

**ROBERTA BRIESEMEISTER**

**CENTRO DE DISTRIBUIÇÃO DE PRODUTOS DENTRO DO  
CONCEITO DE CROSS-DOCKING: MODELAGEM  
MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO**

Tese submetido ao Programa de  
Pós-Graduação de Engenharia de  
Produção da Universidade Federal  
de Santa Catarina para a obtenção  
do Grau de Doutora

Orientador: Prof. Dr. Antônio  
Galvão N. Novaes

Florianópolis  
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Briesemeister, Roberta  
Centro de distribuição de produtos dentro do  
conceito de cross-docking : modelagem matemática e  
simulação / Roberta Briesemeister ; orientador,  
Prof. Dr. Antônio Galvão N. Novaes, 2017.  
191 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia de Produção, Florianópolis,  
2017.

Inclui referências.

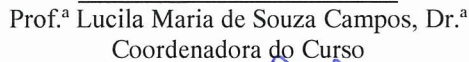
1. Engenharia de Produção. 2. simulação. 3. cross  
docking. 4. filas não estacionárias. I. Novaes,  
Prof. Dr. Antônio Galvão N. . II. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia de Produção. III. Título.

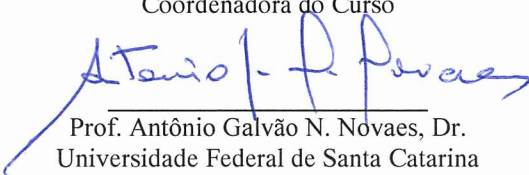
Roberta Briesemeister

**CENTRO DE DISTRIBUIÇÃO DE PRODUTOS DENTRO DO  
CONCEITO DE CROSS-DOCKING: MODELAGEM  
MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO**


Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de “Doutora em Engenharia de Produção” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção


Local, 25 de outubro de 2017.

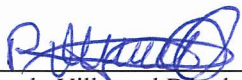
  
Prof.ª Lucila Maria de Souza Campos, Dr.ª  
Coordenadora do Curso

  
Prof. Antônio Galvão N. Novaes, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Orientador

**Banca Examinadora**

  
Prof. Antônio Sérgio Coelho, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Examinador Interno

  
Prof. Edson Tadeu Bez, Dr.  
Universidade do Vale do Itajaí  
Examinador Externo

  
Prof. Ricardo Villarroel Dávalos, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Examinador Interno



*“Os sonhos não determinam o lugar onde vocês vão chegar, mas produzem a força necessária para tirá-los do lugar em que vocês estão. Sonhem com as estrelas para que vocês possam pisar pelo menos na Lua. Sonhem com a Lua para que vocês possam pisar pelo menos nos altos montes. Sonhem com os altos montes para que vocês possam ter dignidade quando atravessarem os vales das perdas e das frustrações. Bons alunos aprendem a matemática numérica, alunos fascinantes vão além, aprendem a matemática da emoção, que não tem conta exata e que rompe a regra da lógica. Nessa matemática você só aprende a multiplicar quando aprende a dividir, só consegue ganhar quando aprende a perder, só consegue receber, quando aprende a se doar.”*  
Augusto Cury



Dedico aos meus pais, meus maiores  
incentivadores.





## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me ensinar que as coisas acontecem conforme seus planos, e que na vida temos que correr atrás do que desejamos, e que quando colocamos nossa vida em Suas mãos, não devemos questionar o porquê e sim acreditar que tudo tem uma razão, um propósito para que as coisas boas aconteçam.

Aos meus pais, por estarem ao meu lado todos esses anos, por me entenderem e me aconselharem todas as vezes que precisei. Obrigada por me ensinarem a não desistir dos meus sonhos, por terem acreditado em mim e por compartilharem de muitas das minhas angústias e conquistas.

Ao meu querido orientador, professor Novaes, por sua competência teórica e seus ricos ensinamentos compartilhados durante todo o doutorado, uma pessoa realmente iluminada. Pelas inúmeras conversas, pela paciência, pelos conselhos e apoio quando mais precisei. Sentirei saudades.

Aos meus irmãos pelo apoio e incentivo, por compartilharem comigo todas as alegrias, ansiedades e conquistas.

Ao meu cunhado Eduardo, meu mais profundo agradecimento, uma pessoa fundamental na etapa final do desenvolvimento do meu trabalho. Deus coloca a pessoa certa na hora certa e você com certeza foi uma delas. Serei eternamente grata.

Ao corpo docente do PPGEP/UFSC em especial aos professores: Antônio Sérgio Coelho, Mirian Buss e Ricardo Villarroel; e as servidoras Rosimeri Maria de Souza e Mônica Bruschi, pela atenção que sempre me deram.

Agradeço aos membros da banca, pela avaliação, comentários e contribuições para com o trabalho.

Por fim, quero agradecer a todos que de maneira direta e indireta contribuíram e me apoiaram na minha vida acadêmica.

A todos meu sincero Muito Obrigada!



## RESUMO

O objetivo desta tese consiste em resolver o problema de filas de caminhões causado em terminais de transbordo que operam com a técnica logística de cross-docking, considerando carga completa, sem restrições de equipamentos e pessoas para o descarregamento das cargas, de modo a dimensionar o número de portas para minimizar o tempo de espera dos caminhões no sistema. Diferentemente de outros trabalhos encontrados na literatura, nesta tese a chegada dos caminhões é considerada não estacionária nos terminais de descarga. Este problema foi modelado através de uma teoria que utiliza uma representação contínua que independe do caráter estacionário do processo, para o qual um algoritmo na linguagem em Pascal foi aplicado. Uma possível solução foi encontrada. Para medir a eficiência, desempenho e possíveis ajustes dos parâmetros do modelo teórico foi desenvolvido um modelo no simulador Arena. Testes estatísticos mostram que os resultados obtidos utilizando simulação representou muito bem o problema proposto.

**Palavras-chaves:** simulação, cross-docking, filas não estacionárias.



## ABSTRACT

The main goal of this thesis is to solve the problem of queues of trucks caused in transshipment terminals that operate with the cross-docking logistics technique, considering full load, without restrictions of equipment and people for the unloading of loads, in order to size the number of ports to minimize the waiting time of the trucks in the system. Differently from other studies found in the literature, in this thesis the arrival of the trucks is considered non-stationary at the discharge terminals. This problem was modeled through a theory that uses a continuous representation that is independent of the stationary character of the process, for which an algorithm in the Pascal language was applied. One possible solution was found. To measure the efficiency, performance and possible adjustments of the parameters of the theoretical model, a model was developed in the Arena software. Statistical tests show that the results obtained using simulation represented the problem very well.

**Keywords:** simulation, cross-docking, non-stationary queues.



## LISTA DE FIGURAS

|   |     |
|---|-----|
| Figura 1.1 - Desenvolvimento do trabalho .....  | 32  |
| Figura 3.1 - Cross dock na rede varejista Sam's Club, EUA .....   | 69  |
| Figura 3.2 - Representação típica de distribuição de um cross-docking   | 71  |
| Figura 3.3 - Organização dos paletes no cross dock da Costco.....   | 72  |
| Figura 3.4 - Túnel de leitura/ scanning do código de barras .....   | 84  |
| Figura 3.5 - Centro de distribuição.....  | 86  |
| Figura 3.6 - Empilhadeiras para manusear paletes na Costco, EUA .....   | 88  |
| Figura 3.7 - Cross-docking pré-distribuição.....  | 92  |
| Figura 3.8 - Cross-docking pós-distribuição .....   | 92  |
| Figura 3.9 - Cross-docking de etapa única .....   | 93  |
| Figura 3.10 - Cross-docking de duas etapas .....  | 94  |
| Figura 4.1 - Representação esquemática de um terminal de tipo cross-docking.....  | 98  |
| Figura 4.2 - Caixa padrão de acondicionamento dos produtos.....   | 101 |
| Figura 4.3 - Processo de chegada dos caminhões alimentadores .....  | 104 |
| Figura 4.4 - Curva da taxa $\lambda$ de chegadas das mercadorias ao terminal de cross-docking, ajustada matematicamente ..... | 108 |
| Figura 4.5 - Fase entre o instante zero e o instante $t_0$ , quando praticamente não há fila.....                             | 109 |
| Figura 4.6 - Representação do método da seção áurea utilizado para cálculo de $t_0$ .....                                     | 111 |
| Figura 4.7 - Característica unimodal da função (4.28).....  | 112 |
| Figura 4.8 - Variação da fila para situação com tempo de descarga maior do que T.....   | 114 |
| Figura 4.9 - Variação da fila para situação com tempo de descarga igual a T .....   | 114 |
| Figura 4.10 - Tangente à curva A(t) quando $t_0 \leq T$ e $t_0 < t^*$ .....   | 115 |
| Figura 4.11 - Fila ocorrendo em intervalo restrito entre $t_0$ e $tZ$ .....   | 115 |
| Figura 4.12 - Situação em que não há formação de fila .....   | 116 |
| Figura 4.13 - Distribuição acumulada da taxa de descarga dos veículos .....   | 122 |
| Figura 4.14 - Variação do grau de utilização da doca em função de $n$   | 124 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 4.15 - Variação do tempo médio no sistema em função de $n$ ...                         | 125 |
| Figura 4.16 - Tempo de espera na fila em função do grau de utilização da doca.....            | 127 |
| Figura 5.1 - Representação esquemática do CD .....  | 131 |
| Figura 5.2 - Fluxograma do processo de atendimento .....                                      | 132 |
| Figura 5.3 - Configurações do módulo de chegada.....  | 133 |
| Figura 5.4 - Representação do processo de chegada dos caminhões ...                           | 133 |
| Figura 5.5 - Definindo o atributo .....   | 134 |
| Figura 5.6 - Representação do Processo de Recepção .....                                      | 134 |
| Figura 5.7 - Módulo PickStation.....  | 135 |
| Figura 5.8 - Número de recursos disponíveis para o descarregamento                            | 136 |
| Figura 5.9 - Módulo com a capacidade de docas funcionando .....                               | 137 |
| Figura 5.10 - Docas em funcionamento e em falhas .....  | 137 |
| Figura 5.11 - Resultados do Output Analyzer.....  | 139 |
| Figura 5.12 - Tempo médio de espera na fila.....  | 141 |
| Figura 5.13 - Comparações entre os dois modelos.....  | 141 |
| Figura 5.14 - Box plot para as 23 médias.....   | 143 |
| Figura 5.15 - Gráficos de análise do coeficiente de Pearson.....                              | 145 |
| Figura 5.16 - Análise dos tempos médios de espera ao longo das 50 replicações.....            | 148 |
| Figura 5.17 - Análise dos tempos médio e total no sistema em função da taxa de ocupação ..... | 149 |
| Figura 5.18 - Histograma referente ao tempo médio de espera.....                              | 151 |
| Figura 5.19 - Box Plot.....   | 152 |



