sequência, as restrições do problema foram escritas. Observe as equações 2.8 a 2.10.

$$\sum_{i=1}^u x_{i,j} = T_j \quad \forall j \quad (2.8)$$

$$\sum_{k=1}^v y_{k,l} = U_l \quad \forall l \quad (2.9)$$

$$\sum_{m=1}^w z_{m,n} = V_n \quad \forall n \quad (2.10)$$

As restrições expressas nas equações 2.8 a 2.10 garantem que cada item seja armazenado em tantos *slots* quanto necessários.

$$\sum_{j=1}^r x_{i,j} = d_i \quad \forall i \quad (2.11)$$

$$\sum_{l=1}^s y_{k,l} = e_k \quad \forall k \quad (2.12)$$

$$\sum_{n=1}^t z_{m,n} = f_m \quad \forall m \quad (2.13)$$

Já as restrições expressas nas equações 2.11 a 2.13 garantem que cada *slot*, se ocupado, abrigue um único tipo de item, ou então, permaneça vazio.

$$x_{i,j} \leq x_{(i+1,j)} + x_{(i-1,j)} + x_{(i+4,j)} + x_{(i-4,j)} \quad (2.14)$$

$$y_{k,l} \leq y_{(k+1,l)} + y_{(k-1,l)} + y_{(k+4,l)} + y_{(k-4,l)} \quad (2.15)$$

$$z_{m,n} \leq z_{(m+1,n)} + z_{(m-1,n)} + z_{(m+4,n)} + z_{(m-4,n)} \quad (2.16)$$

Já as restrições expressas nas equações 2.14 a 2.16 garantem que para cada *slot* ocupado com um item, deve haver outro *slot* (ou nas laterais, ou acima ou abaixo) ocupado com o mesmo item, para que dificulte a alocação aleatorizada dos itens.

Dessa forma, obteve-se o seguinte modelo matemático.

Função objeto:

$$\text{Min} \left(\sum_{i=1}^u \sum_{j=1}^r \text{coef} A_{i,j} \cdot x_{i,j} + \sum_{k=1}^v \sum_{l=1}^s \text{coef} B_{k,l} \cdot y_{k,l} + \sum_{m=1}^w \sum_{n=1}^t \text{coef} C_{m,n} \cdot z_{m,n} \right)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^u x_{i,j} = T_j \quad \forall j; \quad \sum_{k=1}^v y_{k,l} = U_l \quad \forall l; \quad \sum_{m=1}^w z_{m,n} = V_n \quad \forall n$$

$$\sum_{j=1}^r x_{i,j} = d_i \quad \forall i; \quad \sum_{l=1}^s y_{k,l} = e_k \quad \forall k; \quad \sum_{n=1}^t z_{m,n} = f_m \quad \forall m$$

$$x_{i,j} \leq x_{(i+1,j)} + x_{(i-1,j)} + x_{(i+4,j)} + x_{(i-4,j)}$$

$$y_{k,l} \leq y_{(k+1,l)} + y_{(k-1,l)} + y_{(k+4,l)} + y_{(k-4,l)}$$

$$z_{m,n} \leq z_{(m+1,n)} + z_{(m-1,n)} + z_{(m+4,n)} + z_{(m-4,n)}$$

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{se o slot } i \text{ estiver ocupado com o item } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$y_{k,l} = \begin{cases} 1, & \text{se o slot } k \text{ estiver ocupado com o item } l \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$z_{m,n} = \begin{cases} 1, & \text{se o slot } m \text{ estiver ocupado com o item } n \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$d_i = \begin{cases} 1, & \text{se o slot } i \text{ estiver ocupado com um único tipo de item} \\ 0, & \text{se estiver vazio} \end{cases}$$

$$e_k = \begin{cases} 1, & \text{se o slot } k \text{ estiver ocupado com um único tipo de item} \\ 0, & \text{se estiver vazio} \end{cases}$$

$$f_m = \begin{cases} 1, & \text{se o slot } m \text{ estiver ocupado com um único tipo de item} \\ 0, & \text{se estiver vazio} \end{cases}$$

Da mesma forma que o modelo anterior, este também foi transcrito na linguagem do Lingo. Observe a figura 2.3.

FIGURA 2.3: Modelo etapa 3 na linguagem Lingo

```

MODEL:
TITLE: Alocação dos Itens na Área de cada Classe;

SETS:
!Dados itens A;
itensA
/@OLE('C:\Users\user\Documents\AFA\MONOGRAFIA\Armazem.xlsx','itensA')/:T;
slotsA
/@OLE('C:\Users\user\Documents\AFA\MONOGRAFIA\Armazem.xlsx','slotsA')/:d;
possibilidadesA (slotsA, itensA): coefA, x;
!Dados itens B;
itensB
/@OLE('C:\Users\user\Documents\AFA\MONOGRAFIA\Armazem.xlsx','itensB')/:U;
slotsB
/@OLE('C:\Users\user\Documents\AFA\MONOGRAFIA\Armazem.xlsx','slotsB')/:e;
possibilidadesB (slotsB, itensB): coefB, y;
!Dados itens C;
itensC
/@OLE('C:\Users\user\Documents\AFA\MONOGRAFIA\Armazem.xlsx','itensC')/:V;
slotsC
/@OLE('C:\Users\user\Documents\AFA\MONOGRAFIA\Armazem.xlsx','slotsC')/:f;
possibilidadesC (slotsC, itensC): coefC, z;
ENDSETS

DATA:
coefA, coefB, coefC, T, U, V =
@OLE('C:\Users\user\Documents\AFA\MONOGRAFIA\Armazem.xlsx');
ENDDATA

!Função Objetivo;
[FO] MIN = @SUM(possibilidadesA(i,j):
coefA(i,j)*x(i,j))+@SUM(possibilidadesB(k,l):
coefB(k,l)*y(k,l))+@SUM(possibilidadesC(m,n): coefC(m,n)*z(m,n));

!Cada item(i ou k ou m) ocupará T ou U ou V slots;
@FOR (itensA(j): [QntSlotCadaItemA] @SUM(slotsA(i): x(i,j)) = T(j));
@FOR (itensB(l): [QntSlotCadaItemB] @SUM(slotsB(k): y(k,l)) = U(l));
@FOR (itensC(n): [QntSlotCadaItemC] @SUM(slotsC(m): z(m,n)) = V(n));

!Cada slot ou abriga uma única classe ou está vazio;
@FOR (slotsA(i): [CadaSlotUmItemA] @SUM(itensA(j): x(i,j)) = d(i));
@FOR (slotsB(k): [CadaSlotUmItemB] @SUM(itensB(l): y(k,l)) = e(k));
@FOR (slotsC(m): [CadaSlotUmItemC] @SUM(itensC(n): z(m,n)) = f(m));

! "x", "y" e "z" são variáveis binárias que indicam se o item está ou não
presente naquele slot;
@FOR (possibilidadesA(i,j): @BIN(x (i,j)));
@FOR (possibilidadesB(k,l): @BIN(y (k,l)));
@FOR (possibilidadesC(m,n): @BIN(z (m,n)));

```

FIGURA 2.3: Modelo etapa 3 na linguagem Lingo (Continuação)

```

! "d", "e" e "f" são variáveis binárias que indicam se o slot está ou não
ocupado;
@FOR (slotsA(i): @BIN(d (i)));
@FOR (slotsB(k): @BIN(e (k)));
@FOR (slotsC(m): @BIN(f (m)));

!Caso o slot esteja ocupado, garante que no mínimo mais algum slot adjacente
também esteja;
@FOR (possibilidadesA(i,j): [OcupaAdjacenteA] x(i,j) <=
x(@wrap(i+1,@size(slotsA)),j) +x(@wrap(i-1,@size(slotsA)),j)
+x(@wrap(i+4,@size(slotsA)),j) +x(@wrap(i-4,@size(slotsA)),j));

@FOR (possibilidadesB(k,l): [OcupaAdjacenteB] y(k,l) <=
y(@wrap(k+1,@size(slotsB)),l) +y(@wrap(k-1,@size(slotsB)),l)
+y(@wrap(k+4,@size(slotsB)),l) +y(@wrap(k-4,@size(slotsB)),l));

@FOR (possibilidadesC(m,n): [OcupaAdjacenteC] z(m,n) <=
z(@wrap(m+1,@size(slotsC)),n) +z(@wrap(m-1,@size(slotsC)),n)
+z(@wrap(m+4,@size(slotsC)),n) +z(@wrap(m-4,@size(slotsC)),n));

!Exporta os dados para a planilha no Excel;
DATA:
@OLE('C:\Users\user\Documents\AFA\MONOGRAFIA\Armazem.xlsx','resultadoA',
'resultadoB', 'resultadoC')= x, y, z;
ENDDATA

END

```

3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO REALIZADA

Simon (1965) considera que o ser humano é incapaz de avaliar todas as possibilidades e consequências de muitas situações que se apresentam, pois existem limites aos quais a mente humana está sujeita. Dessa forma, se fosse possível visualizar todos os efeitos de determinadas decisões antes mesmo que elas fossem de fato tomadas serviria de grande auxílio ao gerenciador. E é aí que se encontra a importância da simulação.

Segundo Winston (2004, *apud* TEODORO, 2016, p. 30), a simulação pode ser definida como uma “uma técnica que imita o funcionamento de um sistema do mundo real à medida que evolui ao longo do tempo”. Normalmente, é realizada por meio de um modelo de simulação elaborado a partir de um conjunto de suposições sobre o funcionamento do sistema.

Diante disso, este capítulo apresenta os resultados da otimização, em dois ambientes simulados, realizada utilizando-se os modelos descritos no capítulo 2 e o *software* Lingo 17. A licença do *software* Lingo foi cedida pela empresa proprietária do *software* e está no anexo A deste trabalho.

Neste trabalho monográfico utilizou-se a geração de números aleatórios para criar um ambiente simulado sem vícios para a análise do modelo. Assim, as demandas anuais dos itens, o número de pedidos de compra emitidos ao fornecedor no ano, o peso unitário e a capacidade do *slot* em função do volume armazenado foram gerados por meio de números aleatórios utilizando uma planilha eletrônica.

3.1. O armazém simulado

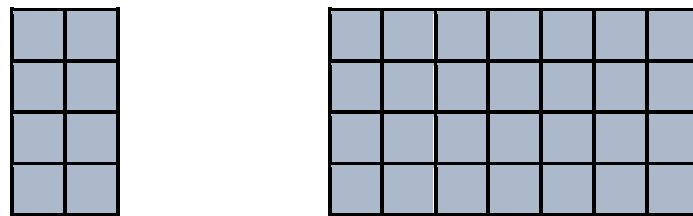
Neste trabalho monográfico foi utilizado um ambiente simulado para estudo de um armazém convencional. Isso permite que o modelo seja utilizado para qualquer configuração de armazém mediante apenas a redefinição dos parâmetros do modelo.

O armazém simulado, utilizado neste trabalho monográfico, tem as seguintes características:

- Área de $1500m^2$ ($30m \times 50m$);
- 28 estantes agrupadas por duplas (cada duplas foi denominada de *macroslots*);
- Cada um dos *macroslots* possui 4 níveis ou alturas;
- Cada *macroslot* possui 14 *slots* em cada nível, totalizando 56 *slots* por *macroslot* e 784 *slots* em todo o armazém;

A figura 3.1. apresenta as vistas lateral e frontal de um *macroslot*.