## LISTA DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 2.1 - Algumas densidades com funções de distribuição ..... | 63  |
| Tabela 4.2 - Composição da frota de veículos alimentadores .....  | 101 |
| Tabela 4.3 - Resultados da aplicação do modelo teórico .....      | 126 |
| Tabela 5.1 - Tabela do teste-t .....                              | 144 |
| Tabela 5.2 - Medidas de Erros.....                                | 146 |
| Tabela 5.3 -Resultados da aplicação do modelo computacional ..... | 147 |
| Tabela 5.4 - tabela de distribuição de frequências .....          | 150 |



## LISTA DE SIGLAS

|        |  |
|--------|--|
| ATM    | Asynchronous Transfer Mode   |
| BBO    | Biogeography-based optimization  |
| CD     | Centro de Distribuição   |
| CIF    | Cost Insurance and Freight   |
| ECR    | Efficient Consumer Response  |
| FIFO   | First In, First Out  |
| FOB    | Free on Board  |
| FTL    | Full truck load  |
| IFHGDM | Intuitionistic fuzzy hierarchical group decision-making                |
| JIT    | Just-in-time   |
| LTL    | less than a truck load   |
| MILP   | Mixed-integer linear programming                                       |
| RFID   | Radio Frequency Identification ou Identificador de Rádio<br>Frequência |
| SCM    | Supply Chain Management  |



## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>25</b> |
| 1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....   | 26        |
| 1.2 OBJETIVOS .....  | 28        |
| <b>1.2.1 Objetivo Geral .....</b>  | <b>28</b> |
| <b>1.2.2 Objetivos Específicos.....</b>  | <b>28</b> |
| 1.3 JUSTIFICATIVA DA TESE.....   | 28        |
| 1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....  | 31        |
| 1.5 METODOLOGIA .....  | 31        |
| 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....   | 33        |
| <b>2. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>  | <b>35</b> |
| 2.1 TEORIA DAS FILAS .....   | 35        |
| 2.2 PROCESSOS ESTOCÁSTICOS NÃO ESTACIONÁRIOS E<br>PROCESSOS DE POISSON NÃO ESTACIONÁRIOS ..... | 36        |
| 2.3 PROBLEMAS RELACIONADOS A CENTROS DE CROSS-<br>DOCKING .....                                | 38        |
| <b>2.3.1 Simulação em Centros de <i>Cross-Docking</i> .....</b>                                | <b>41</b> |
| 2.4 MODELOS DE PREPARAÇÃO DO FRETE: UM E DOIS<br>ESTÁGIOS .....                                | 48        |
| 2.5 MODELOS DE ALOCAÇÃO DE PORTAS .....  | 54        |
| <b>2.5.1 Modelos de Agendamento de Caminhões .....</b>   | <b>54</b> |
| 2.6 MODELOS NÃO ESTACIONÁRIOS DE FILAS.....  | 62        |
| <b>2.6.1 Método da Inversão.....</b>   | <b>63</b> |
| <b>2.6.2 Transformações Simples .....</b>  | <b>63</b> |
| <b>2.6.3 Modelo Geral baseado em composição .....</b>  | <b>65</b> |
| <b>2.6.4 Método Thinning .....</b>   | <b>66</b> |
| <b>2.6.5 Método Simples para Distribuições Multivariadas .....</b>                             | <b>67</b> |
| 2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....   | 68        |
| <b>3. CROSS-DOCKING .....</b>  | <b>69</b> |
| 3.1 CONCEITUAÇÃO DE CROSS-DOCKING.....   | 69        |
| 3.2 MOTIVAÇÕES PARA O USO DO CROSS-DOCKING .....   | 73        |
| 3.3 TENDÊNCIAS.....  | 74        |
| <b>3.3.1 Cross-docking no Mundo.....</b>   | <b>75</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>3.3.2 Cross-docking no Brasil.....</b>  | <b>78</b>  |
| 3.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO CROSS-DOCKING..  | 79         |
| 3.5 REQUISITOS PARA IMPLEMENTAÇÃO E PROBLEMAS DE DECISÃO .....                         | 81         |
| 3.6 CENTRO DE DISTRIBUIÇÃO .....   | 85         |
| 3.7 FORMAS DE ORGANIZAÇÃO INFORMACIONAL E SEUS EFEITOS NO DESEMPENHO .....             | 89         |
| 3.8 MODALIDADES DE CROSS-DOCKING.....  | 90         |
| 3.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....   | 95         |
| <b>4. MODELO TEÓRICO .....</b>   | <b>97</b>  |
| 4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS .....   | 97         |
| 4.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....  | 99         |
| 4.3 JANELAS DE TEMPO E DEMANDA VARIÁVEL EM TERMINAIS DE CROSS-DOCKING .....            | 103        |
| 4.4 REPRESENTAÇÃO MATEMÁTICA DA FUNÇÃO $\lambda(t)$ .....                              | 105        |
| 4.5 FORMAÇÃO DE FILAS NA RECEPÇÃO DOS CAMINHÕES ALIMENTADORES.....                     | 108        |
| <b>4.5.1 Fase inicial do processo estocástico sem formação de fila ..</b>              | <b>108</b> |
| <b>4.5.2 Duração do processo de descarregamento dos caminhões abastecedores .....</b>  | <b>112</b> |
| <b>4.5.3 Extensão da fila .....</b>  | <b>116</b> |
| <b>4.5.4 Tempo de permanência na fila.....</b>   | <b>119</b> |
| <b>4.5.5 Variação aleatória da extensão da fila .....</b>                              | <b>120</b> |
| 4.6 APLICAÇÃO.....   | 121        |
| <b>4.6.1 Distribuição do tempo de descarga dos veículos.....</b>                       | <b>121</b> |
| <b>4.6.2 Média e desvio padrão da taxa de descarga.....</b>                            | <b>121</b> |
| <b>4.6.3 Faixa de variação do número de portas (n) para recepção de veículos .....</b> | <b>122</b> |
| <b>4.6.4 Medida de ocupação da doca de descarga .....</b>                              | <b>123</b> |
| <b>4.6.5 Tempo médio de permanência no sistema .....</b>                               | <b>124</b> |
| 4.7 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MODELO TEÓRICO .  | 126        |
| 4.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....   | 127        |
| <b>5. SIMULAÇÃO .....</b>  | <b>129</b> |
| 5.1 SIMULAÇÃO UTILIZANDO O SOFTWARE ARENA .....  | 129        |

|       |  |            |
|-------|--|------------|
| 5.2   | MODELAGEM.....   | 130        |
| 5.2.1 | Fluxograma do Processo .....                                       | 131        |
| 5.2.2 | Modelagem computacional do Problema Estudado .....                 | 132        |
| 5.2.3 | Análise do Processo de Replicação Utilizando Output Analyzer ..... | 138        |
| 5.2.4 | Validação do Modelo de Simulação .....                             | 140        |
| 5.2.5 | Análise dos Resultados da Simulação .....                          | 146        |
| 5.3   | CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS...                       | 152        |
| 6.    | CONCLUSÃO E PESQUISAS FUTURAS .....                                | 155        |
|       | <b>BIBLIOGRAFIA .....</b>  | <b>157</b> |
|       | <b>APÊNDICE .....</b>  | <b>169</b> |
|       | APÊNDICE A - .....   | 170        |
|       | APÊNDICE B - .....   | 183        |





## 1. INTRODUÇÃO

No ambiente econômico de hoje, eficiência e flexibilidade são fatores essenciais para elaboração ou ajustes de redes de cadeias de suprimentos. Processos mais eficientes combinados com um melhor planejamento das operações resultam em melhorias para encurtar o tempo entre o pedido de um cliente e a efetiva entrega do produto encomendado.

A cadeia de suprimentos faz a ligação entre a produção de bens de consumo (fábrica) e o mercado consumidor (cliente). Em diversos setores industriais, tanto a produção quanto o consumo se dão de forma muito espalhada e fragmentada geograficamente. Por vezes, se faz necessária a utilização de centros de distribuição como pontos intermediários de estocagem de produtos para abastecimento de centros consumidores mais distantes das fábricas.

Por exemplo, considere a produção e o consumo de carne suína e seus derivados, na forma de produtos industrializados como o presunto e a salsicha. A cadeia de produção envolve diversos atores altamente fragmentados: o fabricante de ração, o fornecedor dos animais para reprodução e engorda, os granjeiros que criam os animais, a fábrica de processamento de carnes, as grandes redes de supermercados e os pequenos varejistas locais. Num sistema como esse, claramente são necessários pontos intermediários para consolidação de conjuntos de produtos entre a fábrica e os varejistas.

A personalização hoje é muito importante: quanto mais flexível e eficiente uma cadeia de suprimentos é organizada mais fácil fica para adaptá-la a constantes mudanças nas condições do mercado.

Nos últimos anos, especialmente a distribuição e a logística têm ganhado muita atenção. Fatores tais como, melhorias de produtividade, ciclos de vida dos produtos mais curtos, maiores pressões competitivas e o crescente poder dos varejistas contribuíram para o aumento da importância logística. Além disso, os custos de estoque e custos de manuseio têm ganhado uma atenção especial (Schaffer, 1998).

O objetivo primordial de qualquer sistema logístico é garantir elevado nível de serviço aos clientes – medido pela disponibilidade de produto, entrega no horário programado, distribuição no sortimento e quantidade solicitados – e, ao mesmo tempo, com a utilização da menor quantidade possível de recursos das empresas, seja na forma de custos e despesas ou na forma de ativo permanente e capital de giro. Afinal, é preciso suprir tanto as necessidades dos clientes por elevado nível de serviço quanto a dos acionistas, que buscam o retorno sobre o capital investido.

A técnica cross-docking oferece uma vantagem básica muito importante: a redução ou eliminação da necessidade de estocagem de produtos. O cross-docking é um sistema de distribuição no qual a mercadoria recebida num armazém ou centro de distribuição, não é estocada como era prática comum até há pouco tempo, mas é rotulada e logo transferida para ser carregada e distribuída, sendo entregue ao cliente de forma imediata, ou, pelo menos, o mais rapidamente possível.

Apesar do conceito de cross-docking ser considerado uma estratégia relativamente nova na Logística, suas raízes estão no ano de 1930, havendo alegações de que foi logo usado nas operações das forças armadas dos EUA durante a Segunda Guerra Mundial. O mundo empresarial veio efetivamente reconhecer a importância do conceito de cross-docking apenas no final da década de 1980, quando foi aplicada pela rede de varejo Walmart, que alcançou assim uma economia significativa de custos (Bartholdi e Gue, 2000).

Para se ter um cross-docking efetivo alguns requisitos precisam ser satisfeitos e isso depende da atenção dada a aspectos como: parceria entre os membros, confiabilidade no fornecedor e nos produtos, comunicação eficaz dentro da organização e com os parceiros, pessoal qualificado (mão de obra) e gestão estratégica.

Neste contexto, os custos logísticos (custos de armazenagem, custo de transportes e custos de despacho) são parte importante nas pesquisas atuais. Uma parte da otimização dos custos de transporte envolve um problema de atribuição de portas (docas), que inclui a atribuição de portas para os caminhões de chegada e também para os caminhões de saída que carregam os produtos finalizados para posteriormente serem entregues aos clientes finais. A boa programação das portas, o seu dimensionamento, bem como o espaço externo de um Centro de Distribuição auxiliam os gestores na tomada de decisões que facilitem as descargas, reduzindo o tempo de espera dos caminhões na fila, e consequentemente no sistema, reduzindo custos e oferecendo um nível de serviço elevado ao cliente final.

## 1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Dentre as inúmeras dificuldades na construção de modelos complexos de simulação, destaca-se a modelagem de processos estocásticos não estacionários. Considere, como um exemplo deste tipo de processo, uma rede de supermercados que recebe caminhões com mercadorias de vários fornecedores em uma central de distribuição de forma aleatória, mas com taxas diferentes de chegadas por intervalos de

uma hora. Esta aleatoriedade é simulada dentro dos softwares ou linguagens por meio da geração de números aleatórios em observância a uma determinada distribuição de probabilidades (Poisson, Exponencial, Normal, Weibull, entre outras). A quantidade de chegadas gerada no modelo, por período, deve convergir em média para o valor definido pela taxa de chegada. Porém, vale lembrar, que isso deve ocorrer apesar da aleatoriedade intrínseca às ocorrências dessas chegadas, trânsito, caminhões quebrados, atrasos relacionados a diversos tipos de problemas.

Mais especificamente em um Centro de Distribuição que opera com a técnica logística de cross-docking, o administrador precisa saber lidar com todo tipo de atraso e possíveis inconvenientes que possam ocorrer ao longo do período determinado para o recebimento destas cargas. Uma boa programação de recebimento de mercadorias de modo que o espaço disponível para seu armazenamento (temporário) não seja completamente preenchido e a determinação do número de portas para que este descarregamento esteja de acordo com a quantidade de produtos recebidos por dia seria uma solução para evitar filas no seu entorno. Além disso, outro requisito fundamental destes processos é que a quantidade de entidades geradas ao longo de um horizonte de planejamento deve convergir rigorosamente (e não em média, como nas distribuições de probabilidade) para um determinado valor.

Desta forma, a chegada destas mercadorias no Centro de Distribuição se dá por meio de uma boa programação logística realizada pelos gestores, mas, ainda assim, depende de outros fatores aleatórios que permeiam o recebimento desta carga. Portanto, a capacidade de recebimento dessas cargas precisa ser considerada a fim de que esse centro de transbordo seja projetado (Freitas Filho, 2008).

Ainda segundo Bujis, et al (2014), na estratégia de cross-docking, três elementos são recorrentes: as operações básicas, os objetivos a serem atingidos e o número de docas disponíveis é relevante, pois em muitos casos, é importante haver capacidade para tratar o descarregamento de várias cargas simultaneamente, o que permite que o despacho de mercadorias seja mais ágil e as cargas seja melhores consolidadas.

O presente estudo trata-se de uma cadeia de supermercados que opera utilizando um terminal de cross-docking, recebendo produtos de empresas fornecedoras e os transferindo para veículos que abastecem as lojas da empresa.

A partir dessa problemática, a presente tese visa responder o seguinte questionamento:

Qual o número de portas adequado de um CD que reduza o tempo de espera dos veículos na fila?

Para responder a estas questões, nesta tese será realizada a revisão bibliográfica que contextualiza o problema, para posteriormente desenvolver um modelo e um método de solução para o problema de filas não estacionárias, de modo a permitir o desenvolvimento de um sistema computacional capaz de auxiliar as empresas transportadoras na programação de suas operações. Para o desenvolvimento dessa ferramenta de apoio à decisão, será utilizada a teoria desenvolvida por Newell (1971) e o uso de simulação que permitam obter soluções aceitáveis.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desta pesquisa é:

Aplicar um modelo não estacionário de fila para dimensionar o número de portas de descarga em um Centro de Distribuição, que opera utilizando a técnica de cross-docking, para que os caminhões não permaneçam muito tempo na fila.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos têm-se:

- Desenvolver um modelo teórico aproximado para dimensionar o número de posições de descarga dos caminhões, utilizando um modelo de não-estacionaridade e caminhões FTL;
- Desenvolver um modelo de simulação para comparar com o modelo teórico utilizando o software Arena;
- Realizar análises estatísticas afim de validar o modelo simulado;
- Analisar os resultados obtidos no intuito de gerar recomendações as empresas prestadoras de serviços logísticos.

## 1.3 JUSTIFICATIVA DA TESE

Esta tese se justifica pelo ineditismo, originalidade, relevância e contribuição.

No ambiente de distribuição de hoje, mais do que nunca, as empresas estão examinando suas cadeias de fornecimento em busca de formas criativas para reduzir os custos, gerenciar os níveis de estoque em todas as etapas da operação, aumentar a eficiência e satisfazer a demanda do cliente que exige melhores serviços.