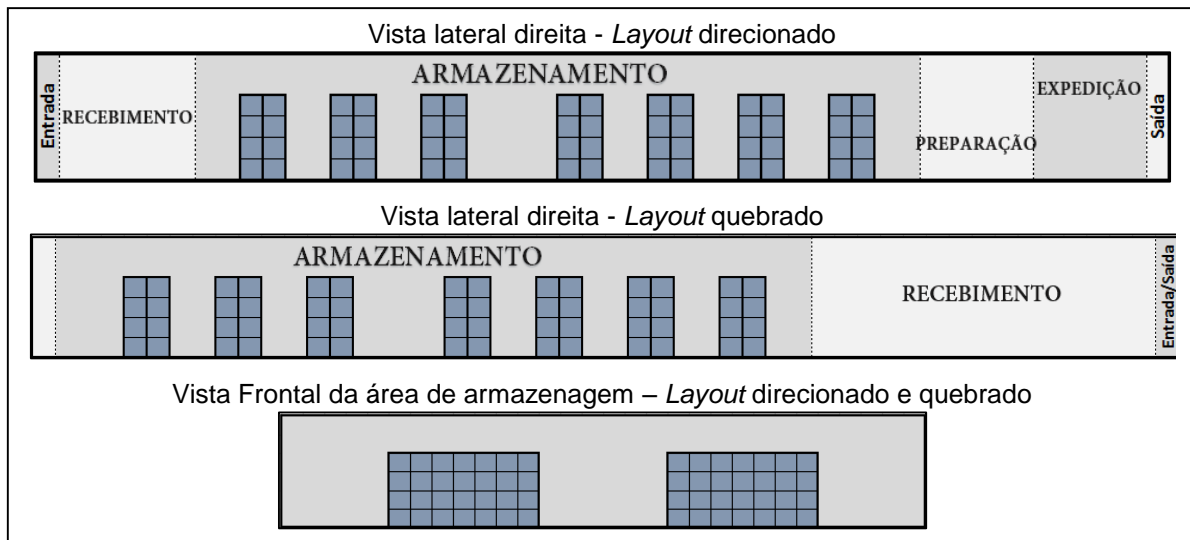
FIGURA 3.1 - Vista lateral (esq.) e frontal (dir.) de um *macroslot* e seus *slots*



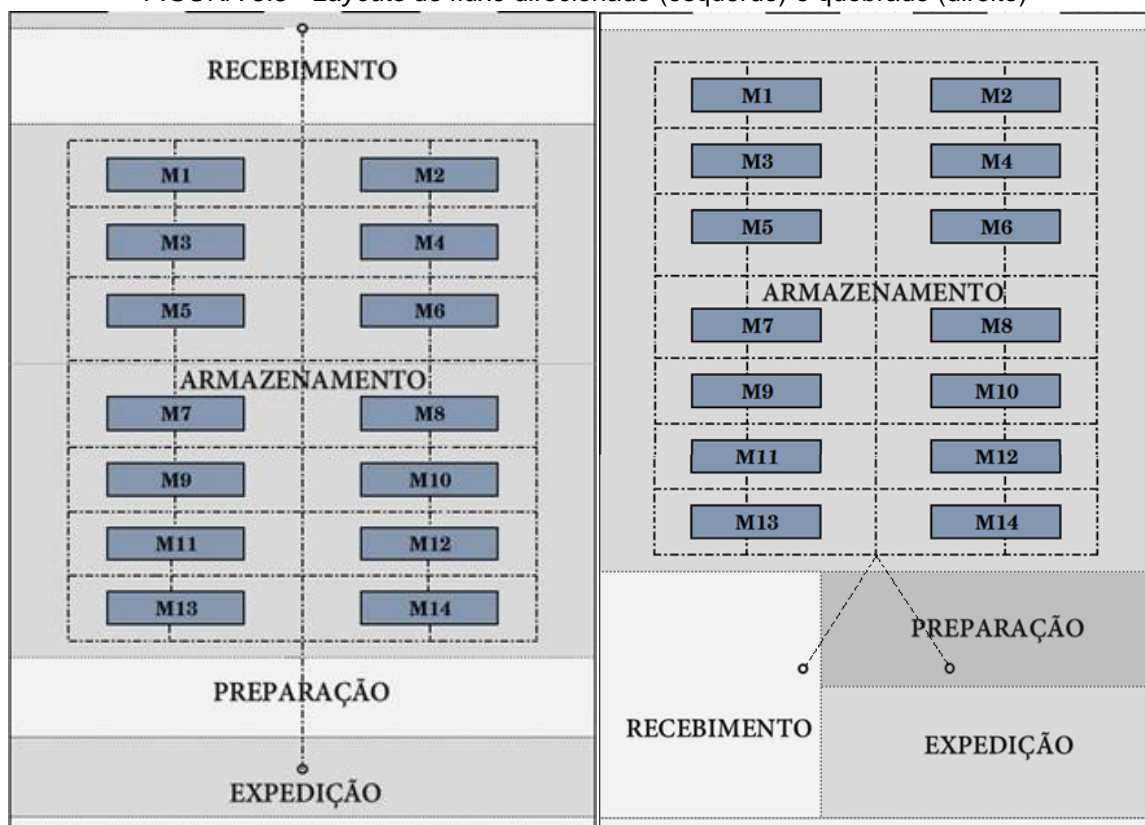
- Cada fração do *macroslot* de $1m^3$ ($1m \times 1m \times 1m$) foi denominada de *slot*. Para fins de simulação, foi determinada aleatoriamente a quantidade de itens que cada *slot* pode armazenar em função da sua capacidade de volume (Cv). Esta quantidade foi gerada aleatoriamente com variação permitida de 10 a 60 itens;
- Cada *slot* suporta, no máximo, 50 Kg;
- Cada *slot* abriga somente um tipo de produto; e
- Cada *macroslot* abriga somente materiais de uma única classe.

Para fins de simulação, comparação e análise do modelo, foram simulados dois armazéns com diferentes *layouts*: o primeiro com fluxo direcionado e o segundo com fluxo quebrado ambos com corredores de movimentação tradicionais. A adoção de rotas de movimentação fixas e de retorno teve por objetivo simplificar a determinação das distâncias e a modelagem matemática. Observe a figura 3.2 que apresenta as vistas laterais direita e frontal do armazém simulado (expedição).

FIGURA 3.2 - Vista lateral e frontal do armazém



Já a figura 3.3 apresenta a planta baixa do armazém utilizado na simulação.

FIGURA 3.3 - *Layouts* de fluxo direcionado (esquerdo) e quebrado (direito)

Para compreensão dos resultados obtidos por meio dos modelos matemáticos apresentados no capítulo 2, os *slots* foram numerados. As Figuras 3.4a e 3.4b apresentam o esquema de numeração dos *slots* do armazém.

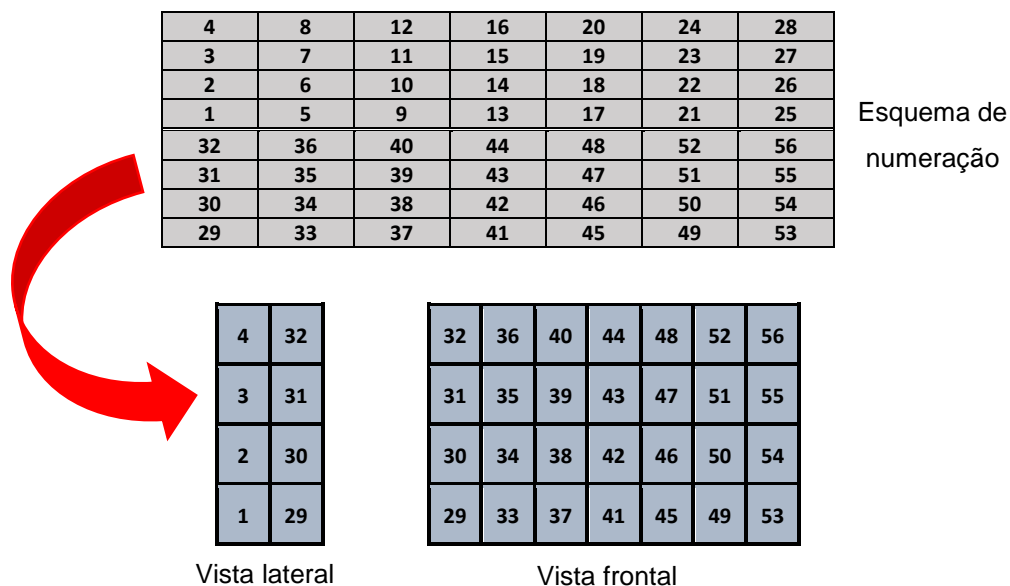


Macroslot 1

FIGURA 3.4a – Esquema de numeração dos slots

4	8	12	16	20	24	28
3	7	11	15	19	23	27
2	6	10	14	18	22	26
1	5	9	13	17	21	25
32	36	40	44	48	52	56
31	35	39	43	47	51	55
30	34	38	42	46	50	54
229	33	37	41	45	49	53
116	120	124	128	132	136	140
115	119	123	127	131	135	139
114	118	122	126	130	134	138
113	117	121	125	129	133	137
144	148	152	156	160	164	168
143	147	151	155	159	163	167
142	146	150	154	158	162	166
141	145	149	153	157	161	165
228	232	236	240	244	248	252
227	231	235	239	243	247	251
226	230	234	238	242	246	250
225	229	233	237	241	245	249
256	260	264	268	272	276	280
255	259	263	267	271	275	279
254	258	262	266	270	274	278
253	257	261	265	269	273	277
340	344	348	352	356	360	364
339	343	347	351	355	359	363
338	342	346	350	354	358	362
337	341	345	349	353	357	361
368	372	376	380	384	388	392
367	371	375	379	383	387	391
366	370	374	378	382	386	390
365	369	373	377	381	385	389
452	456	460	464	468	472	476
451	455	459	463	467	471	475
450	454	458	462	466	470	474
449	453	457	461	465	469	473
480	484	488	492	496	500	504
479	483	487	491	495	499	503
478	482	486	490	494	498	502
477	481	485	489	493	497	501
564	568	572	576	580	584	588
563	567	571	575	579	583	587
562	566	570	574	578	582	586
561	565	569	573	577	581	585
592	596	600	604	608	612	616
591	595	599	603	607	611	615
590	594	598	602	606	610	614
589	593	597	601	605	609	613
676	680	684	688	692	696	700
675	679	683	687	691	695	699
674	678	682	686	690	694	698
673	677	681	685	689	693	697
704	708	712	716	720	724	728
703	707	711	715	719	723	727
702	706	710	714	718	722	726
701	705	709	713	717	721	725
60	64	68	72	76	80	84
59	63	67	71	75	79	83
58	62	66	70	74	78	82
57	61	65	69	73	77	81
88	92	96	100	104	108	112
87	91	95	99	103	107	111
86	90	94	98	102	106	110
85	89	93	97	101	105	109
172	176	180	184	188	192	196
171	175	179	183	187	191	195
170	174	178	182	186	190	194
169	173	177	181	185	189	193
200	204	208	212	216	220	224
199	203	207	211	215	219	223
198	202	206	210	214	218	222
197	201	205	209	213	217	221
284	288	292	296	300	304	308
283	287	291	295	299	303	307
282	286	290	294	298	302	306
281	285	289	293	297	301	305
312	316	320	324	328	332	336
311	315	319	323	327	331	335
310	314	318	322	326	330	334
309	313	317	321	325	329	333
396	400	404	408	412	416	420
395	399	403	407	411	415	419
394	398	402	406	410	414	418
393	397	401	405	409	413	417
424	428	432	436	440	444	448
423	427	431	435	439	443	447
422	426	430	434	438	442	446
421	425	429	433	437	441	445
508	512	516	520	524	528	532
507	511	515	519	523	527	531
506	510	514	518	522	526	530
505	509	513	517	521	525	529
536	540	544	548	552	556	560
535	539	543	547	551	555	559
534	538	542	546	550	554	558
533	537	541	545	549	553	557
620	624	628	632	636	640	644
619	623	627	631	635	639	643
618	622	626	630	634	638	642
617	621	625	629	633	637	641
648	652	656	660	664	668	672
647	651	655	659	663	667	671
646	650	654	658	662	666	670
645	649	653	657	661	665	669
732	736	740	744	748	752	756
731	735	739	743	747	751	755
730	734	738	742	746	750	754
729	733	737	741	745	749	753
760	764	768	772	776	780	784
759	763	767	771	775	779	783
758	762	766	770	774	778	782
757	761	765	769	773	777	781

4
3
2
1
4
3
2
1
.
.
.