Cross-docking é uma estratégia logística que está ganhando cada vez mais espaço dentro das empresas, que encontram um mercado competitivo.

Uma parte da gestão da cadeia que vem aumentando de importância, pois tem grande impacto na cadeia de suprimentos, é o número de portas em um CD para caminhões de chegada que abastecem os terminais de transbordo. Esta é uma questão crítica para os operadores, uma vez que determina a curto e médio prazo um planejamento nas operações de cross-docking. Um número de portas inadequado pode ocasionar filas no entorno do CD gerando prejuízos para todos os envolvidos na cadeia e conseqüentemente insatisfação para o cliente final. Junta-se ao problema de filas o fato de que a fila possa ter caráter não estacionário, ou seja, o caminhão pode não chegar no horário pré-estabelecido e assim não atingir o equilíbrio estacionário que modelos clássicos de filas exigem. Para isso tem-se a necessidade de trabalhar com uma modelagem que independa do caráter estacionário e assim propicie resultados mais próximos a realidade.

Esta tese se caracteriza pelo ineditismo. A pesquisa se apoia fortemente no trabalho do Prof. Gordon F. Newell, que desenvolveu um enfoque de Pesquisa Operacional para análise de filas não estacionárias, que se adaptam muito bem a problemas práticos de cross-docking, como analisado neste texto (Newell, 1973). Gordon F. Newell foi Professor Emérito da Universidade de Engenharia de Transportes da Califórnia, Berkeley, e um pioneiro da ciência transporte e operações de pesquisa. Um de seus principais temas de pesquisa foi a teoria das filas. Seu interesse pelos efeitos das interrupções em fluxos de tráfego pode ser observado desde 1956. Na década de 1960, ele introduziu aproximações de difusão, e forneceu as primeiras soluções analíticas para a distribuição estacionária do atraso nos sinais de tráfego, tanto pré-programado quanto “tráfego agudo”. Suas notas do curso sobre o assunto foram publicadas como um livro - Aplicação da Teoria de Enfileiramento - sem dúvida sua obra mais importante, publicado por Chapman-Hall em 1971. Uma obra-prima de clareza, o livro era completamente diferente dos tratados de filas padrão. Ele enfatizou modelos determinísticos, problemas de não equilíbrio, aproximações contínuas, análises de casos limites e teoria da difusão. Idéias diferentes de Newell ampliaram o escopo dos problemas

que poderiam ser resolvidos, e começaram as novas tendências de pesquisa. A profundidade dos pensamentos de Newell sobre teoria das filas também pode ser apreciado a partir de suas três monografias avançadas, publicado pela Springer-Verlag, em que ele sistematicamente “dissecou” vários sistemas de enfileiramento complexos anteriormente considerados intratáveis. Newell também é responsável pela introdução de aproximações contínuas para os campos de agendamento e teoria da localização. Seu artigo "Scheduling, Location, Transportation and Continuum Mechanics: Some Simple Approximations to Optimization Problems," (Newell, 1973) é um clássico que abriu a porta para a solução de um vasto conjunto de problemas de otimização. Ele deu um impulso duradouro para as áreas de design de rede de transporte e logística.

A maior parte dos estudos está relacionada com filas estacionárias, sendo sabido que, por exemplo, numa fila de espera, a maioria das respostas de interesse tende para infinito, quando o fator de utilização da fila tende para um, assumiu-se provavelmente que essa evolução era descontrolada, ou que não haveria grande interesse na informação daí recolhida. Contudo, em muitos sistemas reais, existem situações em que essas condições se verificam efetivamente. E há muitas perguntas que poderíamos formular cujas respostas teriam um inegável interesse prático.

A relevância da tese se dá pela importância que o transporte rodoviário exerce no Brasil, e pelo impacto que as filas nos terminais de transbordo acarretam em toda operação, e nos custos para as empresas prestadoras de serviços. No Brasil o sistema de filas em serviços de descarga em Centros de Distribuições é um problema comum no transporte.

A grande maioria dos estudos, por exemplo, envolvendo agendamento de caminhão considera que os caminhões estão prontos no tempo zero ou chegam aos cross-docks em tempos determinísticos. Quando essa hipótese pode ser pouco realista em alguns casos. Em casos reais, cross-docking lida com diferentes tipos de incertezas. Fazendo com que as filas em terminais de transbordo não sejam filas estacionárias.

Portanto, este estudo visa contribuir com a parte operacional do sistema de cross-docking. Permitindo que os veículos que abastecem o terminal permaneçam o menor tempo possível no sistema para descarga e o respectivo veículo de saída deixe o terminal o mais rápido possível, com carga cheia. Assim, seus gestores tem mais agilidade nas tomadas de decisões, diminuindo os custos, aumentando o nível de serviço e garantindo a satisfação do cliente final. Este estudo contribui ainda com a tomada de decisões a respeito do tamanho dos terminais de cross-

docking, determinando o número de portas de acordo com a capacidade previamente estipulada.

#### 1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Como limitação desta pesquisa tem-se:

- Não é objeto de este trabalho lidar com a parte interna do CD com elementos como: alocação dos equipamentos de manuseamento de materiais e mão de obra para auxiliar no descarregamento/carregamento dos caminhões e deslocamento dos materiais dentro do CD, toda parte burocrática que antecede a saída dos veículos das docas, roteirização, etc.
- Também não faz parte dos objetivos do trabalho a alocação de portas ideal para os caminhões de chegada (alimentadores) a fim de minimizar as distâncias internas para o abastecimento dos caminhões de saída, reduzindo assim o tempo total dos veículos no sistema.

#### 1.5 METODOLOGIA

O trabalho estudado nesta Tese surgiu de observações em sistemas reais do sistema operado em redes de distribuições de produtos e que geravam filas em seu entorno dificultando a logística de entrega dos produtos, gerando custos aos fornecedores e insatisfação ao cliente final.

Primeiramente a etapa de conceitualização é necessária que o pesquisador compreenda o problema de pesquisa de modo a descrever todas as variáveis e restrições envolvidas no processo a ser trabalhado. Para esta etapa, o estado da arte deve ser fundamentado por meio de revisão bibliográfica com o intuito de descrever e caracterizar o problema de forma correta.

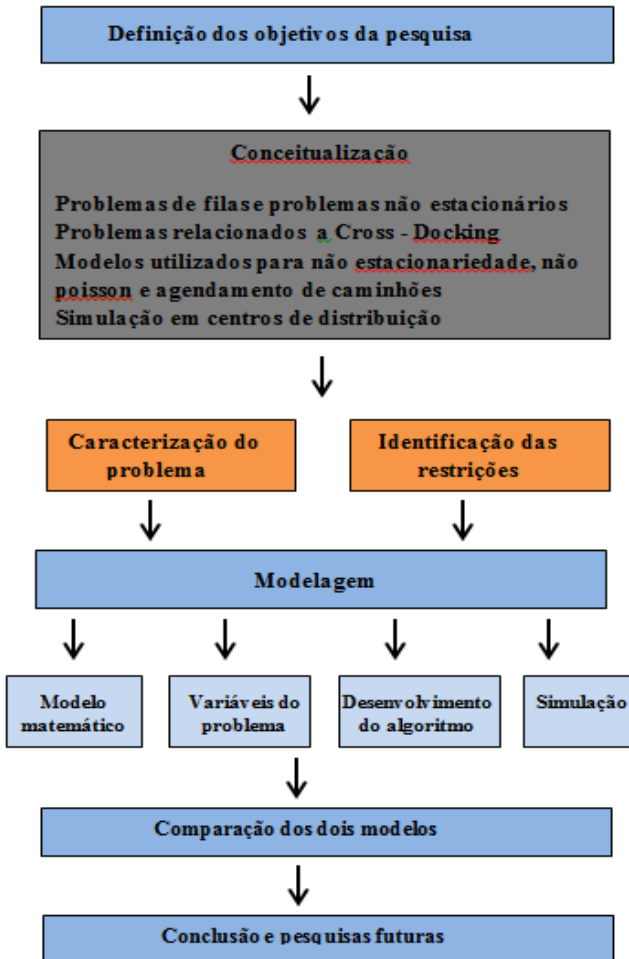
Utiliza-se para o estudo do problema a modelagem matemática. A modelagem matemática permite a construção de modelos objetivos que ilustrem o comportamento de situações ou processos reais, favorecendo a análise dos melhores caminhos para os problemas de tomada de decisão. Para Arenales et al. (2007) o processo de modelagem se inicia com a análise de um problema real, que, após a formulação, gera um modelo contendo variáveis e relações matemáticas relevantes ao problema.

Com o modelo desenvolvido se faz necessária a análise da modelagem, de modo a realizar deduções que permitam avaliar o

resultado do trabalho, conduzir melhorias para se obter conclusões. Para isso foi utilizado simulação, a fim de validar o modelo teórico. A vantagem de usar um software específico de simulação é que este dispõe de um grande conjunto de componentes matemáticos e estatísticos permitindo que o projetista atenda-se exclusivamente, ao problema que está sendo modelado.

De modo geral, as etapas desenvolvidas para esta pesquisa é ilustrada por meio da Figura .

Figura 1.1 - Desenvolvimento do trabalho



Fonte: O autor



## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este capítulo encontra-se os objetivos deste trabalho, a motivação e a definição do problema que norteou o desenvolvimento do mesmo. O restante deste trabalho encontra-se organizado da seguinte forma: Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura com tópicos de relevância para o estudo desenvolvido; o Capítulo 3 apresenta a conceituação de cross-docking e motivações para uso, vantagens e desvantagens do uso dessa técnica nos centros de distribuição, os principais layouts e modalidades de cross-docking encontrados e suas formas de organização informacional; o Capítulo 4 apresenta os principais modelos matemáticos de otimização nas diferentes áreas envolvendo o estudo de redes de cross-docking. Aplica-se o modelo clássico de filas e uma nova abordagem de modelos não estacionários é explicada e aplicada ao problema dado chegando a uma possível proposta de solução; o Capítulo 5 o problema é simulado com o auxílio do software Arena com o objetivo de validar o modelo teórico através da comparação e análises estatísticas; pra finalizar o Capítulo 6 traz as conclusões e pesquisas futuras sobre o tema estudado.



## 2. REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma descrição de alguns trabalhos anteriores, que abordaram tópicos com relevância para o trabalho de investigação.

A maior parte dos trabalhos encontrados na literatura aborda a análise dos resultados produzidos por modelos de simulação de acontecimentos discretos em situações estacionárias, na estimação pontual e na construção de intervalos de confiança para as medidas de performance de interesse. Se associarmos essa simulação a problemas não estacionários em redes de cross docking nenhum estudo foi encontrado.

Uma vez que uma parte substancial deste trabalho incide na aplicação de teoria de filas não estacionária e a outra parte em simulação de eventos discretos, a revisão bibliográfica apresentada foi dividida em duas partes: a primeira relacionado a teoria das filas e processos estocásticos não estacionários e a segunda parte com trabalhos relacionados a centros de cross-docking e simulação. Finalizando a revisão bibliográfica é apresentado alguns modelos aplicados a problema não estacionários, e gerações de variáveis aleatórias não uniformes e modelos utilizados em redes de cross-docking.

### 2.1 TEORIA DAS FILAS

A literatura sobre modelos clássicos de filas inclui várias publicações, destacando-se Saaty (1961), Newell, (1971), Page (1972), Novaes (1975) e Fogliatti e Mattos (2007). Tais modelos têm como objetivo determinar e avaliar analiticamente medidas de desempenho, que expressam a produtividade e a operacionalidade desses processos, tais como número de elementos na fila, tempo de espera até o atendimento, tempo ocioso dos prestadores de serviço, etc.

Karamouzian, Teimoury e Modarres (2011) estudam um problema de instalação de manufatura onde os produtos retornados chegam de acordo com um processo de Poisson. Os autores aplicam um modelo de filas em estado estacionário para obter a melhor política para aceitar retornos.

Knessl e Yang (2002) consideram uma fila M/M/1 com chegada dependente do tempo e taxa de serviço. Eles propõem um método exato para o problema de filas.

Jain, Juneja e Shimkin (2011) apresentam um problema de filas com um número finito de clientes. O tempo de serviço começa e termina com uma janela de tempo específica, onde muitos clientes podem fazer

uma fila antes que a instalação seja aberta para o serviço no início da janela de tempo. Eles consideram o número de clientes aleatórios com uma média finita  $E(N)$  e os tempos de serviço dos clientes como distribuições independentes idênticas.

Guan e Liu (2009) estimam o comprimento da fila com um modelo de fila estacionário  $M/E_k/c$  e determina as cotas para minimizar o custo total em sistemas STAS (static terminal appointment system) são sistemas para gerenciar as chegadas dos caminhões. A estimativa do comprimento da fila é imprecisa e o resultado dessas cotas é distribuído uniformemente durante um dia.

## 2.2 PROCESSOS ESTOCÁSTICOS NÃO ESTACIONÁRIOS E PROCESSOS DE POISSON NÃO ESTACIONÁRIOS

Tradicionalmente, a análise dos resultados produzidos por modelos de simulação de acontecimentos discretos tem abordado, no essencial, situações estacionárias, com insistência, nomeadamente, na estimação pontual e na construção de intervalos de confiança para as medidas de performance de interesse. Contudo, em muitos sistemas reais, existem situações em que o sistema não atinge um sistema estacionário, como já foi discutido aqui anteriormente.

Um primeiro trabalho encontrado na literatura que trata de filas não estacionárias é de Moore (1975). Ele analisa um sistema de filas não estacionárias baseada em diferentes funções de distribuição de chegada. Ele apresenta técnicas para aproximar vários aspectos comportamentais do sistema de filas.

Sharma e Tipper (1993) em um de seus estudos mostram a importância do uso da simulação para redes ATM (Asynchronous Transfer Mode) e o efeito de padrões de tráfego não estacionários, porém a complexidade dos modelos de redes atuais tem forçado pesquisadores a desenvolver técnicas de modelagem alternativas. No artigo os autores apresentam técnicas baseada em métodos numéricos para modelar tráfego Markoviano de multi-classes, com e sem prioridade em redes ATM sob padrões de tráfego estacionários e não estacionários.

Jongbloed e Koole (2001) e Avramidis et al (2004) utilizam modelos baseados no duplo processo estocástico de Poisson proposto por Whitt (1999) para aplicarem em call centers. Eles assumem que a incerteza nas taxas de chegadas é determinada por uma variável aleatória, cujo valor pode ser interpretado como ocupado um dia, ou um período de interesse.

Kelton, Sadowski e Sturrock (2004) apresentam um modelo de simulação, implementado no Arena, para uma central de atendimento ao público. Como neste sistema, as chegadas de entidades (chamadas) se dão por um processo não estacionário (as taxas de chegada variam por período), toda a complexidade da geração de clientes é tratada dentro do próprio modelo pelos projetistas.

Harrod e Kelton (2006) analisam os riscos de ignorar a não estacionaridade nos processos de Poisson, citam como exemplo, as taxas de chegada aos centros telefônicos que variam amplamente com o horário do dia ou o dia da semana, e as flutuações nas tarifas de chamadas ocorrem em resposta à publicidade, tendências sazonais, etc. Para simular tais sistemas sem contabilizar a não estacionaridade (por exemplo, usando apenas a taxa média de chegada ao longo do dia), pode-se levar a subestimação das principais medidas de desempenho devido ao congestionamento do sistema não identificado. Para isso os autores demonstram três algoritmos para a geração de processos de Poisson com taxas instantâneas constantes.

Marques (2005) propõe uma metodologia que permite analisar, de modo inovador, os resultados produzidos por vários tipos de simulações não estacionárias, através da construção de metamodelos lineares ou não lineares. Generalizando alguns resultados analíticos, existentes, na literatura especializada de probabilidades e estatística, para modelos de filas de espera não estacionárias, para permitir a avaliação experimental da metodologia proposta, em relação a esses resultados.

Ferreira (2009), em sua tese apresenta e propõe métodos para a geração de entidades, em ambientes de simulação, para processos estocásticos não estacionários, incorporando todas as relações matemáticas e estatísticas indispensáveis para a geração de entidades e, por conseguinte, liberando o projetista dessas complexidades. Ferreira (2009) aplica os métodos em três áreas: call center, logística e ciência da computação.

Chen et al. (2011) estimam o comprimento da fila em um terminal com um modelo de fila M/M/1 não estacionário. O objetivo de seu modelo é minimizar a soma ponderada de três componentes: o somatório do desvio quadrático entre tempo de chegada preferido dos caminhões e a mudança de chegada do tempo de cada caminhão, o somatório do comprimento da fila no portão e a soma do comprimento da fila no pátio. No entanto, eles não mencionam como determinar os pesos dos três componentes.

Chen et al. (2013) analisa um sistema com o modelo de fila não estacionário e propõe uma nova aproximação para resolver o modelo.

Eles também aplicam um modelo de otimização para reduzir a fila de caminhões.

Nos últimos anos, no entanto, houve um interesse substancial em construir modelos mais sofisticados para o processo de chegada levando em conta determinados recursos não-Poisson, como a sobredispersão e a autocorrelação.

Neste contexto Gerhardt e Nelson (2009), estendem as técnicas que transformam um processo de chegada de Poisson estacionário em um processo de chegada não estacionário e não-Poisson.