FIGURA 3.4b – Esquema de numeração dos *slots* (detalhamento da numeração *macroslot* 1)

Como processador, foi utilizado neste trabalho monográfico um *notebook* convencional *Acer* com um sistema operacional *Windows 8.1 Pro*⁸ 64 bits, um processador *Intel Core i5* de 2.40 GHz e uma memória RAM de 3 GB (2,85 GB utilizáveis).

Já, para a resolução do modelo matemático, foi empregado o *software* Lingo 17.0⁸ por ser uma ferramenta poderosa na otimização de problemas de programação linear, não-linear, quadrática, dentre outros, e por possuir uma linguagem de fácil assimilação, com mais possibilidades de simplificação de expressões quando comparado a outros *softwares* relacionados. Foi disponibilizado para fins educacionais uma *license key* para a versão completa do *software*, sem limitação quanto ao número de variáveis e restrições, conforme apresenta o Anexo A.

3.2. Os dados utilizados na simulação

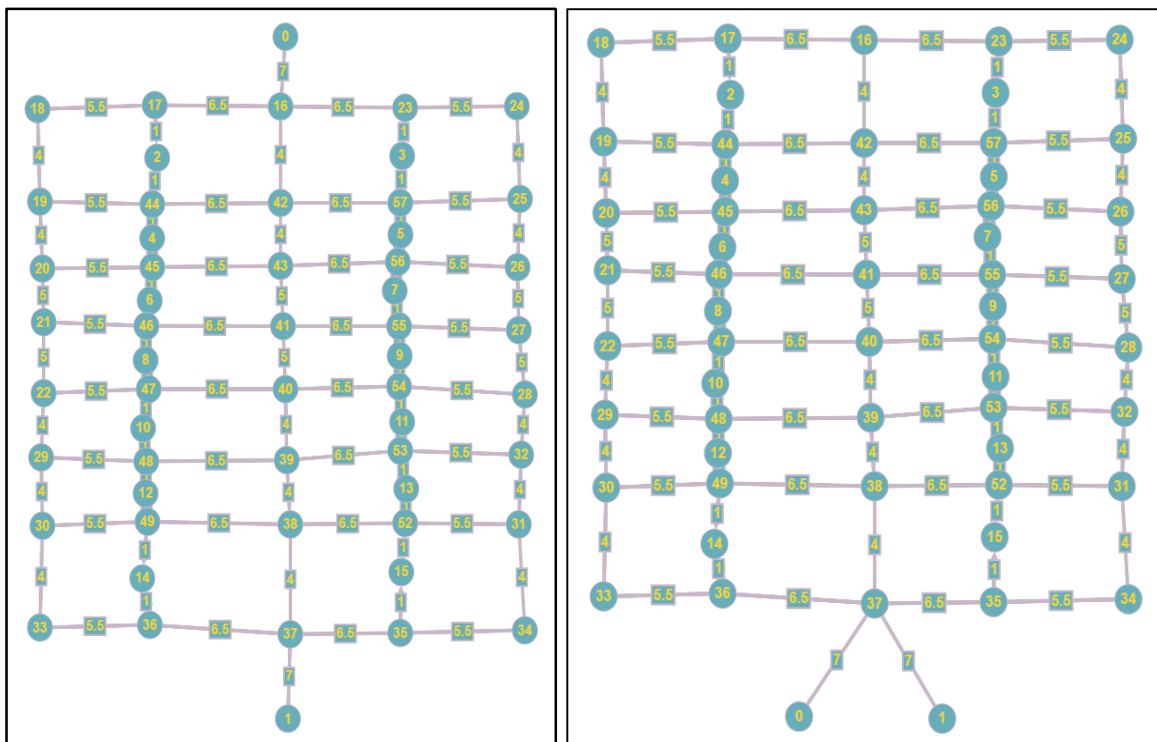
Como a simulação apresentada neste trabalho foi realizada com dados fictícios, a fim de evitar a especialização do modelo, este item descreve como esses dados foram gerados.

⁸ Disponível no endereço <https://www.lindo.com/index.php/ls-downloads/try-lingo>

- **Distâncias**

Para a determinação das distâncias entre cada *macroslot/slot* e pontos de recebimento e expedição, para ambos os tipos de *layout*, foi utilizada a plataforma *Graph Online*⁹, que é de interface simples e uso prático. Para o cálculo das distâncias, por meio dessa plataforma, foram inseridos vértices (representando os *macroslots/slots* e os nós dos caminhos) e estabelecidas conexões (representando as distâncias com seus respectivos valores), gerando um grafo para cada tipo de *layout*. Os grafos criados estão representados na Figura 3.5.

FIGURA 3.5 – Grafo do *layout* direto (esquerda) e quebrado (direita)



A plataforma possui uma limitação de 300 vértices para realizar o cálculo das distâncias.

⁹ Disponível no endereço <http://graphonline.ru/en/>

Depois do grafo pronto, foi gerada a matriz distância, que relaciona as distâncias de um vértice ao outro. Os valores das distâncias foram então transferidos para uma planilha eletrônica e estão apresentadas no Quadro 3.1.

QUADRO 3.1 – Distância de cada *macroslot* ao ponto de recebimento (R) e expedição (E)

Layout Direto

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
R	14.5	14.5	18.5	18.5	22.5	22.5	27.5	27.5	32.5	32.5	36.5	36.5	40.5	40.5
E	40.5	40.5	36.5	36.5	31.5	31.5	26.5	26.5	22.5	22.5	18.5	18.5	14.5	14.5

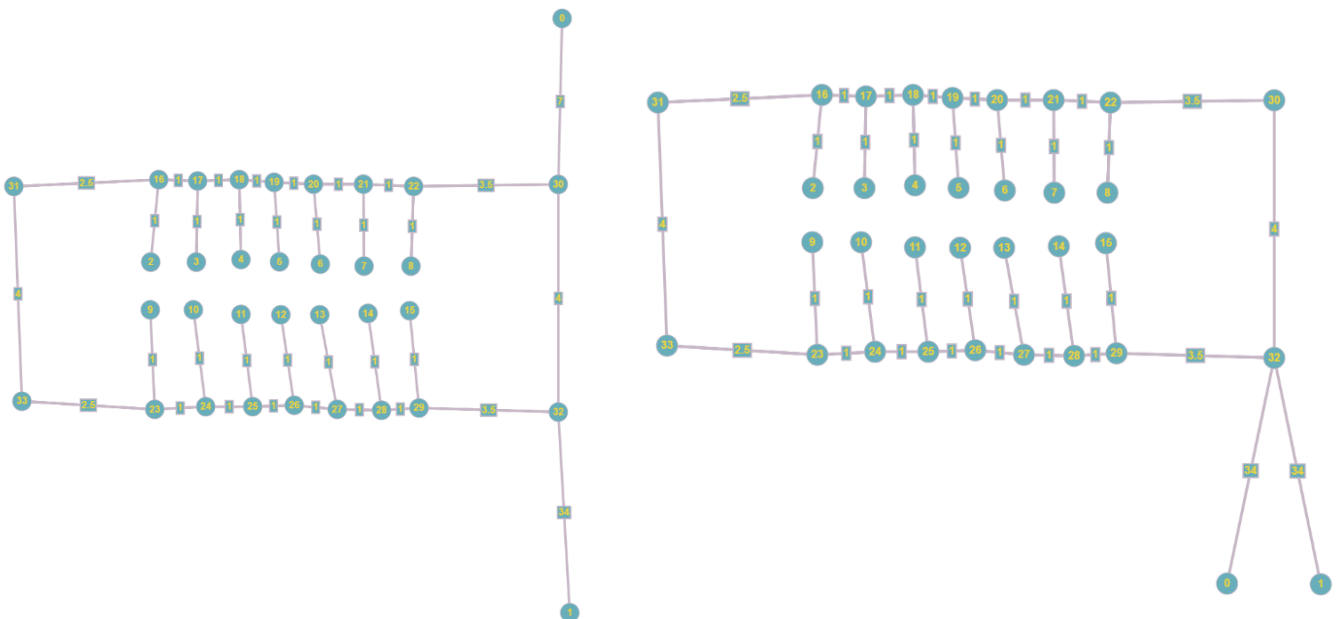
Layout Quebrado

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
R	40.5	40.5	36.5	36.5	31.5	31.5	26.5	26.5	22.5	22.5	18.5	18.5	14.5	14.5
E	40.5	40.5	36.5	36.5	31.5	31.5	26.5	26.5	22.5	22.5	18.5	18.5	14.5	14.5

Em seguida, foram determinadas as distâncias de cada *slot* aos pontos de recebimento e expedição. Como a capacidade da plataforma *Graph Online* impossibilitou a geração de todas as distâncias simultaneamente, optou-se por gerá-las para cada *macroslot* separadamente.

Dessa forma, todas as posições de cada *slot* nos *macroslot* foram estruturadas em forma de grafo, como mostra os exemplos na figura 3.6.

FIGURA 3.6 – Grafo de um *macroslot* nos *layouts* direcionado (dir.) e quebrado (esq.)



À medida que cada um desses grafos era montado foi necessário somente alterar as distâncias e as posições das rotas que partiam do *macroslot em direção* aos pontos de recebimento e de expedição.

O conjunto de todos os grafos obtidos, então, gerou uma matriz distância e os dados relevantes estão apresentadas no Apêndice A.

- **Número de itens a serem armazenados e suas demandas**

Inicialmente foi determinada, arbitrariamente, que a quantidade de 40 SKUs seriam estocados nos armazéns.

Para cada um desses SKUs foram gerados aleatoriamente informações importantes para o modelo. São elas:

- demanda anual (D_a): aleatória, variando entre 100 e 1500 unidades. Os limites foram determinados arbitrariamente;
- número de pedidos de compras emitidos ao fornecedor no ano (N_c): aleatório, variando entre 5 e 10 pedidos anuais. Os limites foram determinados arbitrariamente;
- peso (P): aleatório, variando entre 1 e 10 Kg. Os limites foram determinados arbitrariamente;
- capacidade de itens que o *slot* pode armazenar tendo por base o volume (C_v): aleatório, entre 10 e 60 itens. Os limites foram determinados arbitrariamente;
- número de pedidos de separação na semana (N_s): aleatório, entre 1 e N_{max} itens. Os limites foram determinados arbitrariamente;

A partir das informações geradas aleatoriamente, foi possível calcular:

- peso total do pedido (P_t): $P \cdot \frac{D_a}{N_c}$ (Kg);
- quantidade de itens por pedido de compra (Q_c): $\frac{D_a}{N_c}$ itens;
- intervalo entre pedidos de compra (considerando 52 semanas anuais) (T_c): $\frac{52 \text{ semanas}}{Q_c}$ (semanas);

- número máximo de pedidos de separação por semana (N_{max}):
 $\frac{T_c}{Q_c}$ itens;
- quantidade média de cada tipo de item por pedido (considerando 52 semanas anuais) (Q): $\frac{D_a}{52 \text{ semanas} \cdot N_s}$ (unid.);
- capacidade de itens que o *slot* pode armazenar tendo por base o peso (cada *slot* suporta 50 Kg, no máximo) (C_p): $\frac{50}{P}$ unidades, arredondado para baixo conforme a necessidade;
- número de *slots* necessários para alocar o pedido com base no volume (S_v): $\frac{D_a/N_c}{C_v}$ *slots*, arredondado para cima conforme necessidade;
- número de *slots* necessários para alocar o pedido com base no peso (S_p): $\frac{D_a/N_c}{C_p}$ *slots*, arredondado para cima conforme necessidade;
- número resultante de *slots* necessários para alocar o pedido (S):
 $\max(S_v; S_p)$ *slots*.

No Quadro 3.2 estão sintetizados os parâmetros utilizadas na simulação.