### 2.3 PROBLEMAS RELACIONADOS A CENTROS DE CROSS-DOCKING

Bartholdi e Gue, 2004 determinam a forma ideal para um cross-dock sob diferentes condições operacionais. Estas condições são geradas através da variação de quatro características: número de portas, atribuição de portas, padrão de fluxo de carga, layout. As formas de cross docks consideradas são I, L, T, H e X. Cada forma é avaliada levando-se em consideração os custos de mão de obra associados, que são estimados usando uma métrica para a distância média dos percursos dos equipamentos de manuseio de materiais. Com base nos resultados experimentais encontrados, a medida que o tamanho dos cross docks aumentam as formas mais eficientes são I, T e X sucessivamente. A experiência sugere que a forma I é a mais eficiente para cross docks menores e pode ser expandida para a forma T quando se aproxima de 150 portas, devendo ser projetada em forma X com cerca de 200 portas ou mais.

Chen, et al. (2006) estudam um problema semelhante ao que eles chamam problemas de múltiplos cross-docks. As principais diferenças são que os suprimentos e as demandas não são divisíveis e que diferentes produtos podem ser considerados. Além disso, o tempo de transporte não é considerado nesta abordagem. Uma formulação de programação de número inteiro do problema é fornecida. Os autores propõem três heurísticas (simulated annealing, tabu search e uma combinação de ambos) para resolver o problema. Estas heurísticas fornecem melhores soluções do que aquelas obtidas pela resolução da formulação de programação de números inteiros com CPLEX. Entre as três heurísticas, tabu search parece dar os melhores resultados.

Vahdani e Zandieh (2010) aplicaram cinco algoritmos meta-heurísticos, a saber: algoritmo genético (GA), *tabu search* (TS), *simulated annealing* (SA), *electromagnetism-like algorithm* (EMA) and *variable*

*neighborhood search* (VNS) para agendar os caminhões em sistemas de cross-dock a fim de minimizar o tempo total de operação quando um buffer de armazenamento temporário que armazena itens temporariamente está localizado na estação de embarque. Para estas cinco meta-heurísticas, eles também consideraram dois tipos de funções objetivas para desenvolver múltiplos modelos objetivos para tomada de decisão. A solução obtida com a heurística desenvolvida por Yu e Egbelu (2008) é utilizada como solução inicial ou como membro da população inicial. Os experimentos computacionais mostram que essas meta-heurísticas podem melhorar as soluções obtidas pela heurística de Yu e Egbelu (2008) à custa de um tempo de computação ligeiramente superior.

Vahdani, et al (2010) estudou o problema de agendamento em um sistema de cross-docking onde não há armazenamento temporário e caminhões incompletos são mantidos e voltam para a doca para completar suas tarefas. Os autores aplicaram duas meta-heurísticas: algoritmo genético e o algoritmo *electromagnetism-like* para agendamento de caminhões com o objetivo de minimizar o tempo de fluxo total do sistema.

Vahdani, et al (2012) propôs uma nova meta-heurística híbrida para o planejamento de roteamento de veículos em sistemas de cross-docking. Este novo algoritmo híbrido incorpora os elementos da *Particle Swam Optimization*, *Simulated Annealing* e *Variable Neighborhood Search* para aprimorar seus recursos de pesquisa. Mousavi, Vahdani, Tavakkoli-Moghaddam e Hashemi (2014) centraram-se na localização dos centros de cross-docking e na programação dos veículos e apresentaram dois modelos MILP sob o ambiente estocástico difuso que integram a localização de múltiplos centros de cross-docking e o problema de agendamento de caminhão. Eles propuseram uma abordagem de programação estocástica- possibilística fuzzy híbrida para resolver os modelos.

Erera, et al (2013) propõem um modelo diferente para incluir restrições temporais a um problema de planejamento na rede de cross docking. Assumindo fluxos de frete fixos e conhecidos, Erera et al (2013) propõe um procedimento trifásico para encontrar uma rota otimizada para cada embarque. Na primeira fase do modelo o autor constrói pacotes temporários de transferências consolidadas, e, conseqüentemente, atribui capacidade para cada rota da rede. Na segunda fase, uma janela de despacho é atribuída para consolidar os pacotes de embarques criados na primeira fase. A terceira fase atribui aos motoristas dos caminhões as rotas determinadas na segunda fase.

Javanmard, et al. (2014) apresentam uma extensão do modelo de Chen, et al. (2006) lidam com problemas com vários tipos de produtos, múltiplos cross-docks e janelas de tempo para distribuidores e selecionadores, mas cada entrega ou coleção pode passar por um cross-dock por tipo de produto. Os autores, depois de mostrarem que o problema é *NP-hard*, propõe um *imperialist heuristic*, *Imperialist Competitive Algorithm* (ICA), para resolver o problema. Este método é semelhante aos algoritmos genéticos e, comparando seus resultados com os resultados obtidos usando a linguagem GAMS 22.9 (com um limite de tempo de 2h), a heurística chega a soluções de boa qualidade (com lacunas de menos de 2% quando comparadas às melhores Soluções de GAMS para as soluções encontradas pela heurística) para as 40 instâncias geradas e encontra soluções viáveis para as instâncias maiores para as quais o software GAMS não encontrou uma solução.

Yan (2014) estuda o problema de agendamento de caminhão. O autor apresentou uma formulação de programação inteira e aplicou em quatro algoritmos, a saber: *local search*, *simulated annealing*, *large neighborhood search* e *beam search*. O autor afirma que os algoritmos por ele propostos resolvem problemas de instâncias maiores do que os propostos por Boysen et al (2010).

Bujis, et al (2014) apresenta uma classificação e estrutura para sincronização de redes de cross docking. Eles afirmam que a maioria dos artigos aborda o cross docking isoladamente. Os autores ilustram a importância da sincronização no cross docking com dois problemas da vida real que não foram abordados na literatura.

Mousavi e Vahdani (2016) desenharam um modelo chamado IFHGDM para resolver a tomada de decisão de localização de cross-docking. O modelo de seleção apresentado foi de acordo com o grupo de modificação intuitiva Fuzzy COPRAS e TOPSIS com uma hierarquia de múltiplos níveis.

Nikolopoulou et al (2016) apresenta uma nova abordagem para o problema de roteirização de veículos. O autor afirma que a maioria dos artigos assume que cada fornecedor esta conectado com apenas um cliente, enquanto que, na realidade a maioria dos casos das frotas de caminhões é usada tanto nas rotas de chegada como nas rotas de saída. Para isso o autor desenvolveu um método de programação de memória adaptativa juntamente com um algoritmo Tabu Search.

Em Fanti et al. (2016), analisou um sistema de cross docking com modelo de pós-distribuição (a carga de entrada chega sem um pré-destino determinado, e os trabalhadores no cross docking atribuem os destinos para os embarque) onde uma máquina de separação foi analisada para



determinar a programação ideal das operações internas. Este sistema de cross docking pós-distribuição usou uma máquina de separação para empacotar as caixas de saída com produtos mistos e as caixas empilhadas foram consolidadas em paletes de saída. Programas lineares inteiros mistos e um algoritmo heurístico foram criados para resolver o complexo problema de agendamento das operações internas deste tipo de problema. Este trabalho forneceu modelos capazes de determinar a programação ideal para as operações da parte interna de uma rede de cross docking pós-distribuição projetado com base em um sistema de classificação automatizado.

Goodarzi e Zegordi (2016) consideram um problema de localização-roteirização de uma rede de distribuição com um conjunto de fornecedores. Os autores afirmam que os custos de fornecimento podem diminuir se algumas cargas puderem ser enviadas diretamente e assim não devem ser levadas em consideração para a determinação da localização dos cross-docks. Utiliza o modelo da literatura NP-hard, e a metaheurística do algoritmo BBO é utilizado para resolver o problema.

Enderer (2017) apresenta uma combinação do agendamento de porta e do problema de roteirização. O modelo visa tomar três níveis de decisão: (i) atribuição de caminhões para as portas de chegada; (ii) planos de roteirização interna do cross-dock e atribuição dos produtos de chegada para as portas de saída; (iii) planos de roteamento de veículos para transportar os produtos para o cliente final usando as portas de saída. O objetivo do modelo é minimizar o total de tempo de manuseio dos produtos desde sua chegada até sua saída e minimizar custos com transporte.

### **2.3.1 Simulação em Centros de *Cross-Docking***

A análise dos resultados produzidos por modelos de simulação de acontecimentos discretos é, seguramente, a área científica mais ativa em simulação estocástica. Tradicionalmente, a análise dos resultados produzidos por modelos de simulação de acontecimentos discretos tem abordado, no essencial, situações estacionárias, com insistência, nomeadamente, na estimação pontual e na construção de intervalos de confiança para as medidas de performance de interesse. A natureza fortemente autocorrelacionada das respostas de interesse, nomeadamente, em modelos de filas de espera, tem desafiado a criatividade dos analistas da simulação, que têm proposto os métodos e heurísticas mais variados para ultrapassar aquela dificuldade, em especial, quando se trata de

estimar medidas da variabilidade das respostas do modelo, por exemplo, intervalos de confiança (Marques, 2005).

A simulação vem ganhando cada vez mais importância devido ao aumento da complexidade dos sistemas logísticos em decorrência dos mercados cada vez mais exigentes. A simulação pode modelar com sucesso sistemas produtivos com vários níveis de detalhamento e de forma dinâmica e fornecer soluções mais rápidas e eficazes.