QUADRO 3.2 - Informações utilizadas na simulação

	D_a	N_c	P	P_t	Q_c	T_c	N_{max}	N_s	Q_p	C_v	C_p	S_v	S_p	S
1	228	9	3.16	80.06	25	5.77	4	4	1.1	26	15	1	2	2
2	1074	5	3.62	777.58	214	10.4	20	17	1.22	25	13	9	17	17
3	1133	6	8.74	1650.41	188	8.66	21	15	1.46	56	5	4	38	38
4	1427	7	9.49	1934.61	203	7.42	27	10	2.75	55	5	4	41	41
5	580	10	2.09	121.22	58	5.2	11	9	1.24	27	23	3	3	3
6	603	10	5.84	352.16	60	5.2	11	1	11.6	34	8	2	8	8
7	271	9	3.04	91.54	30	5.77	5	4	1.31	56	16	1	2	2
8	906	5	6.62	1199.55	181	10.4	17	8	2.18	35	7	6	26	26
9	1131	8	4.97	702.64	141	6.5	21	8	2.72	18	10	8	15	15
10	189	7	7.05	190.35	27	7.42	3	3	1.22	17	7	2	4	4
11	1086	9	4.68	564.72	120	5.77	20	12	1.75	48	10	3	13	13
12	1231	9	6.4	875.38	136	5.77	23	21	1.13	42	7	4	20	20
13	209	6	1.85	64.45	34	8.66	3	2	2.01	50	27	1	2	2
14	393	8	4.08	200.43	49	6.5	7	2	3.78	39	12	2	5	5

QUADRO 3.2 - Informações utilizadas na simulação (Continuação)

	<i>Da</i>	<i>Nc</i>	<i>P</i>	<i>Pt</i>	<i>Qc</i>	<i>Tc</i>	<i>Nmax</i>	<i>Ns</i>	<i>Qp</i>	<i>Cv</i>	<i>Cp</i>	<i>Sv</i>	<i>Sp</i>	<i>S</i>
15	147	5	1.21	35.58	29	10.4	2	2	1.42	16	41	2	1	2
16	724	6	4.06	489.91	120	8.66	13	3	4.65	50	12	3	11	11
17	685	10	1.05	71.93	68	5.2	13	6	2.2	37	47	2	2	2
18	427	7	5.9	359.9	61	7.42	8	4	2.06	56	8	2	8	8
19	1030	7	8.36	1230.12	147	7.42	19	1	19.81	48	5	4	30	30
20	504	7	8.6	619.2	72	7.42	9	3	3.24	49	5	2	15	15
21	1179	10	7.52	886.61	117	5.2	22	7	3.24	38	6	4	20	20
22	1454	8	6.55	1190.47	181	6.5	27	27	1.04	60	7	4	26	26
23	867	5	3.57	619.04	173	10.4	16	14	1.2	20	14	9	13	13
24	1130	9	1.71	214.7	125	5.77	21	10	2.18	51	29	3	5	5
25	614	9	1.67	113.94	68	5.77	11	10	1.19	29	29	3	3	3
26	505	8	3.66	231.04	63	6.5	9	1	9.72	32	13	2	5	5
27	253	6	7.55	318.36	42	8.66	4	4	1.22	42	6	2	8	8
28	907	7	6.73	872.02	129	7.42	17	12	1.46	57	7	3	19	19
29	455	10	7.06	321.23	45	5.2	8	8	1.1	31	7	2	7	7
30	1085	6	6.77	1224.25	180	8.66	20	10	2.09	36	7	6	26	26
31	931	10	9.81	913.32	93	5.2	17	13	1.38	52	5	2	19	19
32	1236	6	4.28	881.68	206	8.66	23	4	5.95	23	11	9	19	19
33	815	5	1.82	296.66	163	10.4	15	10	1.57	25	27	7	7	7
34	928	8	8.93	1035.88	116	6.5	17	10	1.79	10	5	12	24	24
35	532	9	5.23	309.16	59	5.77	10	4	2.56	39	9	2	7	7
36	556	10	9.15	508.74	55	5.2	10	6	1.79	55	5	2	12	12
37	1052	9	9.79	1144.35	116	5.77	20	20	1.02	51	5	3	24	24
38	415	10	5.74	238.21	41	5.2	7	7	1.15	50	8	1	6	6
39	1175	5	3.4	799	235	10.4	22	6	3.77	13	14	19	17	19
40	811	10	10	811	81	5.2	15	5	3.12	60	5	2	17	17
SOMA	30878	310		24541.4					117.39			162	547	550

3.2. A classificação dos itens

Como dito anteriormente, para a realização das simulações, foi adotada, neste trabalho, a política de armazenagem baseada em classes de materiais.

Para separar os itens em classes foi utilizada a Classificação ABC, por ser de ampla utilização na gestão de armazéns e por permitir identificar os itens de maior importância para a organização e dedicar maior cuidado e atenção a eles.

No caso deste trabalho, os atributos utilizados para a classificação foram o peso unitário do item e sua demanda anual. Diante disso, espera-se que os itens de maior peso do consumo sejam posicionados em locais próximos à área de expedição.

O resultados da classificação dos 40 itens utilizados nesta simulação estão apresentados no quadro 3.3.

QUADRO 3.3 – Classificação ABC

Ranking	Produto	Da x P	% Indiv.	% Acum.	Classificação	Slots / Prod.	Slots / Classe	Macroslots
1	4	13542.23	7.419	7.419	A	41	423	8
2	37	10299.08	5.642	13.061	A	24		
3	3	9902.42	5.425	18.486	A	38		
4	22	9523.7	5.217	23.703	A	26		
5	31	9133.11	5.003	28.706	A	19		
6	21	8866.08	4.857	33.563	A	20		
7	19	8610.8	4.717	38.28	A	30		
8	34	8287.04	4.54	42.82	A	24		
9	40	8110	4.443	47.263	A	17		
10	12	7878.4	4.316	51.579	A	20		
11	30	7345.45	4.024	55.603	A	26		
12	28	6104.11	3.344	58.947	A	19		
13	8	5997.72	3.285	62.232	A	26		
14	9	5621.07	3.079	65.311	A	15		
15	32	5290.08	2.898	68.209	A	19		
16	36	5087.4	2.787	70.996	A	12		
17	11	5082.48	2.784	73.78	A	13		
18	20	4334.4	2.374	76.154	A	15		
19	39	3995	2.188	78.342	A	19		
20	2	3887.88	2.13	80.472	B	17	95	2
21	6	3521.52	1.929	82.401	B	8		
22	29	3212.3	1.759	84.16	B	7		
23	23	3095.19	1.695	85.855	B	13		
24	16	2939.44	1.61	87.465	B	11		
25	35	2782.36	1.524	88.989	B	7		
26	18	2519.3	1.38	90.369	B	8		
27	38	2382.1	1.305	91.674	B	6		
28	24	1932.3	1.058	92.732	B	5		
29	27	1910.15	1.046	93.778	B	8		
30	26	1848.3	1.012	94.79	B	5		
31	14	1603.44	0.878	95.668	C	5	32	1
32	33	1483.3	0.812	96.48	C	7		
33	10	1332.45	0.73	97.21	C	4		
34	5	1212.2	0.664	97.874	C	3		
35	25	1025.38	0.561	98.435	C	3		
36	7	823.84	0.451	98.886	C	2		
37	1	720.48	0.394	99.28	C	2		
38	17	719.25	0.394	99.674	C	2		
39	13	386.65	0.211	99.885	C	2		
40	15	177.87	0.097	99.982	C	2		
		182526.27					Macroslots Vazios	3

3.3. Otimização da alocação das classes nos *macroslots*

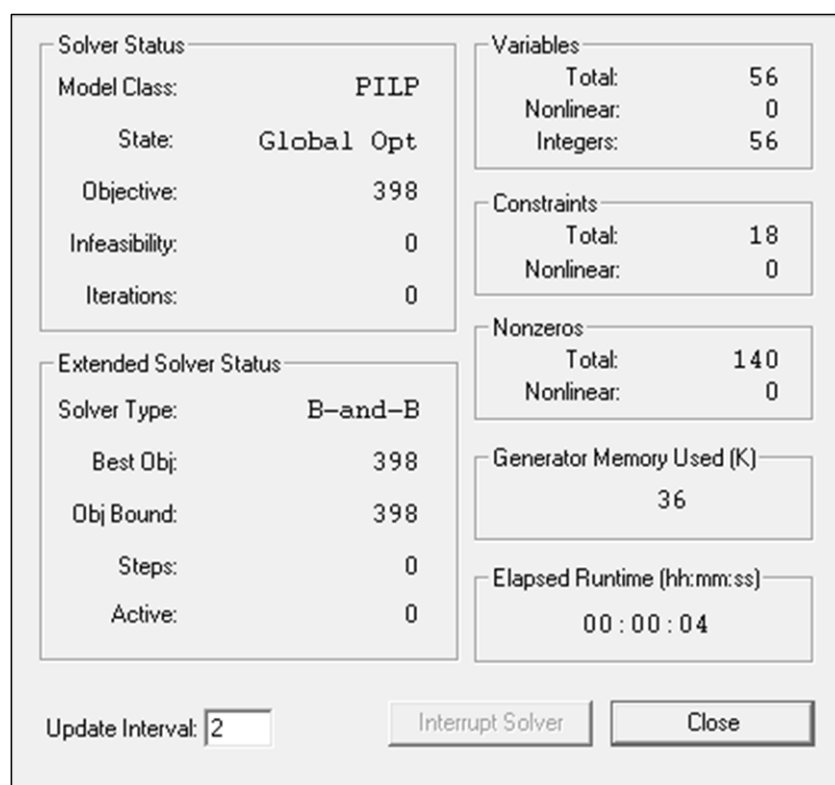
Após o desenvolvimento do modelo de otimização e a definição das informações e parâmetros necessários, as famílias de produtos foram alocadas nos *macroslots* utilizando o modelo desenvolvido na etapa 2 e o *software* Lingo.

No caso da alocação das famílias de produtos, como o objetivo era que o esforço de movimentação para a expedição fosse minimizado, não há diferenças entre o *layout* quebrado e direcionado pois as distâncias até a expedição permaneceram inalteradas.

O tempo computacional necessário para que a otimização fosse realizada foi de 4 segundos e o esforço de movimentação ótimo foi de **398**.

As demais informações da otimização estão apresentadas na figura 3.7.

FIGURA 3.7 – Informações do modelo de alocação das classes nos *macroslots* quanto a processamento e outras características



Segundo a figura 3.7, o modelo matemático para alocação das classes nos *macroslots* possui 56 variáveis e 18 restrições.

O baixo tempo de processamento favorece a utilização do ambiente simulado como gerador de alternativas de decisão.

A solução ótima para o modelo de otimização está apresentada no Quadro 3.4:

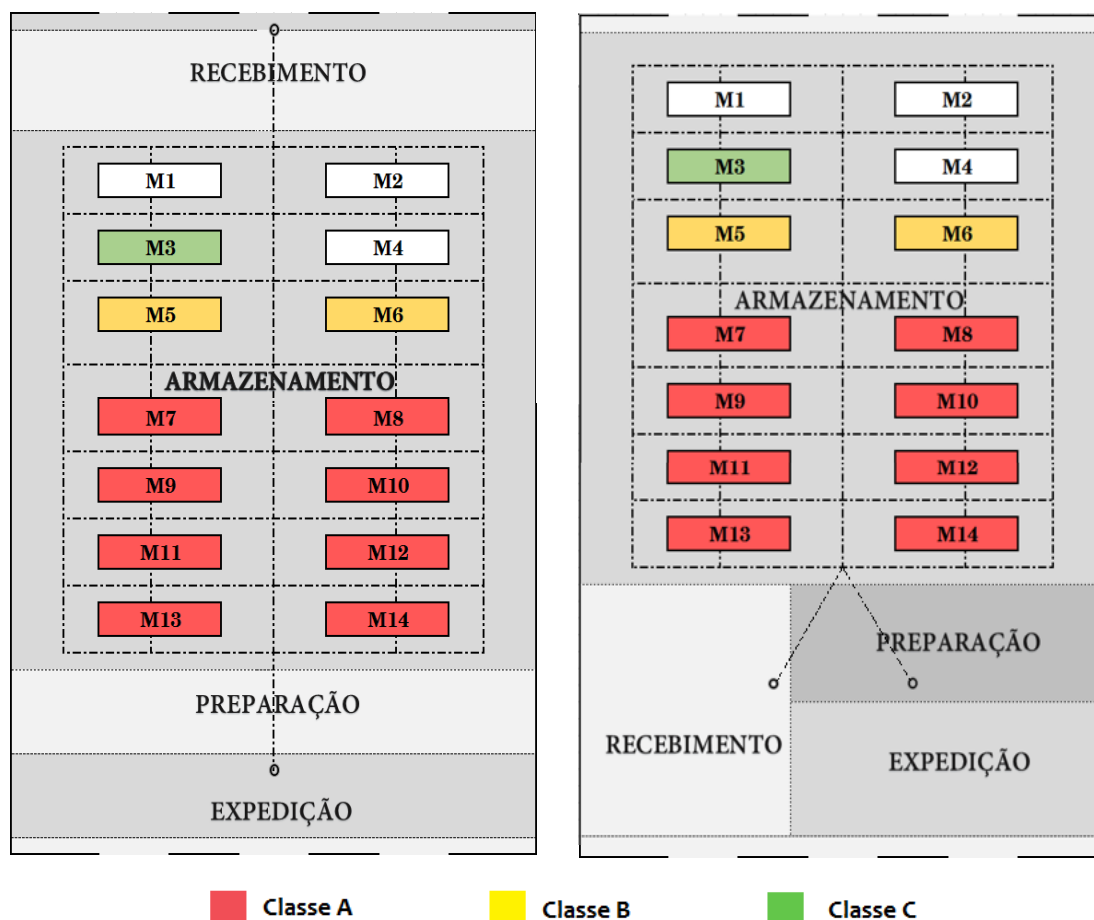
QUADRO 3.4 – Solução do problema de alocação das famílias nos *macroslots*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
A	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
B	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
C	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

A figura 3.8 apresenta esquematicamente a solução ótima.

Observe que, conforme era esperado, a classe A, de maior peso do consumo, ficou alocada nos *macroslots* próximos à área de expedição, o que minimiza o esforço na movimentação. Além disso, os *macroslots* que ficaram vazios são os mais distantes da expedição. Isso demonstra a eficácia do modelo aos objetivos pretendidos.

FIGURA 3.8 - Posicionamento das famílias nos *macroslots* do armazém



3.4. Otimização da determinação dos locais de armazenagem dos itens nos *macroslots*

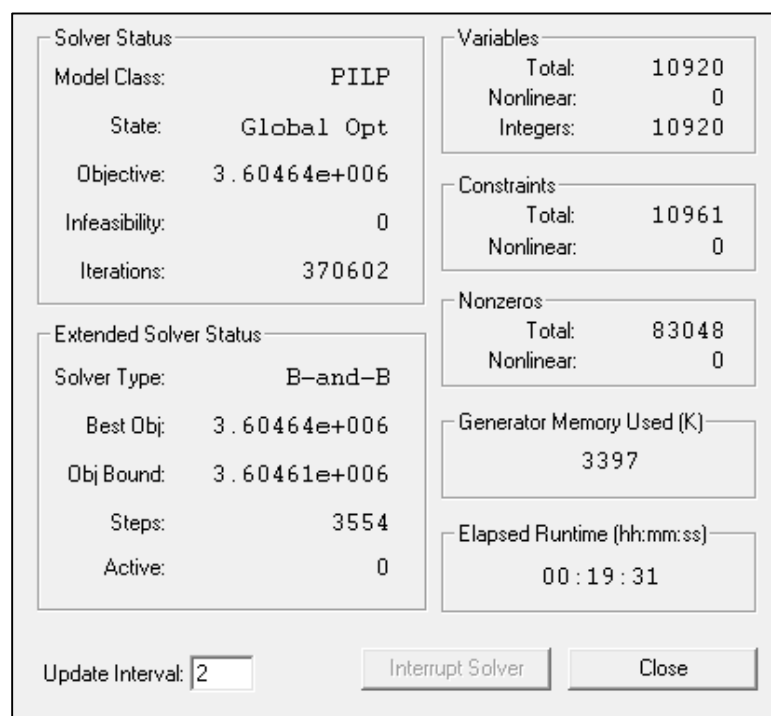
Na determinação dos locais de armazenagem dos itens dentro dos *macroslots*, o esforço de movimentação foi, de acordo com o modelo apresentado no item 2.1.2, calculado em função do peso unitário do item, das alturas dos *slots*, do número de pedidos de compra no ano (que reflete o esforço de movimentação no recebimento do item), do número de pedidos de separação do item na semana (que reflete o esforço de movimentação na expedição do item) e das distâncias entre os *slots* e o recebimento e a expedição.

Como essas distâncias são diferentes em função do tipo de *layout*, foram realizadas, de forma independente, duas simulações. A primeira considerando o *layout* com fluxo direcionado e a segunda com fluxo quebrado.

3.4.1. Determinação dos locais de armazenagem no *layout* de fluxo direcionado.

No modelo de alocação de cada item nos respectivos *slots* para o fluxo direcionado, o Lingo, após 19 minutos e 31 segundos de processamento, exibiu a janela mostrada na figura 3.9:

FIGURA 3.9 – Informações do modelo de alocação dos itens nos *slots* quanto a processamento e outras características no fluxo direcionado



A figura 3.9 mostra que o modelo matemático para alocação das classes nos *macroslots* possui 10920 variáveis, 10961 restrições, executou 370602 iterações e obteve $3.60464e+006$ (equivalente a **3.604.640**) como valor ótimo da função objetivo.

A solução foi exportada para uma planilha no Excel para que o mesmo exibisse automaticamente o esquema de alocação obtida. Isso permitiu rápida comparação entre as soluções possíveis devido às alterações ocorridas na fase de desenvolvimento do modelo. Entretanto, essa representação é útil para fins de comparação entre diferentes *layouts*, métodos de roteirização e definição dos corredores de movimentação em processos de tomada de decisão.

A Figura 3.10 apresenta os itens em seus respectivos *slots*.

3.4.2. Determinação dos locais de armazenagem no *layout* de fluxo quebrado

O Lingo, após 12 minutos e 30 segundos de processamento do modelo nesse *layout*, exibiu a janela mostrada na figura 3.11:

FIGURA 3.11 – Informações do modelo de alocação dos itens nos *slots* quanto a processamento e outras características no fluxo direcionado

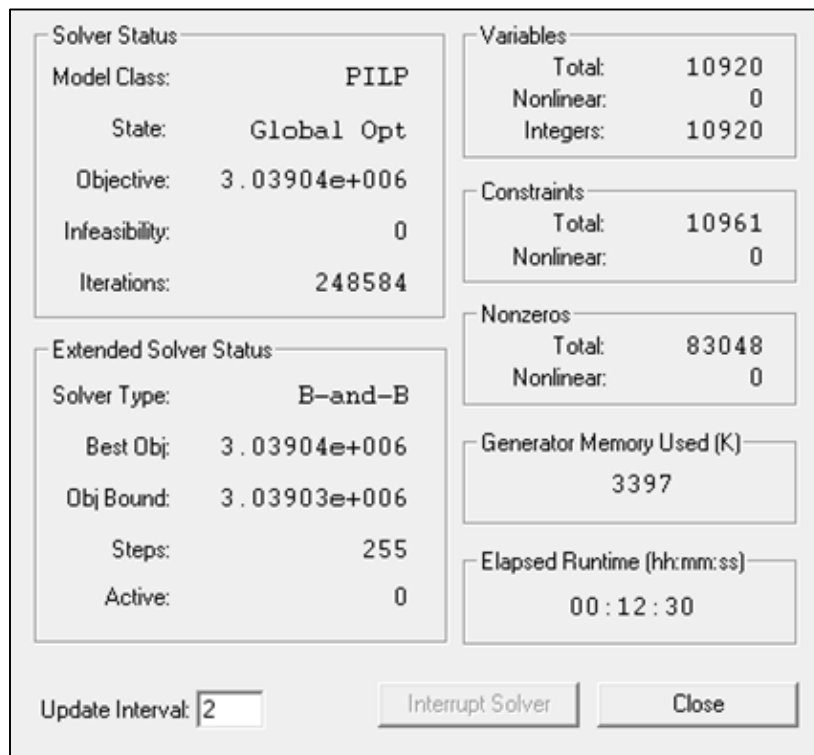


FIGURA 3.10 –Localização dos itens nos slots do armazém

4	8	12	16	20	24	28
3	7	11	15	19	23	27
2	6	10	14	18	22	26
1	5	9	13	17	21	25
32	36	40	44	48	52	56
31	35	39	43	47	51	55
30	34	38	42	46	50	54
29	33	37	41	45	49	53

60	64	68	72	76	80	84
59	63	67	71	75	79	83
58	62	66	70	74	78	82
57	61	65	69	73	77	81
88	92	96	100	104	108	112
87	91	95	99	103	107	111
86	90	94	98	102	106	110
85	89	93	97	101	105	109

116	120	124	128	132	136	140
115	119	123	127	131	135	139
114	118	122	126	130	134	138
113	117	121	125	129	133	137
144	148	152	156	160	164	168
143	147	151	155	159	163	167
142	146	150	154	158	162	166
141	145	149	153	157	161	165

172	176	180	184	188	192	196
171	175	179	183	187	191	195
170	174	178	182	186	190	194
169	173	177	181	185	189	193
200	204	208	212	216	220	224
199	203	207	211	215	219	223
198	202	206	210	214	218	222
197	201	205	209	213	217	221

228	232	236	240	244	248	252
227	231	235	239	243	247	251
226	230	234	238	242	246	250
225	229	233	237	241	245	249
256	260	264	268	272	276	280
255	259	263	267	271	275	279
254	258	262	266	270	274	278
253	257	261	265	269	273	277

284	288	292	296	300	304	308
283	287	291	295	299	303	307
282	286	290	294	298	302	306
281	285	289	293	297	301	305
312	316	320	324	328	332	336
311	315	319	323	327	331	335
310	314	318	322	326	330	334
309	313	317	321	325	329	333

340	344	348	352	356	360	364
339	343	347	351	355	359	363
338	342	346	350	354	358	362
337	341	345	349	353	357	361
368	372	376	380	384	388	392
367	371	375	379	383	387	391
366	370	374	378	382	386	390
365	369	373	377	381	385	389

396	400	404	408	412	416	420
395	399	403	407	411	415	419
394	398	402	406	410	414	418
393	397	401	405	409	413	417
424	428	432	436	440	444	448
423	427	431	435	439	443	447
422	426	430	434	438	442	446
421	425	429	433	437	441	445

452	456	460	464	468	472	476
451	455	459	463	467	471	475
450	454	458	462	466	470	474
449	453	457	461	465	469	473
480	484	488	492	496	500	504
479	483	487	491	495	499	503
478	482	486	490	494	498	502
477	481	485	489	493	497	501

508	512	516	520	524	528	532
507	511	515	519	523	527	531
506	510	514	518	522	526	530
505	509	513	517	521	525	529
536	540	544	548	552	556	560
535	539	543	547	551	555	559
534	538	542	546	550	554	558
533	537	541	545	549	553	557

564	568	572	576	580	584	588
563	567	571	575	579	583	587
562	566	570	574	578	582	586
561	565	569	573	577	581	585
592	596	600	604	608	612	616
591	595	599	603	607	611	615
590	594	598	602	606	610	614
589	593	597	601	605	609	613

620	624	628	632	636	640	644
619	623	627	631	635	639	643
618	622	626	630	634	638	642
617	621	625	629	633	637	641
648	652	656	660	664	668	672
647	651	655	659	663	667	671
646	650	654	658	662	666	670
645	649	653	657	661	665	669

676	680	684	688	692	696	700
675	679	683	687	691	695	699
674	678	682	686	690	694	698
673	677	681	685	689	693	697
704	708	712	716	720	724	728
703	707	711	715	719	723	727
702	706	710	714	718	722	726
701	705	709	713	717	721	725

732	736	740	744	748	752	756
731	735	739	743	747	751	755
730	734	738	742	746	750	754
729	733	737	741	745	749	753
760	764	768	772	776	780	784
759	763	767	771	775	779	783
758	762	766	770	774	778	782
757	761	765	769	773	777	781

Legenda	
	Vazio
	Item 01
	Item 02
	Item 03
	Item 04
	Item 05
	Item 06
	Item 07
	Item 08
	Item 09
	Item 10
	Item 11
	Item 12
	Item 13
	Item 14
	Item 15
	Item 16
	Item 17
	Item 18
	Item 19
	Item 20
	Item 21
	Item 22
	Item 23
	Item 24
	Item 25
	Item 26
	Item 27
	Item 28
	Item 29
	Item 30
	Item 31
	Item 32
	Item 33
	Item 34
	Item 35
	Item 36
	Item 37
	Item 38
	Item 39
	Item 40

A figura 3.11 mostra que o modelo matemático para alocação dos itens nos *slots* no *layout* quebrado possui 10920 variáveis, 10961 restrições, executou 658895 iterações e obteve $3.03904e+006$ (equivalente a **3.039.040**) como valor ótimo da função objetivo.