Cheng (1985) apresenta simulação como uma ferramenta ideal para modelar Sistemas de Manufatura Flexíveis, pois permite a modelagem do sistema de manufatura e o projeto e avaliação das várias configurações possíveis. O modelo pode fornecer subsídios para auxiliar na escolha das ferramentas e dos equipamentos; analisar os sistemas de manuseio de materiais; analisar os efeitos dos ajustes nos dispositivos de materiais e pode, também, estabelecer uma configuração para o layout, de tal forma que o fluxo de materiais seja plenamente satisfeito.

Roher (1995) explicou como a simulação ajuda a garantir o sucesso das operações de *cross-docking*. Por exemplo, o problema de alocação de portas de caminhões de entrada e saída em um CD foi previamente estudado por abordagens de simulação.

Ferreira & Carnieri (2007) apresentam um modelo de simulação para o complexo de carga a granel do Porto de Paranaguá, cujo objetivo foi o de avaliar o comportamento do sistema quando submetido a determinado volume de trabalho.

Dobrusky (2003) apresenta um bom exemplo da aplicação da simulação para encontrar um número ideal, analisar tamanho e definir quais as melhores localizações dos Centros de Distribuição que operam em *cross-docking* para uma melhor distribuição dos produtos de Buenos Aires para o interior do país.

Existem ainda inúmeros estudos com uso da simulação em variados campos de manufatura, de manuseio de materiais e de serviços.

Gordon (1978) ainda classifica os modelos matemáticos dinâmicos numéricos como modelos com alto grau de reprodutibilidade de sistemas reais que possuem intrinsecamente um embasamento matemático que pode aceitar valores determinísticos e estocásticos. Além disso, podem-se considerar variações instantâneas dos parâmetros do sistema. Portanto, muitas empresas estão recorrendo ao uso da simulação para avaliar seus sistemas produtivos e ajudar na tomada de decisões.

Banks & Gibson (1995) acreditam que os sistemas industriais e os projetos de engenharia - como sistemas automatizados de manuseio de materiais, armazenamento e controle - evoluem quase que continuamente durante as várias etapas dos ciclos de vida do projeto. Portanto, qualquer

mudança no sistema real - layout, procedimentos operacionais e suposições, lógica de controle, chegada da ordem e perfis de quantidade, etc. - pode ter um efeito significativo na operação do sistema e na taxa de transferência. Sempre que necessário, um modelo de simulação deve ser modificado periodicamente para rastrear essas mudanças e usado para revisar medidas importantes relativas à capacidade e operação do sistema.

Bartholdi e Gue (2000) construíram um layout de *cross-docking* eficaz utilizando um procedimento de “*Simulated Annealing*” que troca pares de caminhões sequencialmente.

Gue e Kang (2001) introduzem um novo tipo de fila, denominada “staging queues” ou “filas em estágio” para o caso de cargas unitizadas, principalmente em paletes, para poder comparar os diferentes protocolos de preparação do frete. Diferentemente do tipo de fila comum, onde os clientes seguem em frente depois de cada serviço deixando espaços vazios no fim da fila para novos clientes, este novo tipo de fila formado por paletes não se move para frente depois de cada serviço, é preciso algum tipo de manuseamento manual para que isso ocorra. Os autores utilizam o pacote de *Simulação Arena* para investigar três áreas: (i) o desempenho das “filas de estágio” em paralelo; (ii) o comportamento das filas de etapas seriais (uma após a outra), que são encontrados em alguns *cross-docking* do setor de varejo; (iii) desenvolver resultados para um sistema fechado, no qual as chegadas aguardam para se juntar a uma fila bloqueada ao invés de empacarem. Seus resultados, mesmo irrealistas para muitas situações práticas, afirma o autor, dão algumas dicas sobre o comportamento de diferentes “filas em estágio”.

Taylor e Noble (2004) também usam a simulação para analisar os métodos de estadiamento em vários ambientes de *cross-docking*. Em seu estudo, três alternativas de preparo são analisadas e três cenários de demanda de saída. Após as simulações, eles avaliam esses cenários com quatro critérios de desempenho: o tempo médio de fluxo por palete, o makespan para completar o processamento de toda carga de entrada, o número médio com base no tempo de paletes alocados em áreas de preparo e o número médio com base no tempo de paletes alocados na região central da fila de transbordo. As questões levantadas por Taylor e Noble (2004) motivaram um estudo realizado por Sandal (2005) que analisa as estratégias de preparo mais apropriadas na operação de *cross-docking* em função dos atributos da carga e em função do carregamento dos reboques, a fim de permitir carga ótima nos caminhões de saída. Integrado ao algoritmo desenvolvido neste estudo para maximização dos veículos de saída, um modelo de simulação utilizando o *Simulador Arena* analisou quatro estratégias de preparo em um ambiente de *cross dock*.

Maglabeh, et al (2005) introduziu um modelo de simulação em um CD que opera com a técnica de *cross-docking* que recebe cargas de vários fornecedores e de vários destinos. O estudo foca nas operações internas do CD (caminhões de entrada e saída, consolidação de carga e descarga, filas geradas pelo excesso de caminhões, etc), não são abordados neste estudo.

Arnaout, et al (2010), propõe um modelo de simulação de eventos discretos das operações de *cross-docking*, revelando alguns dos parâmetros mais importantes que devem ser investigados. O modelo proposto foi gerado com auxílio do *Simulador Arena* e utiliza eventos discretos para alocar os pedidos aleatoriamente em três armazéns diferentes. A natureza estocástica do sistema permitiu analisar diferentes cenários e revelar a importância de alguns parâmetros do modelo.

Adami Alberto (2011) testa duas estratégias diferentes de manuseamento e preparo de materiais para entender como elas afetam o desempenho dentro de um terminal de cross dock em relação a: (i) quantidade de recursos necessários (empilhadeiras) e (ii) tempo esperado para carga e descarga que chegam/partem do cross dock. A principal ferramenta é a utilização do software de simulação *Rockwell Arena*.

Além destes trabalhos citados, Van Belle, et al (2012) e Agustina (2010) apresentam uma extensa revisão da literatura existente sobre *cross-docking*. Os artigos discutidos são classificados com base no tipo de problema abordado (que vão desde problemas mais estratégicos ou táticos até mais operacionais).

Cox (2017) utiliza a simulação com o software *Arena* para analisar dois tipos de trabalhadores dentro de uma rede de cross docking, a saber, um grupo de trabalhadores que podem realizar qualquer tarefa (trabalhador global) e o outro grupo de trabalhadores que são designados para tarefas específicas (trabalhadores específicos). O sistema foi modelado desde a sua chegada ao centro de *cross-docking* – operando com modelo de pós-distribuição – e termina com a carga paletizada para seu destino final. O autor considera para os caminhões de chegada uma distribuição Expo (.25) e o número de caminhões que chegam por dia baseado numa distribuição Triangular.

Cox (2017) foi o artigo mais recente utilizando simulação no tratamento de redes de *cross-docking* encontrado e ainda considera as chegadas dos caminhões sem levar em consideração a não-estacionaridade proposta neste trabalho.

Martins et al (2017) descreve uma metodologia híbrida de otimização- simulação para analisar e redesenhar redes farmacêuticas atacadistas. Primeiramente os autores estabelecem um modelo de

programação matemática para gerar soluções de acordo com os parâmetros definidos inicialmente, e estes posteriormente são analisados usando um modelo discreto de simulação. O objetivo do modelo é encontrar uma solução de design de rede que reduz os custos totais para o atacadista.

No trabalho de Martins et al (2017) assim como o proposto por esse estudo tem por objetivo a comparação de dois métodos de análise, simulação e otimização para melhorar as soluções previamente obtidas.

Alguns trabalhos citados aqui mostram a importância que a ferramenta simulação tem encontrado, tanto no meio acadêmico como empresarial, notadamente para aplicações em sistemas de manufatura, movimentação e armazenagem de materiais. Em especial no auxílio ao uso da técnica logística envolvendo *cross-docking*.

O planejamento estratégico da cadeia de abastecimento implica em tomada de decisões sobre a concepção e capacidades operacionais implícitas na rede de uma empresa ligando fornecedores, instalações de manufatura e distribuição e clientes. Para muitas empresas os modelos de otimização têm se mostrado eficientes na tomada de decisões estratégicas sob uma variedade de cenários futuros. Dependendo da instalação e condições de operação ou estratégias empregadas é possível gerar vários cenários de *cross-docking*.

Uma breve explicação sobre a concepção do *cross-docking* tem que ser feita antes da apresentação dos modelos existentes na literatura. Esses modelos representam as várias áreas onde a modelagem e simulação podem ser aplicadas para se obter um melhor aproveitamento do sistema de *cross-docking*.

As primeiras decisões importantes dizem respeito à localização e layout dos terminais de *cross-docking*. Como o *cross-docking* será parte importante de uma cadeia de suprimentos, essas decisões estratégicas terão um impacto importante sobre a forma como os produtos fluem através da rede (Van Belle et al, 2012).