A solução encontrada foi exportada para uma planilha no Excel e serviu de base para a elaboração do *layout*/mapa como mostra a Figura 3.12.

3.5. Análise das soluções encontradas

Ao analisar a solução obtida na definição dos locais de armazenagem das famílias de itens, foi possível inferir que:

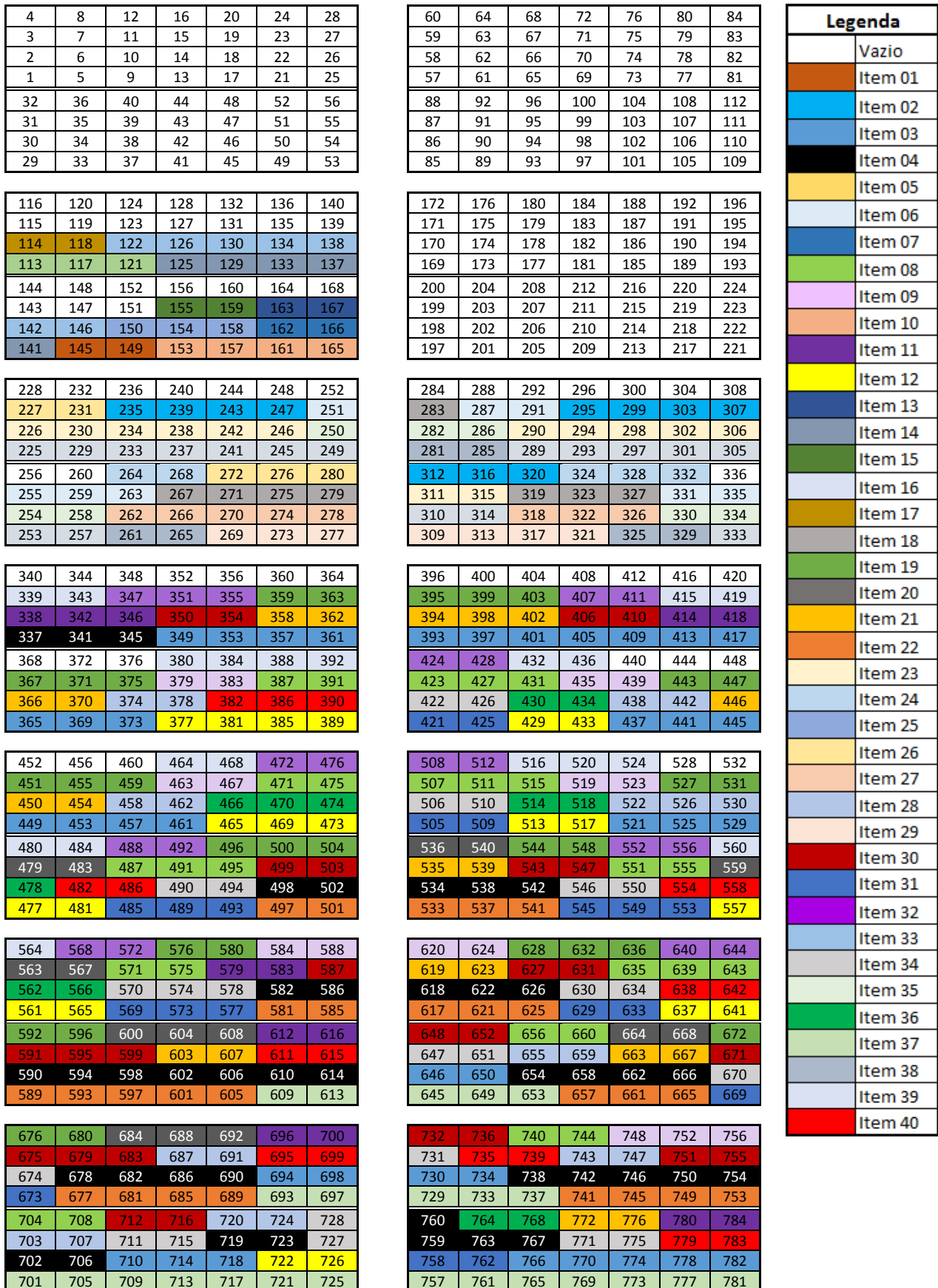
1. as famílias de itens foram alocadas de forma que a família com maior peso do consumo foi alocada próxima a área de expedição;
2. os *macroslots* vazios eram os mais distantes da área de expedição; e
3. os *macroslots* utilizados para o armazenamento de uma família são próximos.

Consequentemente, é possível dizer que a solução obtida é adequada aos fins pretendidos de otimizar o fluxo dos materiais.

Ao analisar as soluções obtidas na definição dos locais de armazenagem de itens dentro de um *macroslot*, foi possível inferir que:

1. ao comparar o valor das funções objetivo obtidas, é possível dizer que o fluxo quebrado proporciona uma função objetivo de menor valor, representando assim, que o *layout* de fluxo quebrado é o que gera o menor esforço de movimentação para os parâmetros simulados;
2. as soluções obtidas são diferentes entre si quanto à designação dos locais de armazenagem. Assim, é possível dizer que o modelo é sensível às variações das distâncias e *layouts*;
3. em ambas as soluções, os itens que proporcionam maior esforço de movimentação foram posicionados mais próximos da área de expedição;

FIGURA 3.12 – Localização dos itens nos slots do armazém



4. os itens mais pesados, em ambas as simulações foram armazenados nos níveis mais baixos dos *macroslots*, o que diminui o esforço de elevação do item;
5. os *slots* vazios foram os de maior altura; e
6. conforme esperado, os itens, em ambos os casos, foram alocados sem bloquear o duplo endereçamento.

Pode-se, assim, dizer que para os fins pretendidos as soluções mostraram-se adequadas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho monográfico de curso teve como objetivo geral otimizar o fluxo de materiais em armazéns utilizando ferramentas da Pesquisa Operacional, mais especificamente de Otimização Linear.

Para tanto, foi realizada uma revisão bibliográfica a fim de definir quais os parâmetros importantes a serem considerados na modelagem do esforço de movimentação de itens em um armazém genérico bem como quais os modelos clássicos de Pesquisa Operacional que orientaram o desenvolvimento do modelo matemático para este trabalho.

A partir disso, estabeleceu-se a política de armazenamento em famílias de itens e definiu-se três etapas para a otimização. A primeira seria classificar os itens em famílias, a segunda alocar as famílias em *macroslots* e, finalmente, locais de armazenagem para cada item seriam definidos.

Para tanto, foram desenvolvidos dois modelos matemáticos de programação linear inteira baseados nos modelos clássicos de designação e do caixeiro viajante, com o objetivo de definir os locais de armazenagem de um conjunto de itens. Esses modelos consideraram características como peso, demanda anual, volume, bem como as alturas e as distâncias dos pontos de armazenagem ao de recebimento e ao de expedição. O primeiro modelo teve por objetivo alocar as classes de materiais A, B e C nos *macroslots* disponíveis e o segundo, os itens de cada família em *slots* pertencentes aos *macroslots* designados para recebê-las.

As simulações foram realizadas utilizando tanto armazéns quanto itens fictícios.

A classificação ABC de materiais foi realizada com a intenção de identificar os itens de maior peso do consumo a fim de que fossem alocados próximos à área de expedição.

Utilizou-se, na resolução do modelo, o *software* Lingo, que forneceu as soluções ótimas para os *layouts* de fluxo direcionado e quebrado, mostrando a disposição ótima dos SKUs no armazém para cada um deles.

Quando comparadas, observou-se que o *layout* de fluxo quebrado proporciona um menor esforço de movimentação, sendo essa, então, a melhor alternativa a ser tomada pelo gestor.

Vale lembrar que a solução encontrada é ótima para o ambiente específico simulado, não podendo ser implementada em qualquer outro ambiente.

Por outro lado, o processo (em três etapas) utilizado bem como os modelos desenvolvidos, por serem abertos, aceitam qualquer configuração de *layout*, corredores de movimentação, tipos e quantidade de itens sem necessitar de qualquer adequação. Assim, outras situações com armazéns reais, maiores, produtos e características diferentes podem ser aplicadas, bastando, para isso, fazer adaptações nos dados inseridos.

Isso demonstra a potencialidade do uso da Pesquisa Operacional para esse fim.

Diante disso, foi possível elaborar algumas propostas para trabalhos futuros:

1. incluir outras restrições aperfeiçoando o processo e os modelos propostos;
2. simular outros tipos de *layout* de armazéns; e
3. utilizar o processo e modelo propostos para otimizar o fluxo em armazéns reais.

Dessa forma, esse trabalho pode ser de grande relevância científica e social, dadas as suas variadas aplicações nas empresas públicas e privadas, principalmente, à Força Aérea e aos futuros Oficiais Intendentes, como ferramenta capaz de melhorar a eficiência na gestão dos recursos públicos, na satisfação dos clientes internos, na agilidade e na prontidão do atendimento às forças militares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMAN, Kennet B. **Practical Handbook of Warehousing**. 4. ed. Columbus, Ohio, Usa: Springer-science + Bussiness Media, B.v, 1997. 572 p.

ALVES, Pedro Miguel Figueiras. **Reorganização de Armazém numa empresa prestadora de serviços na área de reabilitação de edifícios**. 2012. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Gestão Industrial, Universidade do Minho, Minho, Portugal, 2012.

ARENALES, Marcos *et al.* **Pesquisa Operacional** para cursos de engenharia. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007. 524 p.

BAKER, Peter; CANESSA, Marco. Warehouse design: a structured approach. **European Journal of Operational Research**, Cranfield, United Kingdom, v. 193, n. 2, p.425-436, mar. 2009. Quinzenal. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/138558.pdf>>. Acesso em: 17 jul. 2018.

BARTHOLDI, John J.; HACKMAN, Steven T. **Warehouse & Distribution Science**. Atlanta, Usa: [S.n.], 2014. 301 p. Disponível em: <<https://www2.isye.gatech.edu/~jjb/wh/book/editions/wh-sci-0.96.pdf>>. Acesso em: 03 abr. 2018.

BERGUE, Luciane Xerxenevsky. **Análise das potencialidades do uso da ferramenta de simulação computacional em operações logísticas: estudo de caso em um armazém geral**. 2010. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2010. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/1510/000300477.pdf?...1>>. Acesso em: 03 out. 2018.

BRASIL, Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Comando Geral do Pessoal. "NSCA 400-2" **Norma do Sistema de Intendência Operacional**. Portaria COMGEP N° 81 / 3EM, de 4 de setembro de 2008. Brasília, DF, 2008.

_____. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 11 - Transporte, movimentação, armazenagem e manuseio de materiais**. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2016. Disponível em: <<http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR11.pdf>>. Acesso em: 24 set. 2018.

BRUCATO, Corinne. **The Travelling Salesman Problem**. 2013. 57 f. Tese (Doutorado) - Curso de Sciences, University Of Pittsburgh, Pittsburg, Usa, 2013. Disponível em: <<https://www.mathematics.pitt.edu/sites/default/files/TSP.pdf>>. Acesso em: 23 jul. 2018.

CAPELLATO, Cláudia Passarini; MELO, Jose Airton Mendonça. Organização de arranjo físico em armazém de panificação: Uma proposta empregando a

classificação de materiais XYZ. **Revista Negócios em Projeção**, Brasília, v. 3, n. 1, p.51-56, mar. 2012. Semestral.

CARON, Franco; MARCHET, Gino; PEREGO, Alessandro. Optimal layout in lowlevel picker-to-part systems. **International Journal of Production Research**, vol. 38, n. 1, p. 101-117, 2000.

CHAN, Felix T. S.; CHAN, H. K.. Improving the productivity of order picking of a manual-pick and multi-level rack distribution warehouse through the implementation of class-based storage. **Expert Systems with Application**, [s.l.]: Elsevier, v. 38, n. 3, p.2686-2700, mar. 2011.

CHURCHMAN, C. W. **Introduction to Operational Research**. New York, Usa: John Wiley & Sons, Inc., 1957. Disponível em: <<https://ia801706.us.archive.org/8/items/introductiontoo00chur/introductiontoo00chur.pdf>>. Acesso em: 03 abr. 2018.

CRAVO, Ana Filipa Martins. **Desenho do layout e definição dos fluxos e dos processos de um armazém**. 2012. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Gestão Industrial, Economia, Gestão e Engenharia Industrial, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2012.

DERICKX, Kelly. **A comparative study of different storage policies in warehouse management**. 2012. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Economia Aplicada: Business Engineering, Universiteit Gent - Faculteit Economie En Bedrijfskunde, Gent, Bélgica, 2012. Disponível em: <https://lib.ugent.be/fulltxt/RUG01/001/893/346/RUG01-001893346_2012_0001_AC.pdf>. Acesso em: 11 set. 2018.

DIAS, João Carlos Quaresma. **Logística global e macrologística**. Lisboa, Portugal: Silabo, 2005.

ERICKSON, Jeff. **Algorithms**. 2015. Disponível em: <<http://jeffe.cs.illinois.edu/teaching/algorithms/all-algorithms.pdf>>. Acesso em: 22 jul. 2018.

FONTANA, Marcele Elisa; CAVALCANTE, Cristiano Alexandre Virgínio. Índices baseados no número de clientes para localização de itens em armazéns. **Production**, [s.l.], v. 23, n. 3, p.561-569, 1 fev. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-65132013005000002>. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/prod/v23n3/aop_t6_0001_0434.pdf>. Acesso em: 03 out. 2018.

FLEURY, Paulo Fernando et al. **Logística Empresarial: a perspectiva brasileira**. São Paulo: Atlas, 2000. 372 p.

FRAZELLE, Edward. **Supply chain strategy: the logistics of supply chain management**. Nova Iorque, USA: McGraw-Hill/Irwin, 2002.

GANDOLFO, Alessandro; SBRANA, Roberto. Reverse Logistics and Market-Driven Management. **Symphonya: Emerging Issues in Management**. Milão,

Itália, vol. 2, p. 28-40. 2008. Disponível em: <<http://symphonya.unimib.it/article/view/2008.2.03gandolfo.sbrana/8813>>. Acesso em: 18 jul. 2018.

GAVA, Marcela. **Curva ABC: Controle de estoque não será mais problema.** 2018. Disponível em: <<https://www.mandae.com.br/blog/curva-abc-para-gestao-de-estoque-saiba-como-utilizar/>>. Acesso em: 07 set. 2018.

GOLDBARG, Marco César; LUNA, Henrique Pacca L. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos.** Rio de Janeiro: Campus, 2000.

GOMES, Felipe da Silva. **O Problema de Roteamento de Veículos: Uma contribuição à SDAB.** 2017. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Formação de Oficiais Intendentes, Academia da Força Aérea, Pirassununga, SP, 2017.

GU, Jinxiang; GOETSCHALCKX, Marc; MCGINNIS, Leon F. Research on warehouse operation: A comprehensive review. **European Journal of Operational Research**, Atlanta, Georgia, Usa, v. 177, n. 1, p.1-21, 03 maio 2006. Quinzenal. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377221706001056>>. Acesso em: 11 jul. 2018.

HALL, R. W. **Zero inventories.** Homewood, Illinois, USA: Dow Jones-Irwin, 1983. 329p.

HENRICH, Jean. **Ancient Rome: Fun projects for world history.** Culver City, Ca, Usa: Social Studies For School Service, 2006. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=6LcSG7XZ6GEC&pg=PA23&lpg=PA23&dq=aelius+aristides+rome+worlds+warehouse&source=bl&ots=n7x0aqW1gt&sig=zdHhK7sWfNlgppXbSfsq_ddGXWw&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwis_aPxpLXcAhXGvJAKHW7nBDMQ6AEIZTAH#v=onepage&q=aelius%20aristides&f=false>. Acesso em: 23 jul. 2018.

HENRIQUE, Cláudio. **Curva ABC – Análise de Pareto – O que é e como funciona.** 2010. Disponível em: <<http://www.sobreadministracao.com/o-que-e-e-como-funciona-a-curva-abc-analise-de-pareto-regra-80-20/>>. Acesso em: 06 set. 2018.

HERAGU, S. S. **Facilities Design.** 3. ed. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2008.

HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald J. **Introduction to Operations Research.** 7. ed. New York, Usa: Mc Graw Hill, 2001. 1214 p.

HOUAISS, Antônio; VILLAR, Mauro de Sales. **Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa.** Elaborado no Instituto Antônio Houaiss de Lexicografia e Banco de Dados da Língua Portuguesa. 1. ed. Rio de Janeiro: Objetiva, 2009.

KARÁSEK, Jan. **An Overview of Warehouse Optimization.** 2013. 7 f. Faculty Of Electrical Engineering And Communication, Department Of

Telecommunications, Brno University Of Technology, Brno, Czech Republic, 2013. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.665.2431&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 30 abr. 2018.

KIISLER, Ain. **Warehousing**: Basic concepts. Riga, Letônia: Logontrain Summer School, 2014. Slide. Color. Disponível em: <<https://www.vkok.ee/logontrain/wp-content/uploads/2014/03/Riga-2-july-2014.pdf>>. Acesso em: 18 jul. 2018.

KOSTER, R. d.; LE-DUC, T.; ROODBERGEN, K. J., Design and control of warehouse order picking: A literature review. **European Journal of Operational Research**, vol. 182, n. 2, p. 481–501, 2007.

KUIJT, Ian; FINLAYSON, Bill. Evidence for food storage and predomestication granaries 11,000 years ago in the Jordan Valley. **Proceedings Of The National Academy Of Sciences Of The United States Of America**, Washington, Dc, Usa, v. 106, n. 27, p.10966-10970, jun. 2009. Disponível em: <<http://www.pnas.org/content/106/27/10966/tab-article-info>>. Acesso em: 22 set. 2018.

LIMA, Rafael. **Classificação ABC para Gestão de Estoques**. 2016. Disponível em: <<http://aprendendogestao.com.br/classificacao-abc-para-gestao-de-estoques/>>. Acesso em: 06 set. 2018.

LU, Shan; YU, Xiaojung; LI, Hongyue. **The Application of EIQ Analysis to The Order Picking of Book Industry**. 2015, Beijing, China. Em: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LOGISTICS ENGINEERING, MANAGEMENT AND COMPUTER SCIENCE. [s.l.]: Atlantis Press, 2015. 5 p. Disponível em: <<https://download.atlantispress.com/article/25838068.pdf>>. Acesso em: 03 out. 2018.

MANSURI, M. **Cycle-time computation and dedicated storage assignment for AS. RS systems**. Computers and Industrial Engineering, 1997. p. 307–310.

MARINS, Fernando Augusto Silva. **Introdução à pesquisa operacional**. 2011. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2011. Em: <http://www.cairu.br/biblioteca/arquivos/Ciencia/Introducao_pesquisa_operacional.pdf>. Acesso em: 03 out. 2018

MERINO, Eugenio Andres Diaz. **Efeitos agudos e crônicos causados pelo manuseio e movimentação de cargas no trabalhador**. 1996. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 1996.

MURTHY, P. Rama. **Operations Research**. 2. ed. New Delhi, India: New Age International Publishers, 2007.

NOGUEIRA, Amarildo de Souza. **Logística Empresarial**: uma visão local com pensamento globalizado. 1 ed. São Paulo: Atlas, 2012. Disponível em: <<http://portallogistico.com.br/2014/09/08/vmi-reducao-de-estoque-39781/>>. Acesso em: 16 jul. 2018.

VILA NOVA, Andréa Raffaella Avelar Pimentel; SANTOS, Karinna Oliveira; FONTANA, Marcele Elisa. **Estudo de fatores relevantes para o problema de atribuição do local em armazém.** In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2017, Ponta Grossa, PR: [s.n], 2017. 11 p.

POTTER, David Stone; MATTINGLY, D. J. **Life, Death, and Entertainment in the Roman Empire.** 1999. [S.l]: University of Michigan Press.

REED, C. A. The pattern of animal domestication in the pre- historic Near East. **The domestication and exploitation of plants and animals.** 1969. Chicago, Usa: Aldine. Editado por Ucko, P. J. e Dimbleby, G. W.

REIS, Manoel de Andrade e Silva. **O ECR na Relação Fornecedor X Atacadista.** São Paulo: FGV, 2008. 37 p. Relatório de Pesquisa nº 07 /2008. Disponível em: <<https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/3048/Rel072008.pdf>>. Acesso em: 16 jul. 2018.

RICHARD Jr, Lawrence. **A New Topographical Dictionary of Ancient Rome.** Baltimore and London, UK: The Johns Hopkins University Press, 1992.

ROODBERGEN, K.J. **Layout and Routing Methods for Warehouses.** 2001. Tese Ph.D. - RSM Erasmus University, Rotterdam, 2001. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1765/861>>. Acesso em: 06 set. 2018.

RUSHTON, Alan; CROUCHER, Phil; BAKER, Peter. **The Handbook of Logistics and distribution Management.** 4º. ed. London, United Kingdom: KoganPage, 2010. 665 p. Disponível em: <<http://s1.downloadmienphi.net/file/downloadfile7/149/1381418.pdf>>. Acesso em: 08 mar. 2018.

SANEI, O., *et al.* **A heuristic algorithm for the warehouse space assignment problem considering operational constraints:** with application in a case study. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND OPERATIONS MANAGEMENT, 2011, Kuala Lumpur, Malásia: [s.n], 2011. 7 p. Disponível em: <<http://ieomsociety.org/ieom2011/pdfs/IEOM040.pdf>>. Acesso em: 03 out. 2018.

SAKAGUTI, Fernando Yudi. **Otimização do processo de picking de um centro de distribuição através da programação dinâmica.** 2007. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2007.

SHUKLA, Hrithik *et al.* **Application of Operation Research in Logistics and Warehouse Optimization.** International Journal Of Innovative Research In Technology & Science (IJIRTS). [s. L.], p. 1-7. set. 2017. Disponível em: <<http://ijirts.org/volume5issue6/IJIRTS5611171.pdf>>. Acesso em: 05 abr. 2018.

DA SILVA, Denilson Dimas; VASCONCELOS, Natália Veloso Caldas de; CAVALCANTE, Cristiano Alexandre Virginio. Multicriteria Decision Model to

Support the Assignment of Storage Location of Products in a Warehouse. **Mathematical Problems In Engineering**, [s.l.], v. 2015, p.1-8, 2015. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/481950>.

SIMON, Herbert A. **Comportamento Administrativo**: estudo dos processos decisórios nas organizações administrativas. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1965.

SIQUEIRA, Paulo Henrique. **Uma nova abordagem na resolução do Problema do Caixeiro Viajante**. 2005. 116 f. Tese (Doutorado) - Curso de Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2005. Disponível em: http://www.exatas.ufpr.br/portal/docs_degraf/paulo/paulohsTese.pdf. Acesso em: 22 jul. 2018.

TAHA, Hamdy A. **Operations Research: An Introduction**. 8. ed. Upper Saddle River, New Jersey, Usa: Pearson Prentice Hall, 2007. 813 p.

TAUFER, Fernando Soares Gomes; PEREIRA, Elaine Correa. **Aplicação do Problema do Caixeiro Viajante na otimização de roteiros de veículos**. Belo Horizonte, Mg. [s.n], 2011. 7 p. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2011_tn_sto_140_885_18795.pdf . Acesso em: 22 jul. 2018.

TEODORO, Kevin Akio Nakakura. **Estudo e Aplicação de Armazenagem para a Otimização de um Centro de Distribuição**. 2016. 92 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

TESTART, Alain. The Significance of Food Storage among Hunter-Gatherers: Residence Patterns, Population Densities, and Social Inequalities. **Current Anthropology**, Chicago, Usa, v. 23, n. 5, p.523-537, Oct. 1982. Disponível em: <http://www.alaintestart.com/UK/documents/storage.pdf>. Acesso em: 03 abr. 2018.

VERÍSSIMO, Nádia; MUSETTI, Marcel Andreotti. A tecnologia de informação na gestão de armazenagem. **Anais**. Porto Alegre: ABEPRO, 2003.

WANKE, Peter. **Uma Revisão dos Programas de Resposta Rápida: ECR, CRP, VMI, CPFR, JIT II**. 2004. Disponível em: <http://www.ilos.com.br/web/uma-revisao-dos-programas-de-resposta-rapida-ecr-crp-vmi-cpfr-jit-ii/>. Acesso em: 16 jul. 2018.

WINSTON, Wayne L. **Operations Research: Applications and Algorithms**. 4. ed. Belmont, California, Usa: Thomson Brooks/cole, 2004. 1418 p.

ANEXO A – Resposta da solicitação da *license key* do software Lingo

Dear Sir/Madam,

Thank you for your request. Below is an educational research license key for LINGO valid for six months. It is authorized for use exclusively for educational research and instruction on the machine from which you generated the user information. This type of license may be renewed by qualifying students and professors.

From the LINGO menu select File | License to display the LINGO password dialog box. Cut the license key below and paste it in the window of the dialog box and click OK.

Please contact me if you have any questions or I can be of service.

Kind Regards,
Jane Rees

Jane Rees
Lindo Systems Inc.
 1415 N Dayton Street
 Chicago, IL 60642 USA
 312-988-7422 **Tel** | 312-988-9065 **Fax**
jrees@lindo.com
www.lindo.com

LINGO Extended 17.00
 Max Users: 1
 Node Locked: Yes
 Expiration Date: 02/17/2019
 Enabled Solvers: Linear Nonlinear Global Barrier Mip Stochastic Conic
 Usage: Educational
 Machine Class: Win64 AMD/EMT
 Serial#: *****
 Dongle Required: No
 License key:

>

APÊNDICE A - Distâncias de cada posição aos pontos de recebimento e expedição

QUADRO 4 – Distâncias de cada posição aos pontos de recebimento (R) e expedição (E)

Posição	Direcionado		Quebrado	
	R	E	R	E
1	17.5	48.5	48.5	48.5
2	16.5	47.5	47.5	47.5
3	15.5	46.5	46.5	46.5
4	14.5	45.5	45.5	45.5
5	13.5	44.5	44.5	44.5
6	12.5	43.5	43.5	43.5
7	11.5	42.5	42.5	42.5
8	21.5	44.5	44.5	44.5
9	20.5	43.5	43.5	43.5
10	19.5	42.5	42.5	42.5
11	18.5	41.5	41.5	41.5
12	17.5	40.5	40.5	40.5
13	16.5	39.5	39.5	39.5
14	15.5	38.5	38.5	38.5
15	10.5	41.5	41.5	41.5
16	11.5	42.5	42.5	42.5
17	12.5	43.5	43.5	43.5
18	13.5	44.5	44.5	44.5
19	14.5	45.5	45.5	45.5
20	15.5	46.5	46.5	46.5
21	16.5	47.5	47.5	47.5
22	14.5	37.5	37.5	37.5
23	15.5	38.5	38.5	38.5
24	16.5	39.5	39.5	39.5
25	17.5	40.5	40.5	40.5
26	18.5	41.5	41.5	41.5
27	19.5	42.5	42.5	42.5
28	20.5	43.5	43.5	43.5
29	21.5	44.5	44.5	44.5
30	20.5	43.5	43.5	43.5
31	19.5	42.5	42.5	42.5
32	18.5	41.5	41.5	41.5
33	17.5	40.5	40.5	40.5
34	16.5	39.5	39.5	39.5
35	15.5	38.5	38.5	38.5
36	25.5	40.5	40.5	40.5
37	24.5	39.5	39.5	39.5
38	23.5	38.5	38.5	38.5
39	22.5	37.5	37.5	37.5
40	21.5	36.5	36.5	36.5
41	20.5	35.5	35.5	35.5
42	19.5	34.5	34.5	34.5
43	14.5	37.5	37.5	37.5
44	15.5	38.5	38.5	38.5
45	16.5	39.5	39.5	39.5
46	17.5	40.5	40.5	40.5
47	18.5	41.5	41.5	41.5
48	19.5	42.5	42.5	42.5
49	20.5	43.5	43.5	43.5
50	18.5	33.5	33.5	33.5
51	19.5	34.5	34.5	34.5
52	20.5	35.5	35.5	35.5
53	21.5	36.5	36.5	36.5
54	22.5	37.5	37.5	37.5
55	23.5	38.5	38.5	38.5
56	24.5	39.5	39.5	39.5
57	25.5	40.5	40.5	40.5
58	24.5	39.5	39.5	39.5
59	23.5	38.5	38.5	38.5
60	22.5	37.5	37.5	37.5
61	21.5	36.5	36.5	36.5
62	20.5	35.5	35.5	35.5
63	19.5	34.5	34.5	34.5
64	31.5	36.5	35.5	35.5
65	30.5	35.5	34.5	34.5
66	29.5	34.5	33.5	33.5
67	28.5	33.5	32.5	32.5
68	27.5	32.5	31.5	31.5
69	26.5	31.5	30.5	30.5
70	25.5	30.5	29.5	29.5
71	18.5	33.5	33.5	33.5
72	19.5	34.5	34.5	34.5
73	20.5	35.5	35.5	35.5
74	21.5	36.5	36.5	36.5
75	22.5	37.5	37.5	37.5
76	23.5	38.5	38.5	38.5
77	24.5	39.5	39.5	39.5
78	24.5	29.5	28.5	28.5
79	25.5	30.5	29.5	29.5
80	26.5	31.5	30.5	30.5
81	27.5	32.5	31.5	31.5
82	28.5	33.5	32.5	32.5
83	29.5	34.5	33.5	33.5
84	30.5	35.5	34.5	34.5
85	31.5	36.5	35.5	35.5
86	30.5	35.5	34.5	34.5
87	29.5	34.5	33.5	33.5
88	28.5	33.5	32.5	32.5
89	27.5	32.5	31.5	31.5
90	26.5	31.5	30.5	30.5
91	25.5	30.5	29.5	29.5
92	35.5	30.5	30.5	30.5
93	34.5	29.5	29.5	29.5
94	33.5	28.5	28.5	28.5
95	32.5	27.5	27.5	27.5
96	31.5	26.5	26.5	26.5
97	30.5	25.5	25.5	25.5
98	29.5	24.5	24.5	24.5
99	24.5	29.5	28.5	28.5
100	25.5	30.5	29.5	29.5
101	26.5	31.5	30.5	30.5
102	27.5	32.5	31.5	31.5
103	28.5	33.5	32.5	32.5
104	29.5	34.5	33.5	33.5
105	30.5	35.5	34.5	34.5

QUADRO 4 – Distâncias de cada posição aos pontos de recebimento (R) e expedição (E)
(Continuação)

Posição	Direcionado		Quebrado	
	R	E	R	E
106	28.5	23.5	23.5	23.5
107	29.5	24.5	24.5	24.5
108	30.5	25.5	25.5	25.5
109	31.5	26.5	26.5	26.5
110	32.5	27.5	27.5	27.5
111	33.5	28.5	28.5	28.5
112	34.5	29.5	29.5	29.5
113	35.5	30.5	30.5	30.5
114	34.5	29.5	29.5	29.5
115	33.5	28.5	28.5	28.5
116	32.5	27.5	27.5	27.5
117	31.5	26.5	26.5	26.5
118	30.5	25.5	25.5	25.5
119	29.5	24.5	24.5	24.5
120	39.5	26.5	26.5	26.5
121	38.5	25.5	25.5	25.5
122	37.5	24.5	24.5	24.5
123	36.5	23.5	23.5	23.5
124	35.5	22.5	22.5	22.5
125	34.5	21.5	21.5	21.5
126	33.5	20.5	20.5	20.5
127	28.5	23.5	23.5	23.5
128	29.5	24.5	24.5	24.5
129	30.5	25.5	25.5	25.5
130	31.5	26.5	26.5	26.5
131	32.5	27.5	27.5	27.5
132	33.5	28.5	28.5	28.5
133	34.5	29.5	29.5	29.5
134	32.5	19.5	19.5	19.5
135	33.5	20.5	20.5	20.5
136	34.5	21.5	21.5	21.5
137	35.5	22.5	22.5	22.5
138	36.5	23.5	23.5	23.5
139	37.5	24.5	24.5	24.5
140	38.5	25.5	25.5	25.5
141	39.5	26.5	26.5	26.5
142	38.5	25.5	25.5	25.5
143	37.5	24.5	24.5	24.5
144	36.5	23.5	23.5	23.5
145	35.5	22.5	22.5	22.5
146	34.5	21.5	21.5	21.5
147	33.5	20.5	20.5	20.5
148	43.5	22.5	22.5	22.5
149	42.5	21.5	21.5	21.5
150	41.5	20.5	20.5	20.5
151	40.5	19.5	19.5	19.5
152	39.5	18.5	18.5	18.5
153	38.5	17.5	17.5	17.5
154	37.5	16.5	16.5	16.5
155	32.5	19.5	19.5	19.5
156	33.5	20.5	20.5	20.5
157	34.5	21.5	21.5	21.5
158	35.5	22.5	22.5	22.5
159	36.5	23.5	23.5	23.5
160	37.5	24.5	24.5	24.5
161	38.5	25.5	25.5	25.5
162	36.5	15.5	15.5	15.5
163	37.5	16.5	16.5	16.5
164	38.5	17.5	17.5	17.5
165	39.5	18.5	18.5	18.5
166	40.5	19.5	19.5	19.5
167	41.5	20.5	20.5	20.5
168	42.5	21.5	21.5	21.5
169	43.5	22.5	22.5	22.5
170	42.5	21.5	21.5	21.5
171	41.5	20.5	20.5	20.5
172	40.5	19.5	19.5	19.5
173	39.5	18.5	18.5	18.5
174	38.5	17.5	17.5	17.5
175	37.5	16.5	16.5	16.5
176	47.5	18.5	18.5	18.5
177	46.5	17.5	17.5	17.5
178	45.5	16.5	16.5	16.5
179	44.5	15.5	15.5	15.5
180	43.5	14.5	14.5	14.5
181	42.5	13.5	13.5	13.5
182	41.5	12.5	12.5	12.5
183	36.5	15.5	15.5	15.5
184	37.5	16.5	16.5	16.5
185	38.5	17.5	17.5	17.5
186	39.5	18.5	18.5	18.5
187	40.5	19.5	19.5	19.5
188	41.5	20.5	20.5	20.5
189	42.5	21.5	21.5	21.5
190	40.5	11.5	11.5	11.5
191	41.5	12.5	12.5	12.5
192	42.5	13.5	13.5	13.5
193	43.5	14.5	14.5	14.5
194	44.5	15.5	15.5	15.5
195	45.5	16.5	16.5	16.5
196	46.5	17.5	17.5	17.5