Em primeiro lugar, o número de *cross docks* tem de ser determinado juntamente com a sua posição no interior da rede. Instalações podem ser localizadas perto dos seus fornecedores ou perto dos seus clientes. De qualquer maneira, o aspecto mais importante é que as relações de transportes sejam servidas por caminhões completos (FTL). Por exemplo, os fornecedores que são localizados dentro da mesma região, que têm a mesma área-alvo e cujas entregas individuais não encham um caminhão, podem ser ligados a um *cross dock* localizado dentro dessa região. O mesmo vale para os clientes localizados dentro da mesma área de destino. Entregas são consolidadas ao lado dos

fornecedores e ordenados em um cross dock localizado dentro dessa área-alvo. Quando um cross dock for parte de uma rede Hub & Spokes o problema de localização torna-se mais complexo, à medida que múltiplos terminais têm que ser instalados ao mesmo tempo. Em seguida, o objetivo é encontrar locais ideais para as diferentes instalações. Após a localização geográfica ser definida, o layout dos terminais de cross-docking tem que ser determinados. Não só a forma geral dos cross docks tem que ser concebida, mas também a disposição e as dimensões das áreas internas, tais como a área de armazenamento, portas das docas e zonas administrativas. Mais importante ainda, o número de portas tem que ser determinado como esta o tamanho e a capacidade do cross dock. Determinar o número de portas afim de criar o layout da forma mais eficiente possível, os dados operacionais como por exemplo, o número de caminhões para serem manuseados e suas cargas devem ser antecipados. Além disso, como os custos de investimento aumentam de forma desproporcionada com o número de portas, este último deve ser ligeiramente superestimado para permitir ter capacidade de reposição (Tiedemann, 2009) .

O próximo problema no processo de planejamento é o problema de *roteamento de veículos*. Esta decisão operacional envolve decidir como bens devem ser pegos de vários locais antes de chegar ao cross dock e como eles devem ser entregues após a consolidação no cross dock. Caminhões geralmente começam a partir e chegar na instalação de cross-docking simultaneamente, enquanto caminhões de entrega só retornam ao cross dock depois de terminar suas rotas (Liao et al, 2010). O objetivo é determinar o número de veículos e as suas vias, bem como os tempos de chegada de cada veículo, de modo a minimizar a soma dos custos operacionais e os custos de transporte.

Uma vez que um caminhão chega ao cross-docking, este tem que ser atribuído a uma porta de descarga, também chamado de porta de entrada. Esta decisão é parte do problema de alocação de portas, que não só inclui a atribuição de caminhões que chegam para as portas de entrada, mas também a atribuição de caminhões de saída para carregamento (ou portas de saída). Mas antes que os caminhões possam ser atribuídos a uma porta de saída, o arranjo físico destas portas tem que ser determinado.

Se houver mais caminhões do que portas disponíveis as portas dos terminais podem ser vistas como recursos escassos, por isso devem ser programados ao longo do tempo. Este é o assim chamado *problema de agendamento do caminhão* que pode subdividir-se em tarefas de descarregamento de caminhões de entrada e carregamento de caminhões de saída. Normalmente, as operações de carga e descarga são separados

por um certo lapso de tempo, dependendo de quão eficientemente as mercadorias são tratadas dentro do terminal (Boysen e Fliedner, 2010). As portas das docas que processam essas duas tarefas só são capazes de processar um caminhão em um tempo se são assumidos como suficientemente equipados. Além disso, porque estas portas podem ser vistas como recursos escassos, o problema agendamento de caminhão é formulado usando um tempo relacionado a função objetivo, vinculado a duas decisões inter-relacionadas: onde e quando para processar os caminhões.

Uma vez que as mercadorias tenham sido descarregadas na instalação de cross-docking, a próxima questão é como os bens devem ser manuseados dentro do terminal. Embora os produtos sejam transportados diretamente de caminhões de entrada para caminhões de saída em um contexto de cross-docking puro, algumas situações exigem que as mercadorias sejam armazenadas temporariamente em uma área de armazenamento intermediário. Isto é, por exemplo, o caso da mercadoria que precisa ser carregada em uma determinada ordem ou se os bens têm que esperar o seu caminhão de saída específico chegar. O tomador de decisão é então confrontado com a forma como as mercadorias devem ser atribuídas às diferentes partes da área de *armazenamento temporário*. Na maioria dos casos a área de armazenamento consiste de uma série de linhas paralelas, com espaço suficiente entre elas para permitir que empilhadeiras e trabalhadores tenha acesso aos bens que são armazenados no chão ou em prateleiras (Vis e Roodbergen, 2008).

O objetivo aqui é determinar o melhor local de armazenamento tendo em conta os tempos de manuseio, os tempos de espera e a distância total percorrida dentro da cross dock. Por causa da descarga e da porta da doca de carregamento são geralmente conhecidos de resolver o problema de atribuição de porta da doca, isso pode ser feito diretamente, em vez. Outro problema operacional intimamente relacionado com o armazenamento temporário é a forma como os funcionários devem ir através da área de armazenamento para armazenar ou redistribuir produtos (Vis e Roodbergen, 2011). Finalmente, há outros problemas associados com o cross-docking e estes incluem a *escolha dos recursos* necessários para realizar o tratamento interno dos bens e da *programação destes recursos*. Na maioria dos casos, os produtos são tratados por um conjunto de empilhadeiras e um número de trabalhadores que operam estas empilhadeiras. Em outros casos, o tratamento é efetuado por um conjunto de correias transportadoras ou por veículos guiados automatizados. O objetivo para os tomadores de decisão, no entanto, continua a ser a mesma em todos os casos: determinar a combinação certa

e horário ideal destes recursos, uma vez que estes em parte determinam a capacidade da instalação de cross dock.

Winston (1993) define que um sistema é um conjunto de entidades que agem e interagem com um determinado propósito. Observando que fatores externos podem afetar este sistema, a fronteira de estudo deve ser delimitada pelo modelador de acordo com sua finalidade. O processo de modelagem deve inicialmente buscar uma clara compreensão da estrutura e dinâmica do sistema real a ser simulado e somente então avançar para a derivação dos procedimentos experimentais que possibilitarão analisar seu comportamento.

De forma geral, um modelo de otimização de rede de cadeia de abastecimento tem como objetivo minimização do custo total ou maximização da receita líquida. Essas otimizações são realizadas sujeitas a restrições para atender os tempos de resposta de demanda e entrega, outras medidas de serviços de clientes e uma variedade de capacidades de recursos.

## 2.4 MODELOS DE PREPARAÇÃO DO FRETE: UM E DOIS ESTÁGIOS

O fluxo de material dentro de um cross dock de carga começa com os caminhões descarregando em uma porta pré-determinada e termina com esse material sendo carregado em portas de saída, onde caminhões preferencialmente cheios encaminham os pedidos para os clientes finais. No caso ideal, os trabalhadores responsáveis por essa transferência transferem os paletes diretamente dos caminhões de entrada para os caminhões de saída, porém na prática isso raramente acontece, pois existe uma necessidade de: (i) realizar processos de rotulagem, código de barras, padronização da carga; (ii) separação dos pedidos; (iii) esperar por itens de uma ordem que ainda não se encontra no terminal de transferência; (iv) alocar no caminhão de saída cargas na ordem certa para as entregas, por exemplo, cargas entregues primeiro na rota determinada tem que ser alocadas no caminhão por último. Portanto, as cargas acumuladas nos armazéns, onde ocorre esse fluxo de material, podem se tornar um grande problema tanto para os trabalhadores que manuseiam empilhadeiras (congestionamentos), quanto um impacto direto nos custos (hora extra de trabalhadores, custos de armazenamento, custos de trabalho).

No modelo de um estágio, como visto anteriormente, os paletes são descarregados e alocados em vias correspondentes a portas de entrada ou saída. Se os paletes já estão pré-empacotados, podem ser re-divididos para diferentes destinos, porém na prática isso raramente acontece. Um grande



problema enfrentado pela maioria das operadoras de cross-docking é a heterogeneidade das cargas que chegam nos cross docks de diversos fornecedores, para posteriormente serem carregados nos veículos para seu destino final. Por exemplo, numa rede supermercadista, que chegue um caminhão com produtos alimentícios não perecíveis de uma mesma indústria, envolvendo leite em pó, café solúvel, achocolatados, etc., todos embalados em caixas de papelão. Esses produtos, uma vez descarregados numa porta de entrada da doca de recepção, são conduzidos a uma das vias de descarregamento, de acordo com a Figura . Não existe uma identificação de destino individualizada pacote por pacote, pois os produtos de cada tipo são homogêneos dentro de cada categoria específica, portanto as cargas chegam sem o destino final. Depois de feita a roteirização por algum operador logístico, onde este aloca na rota de cada veículo os destinos que melhor se ajustam as entregas para aquele dia, o funcionário recebe o borderô referente ao carregamento de um determinado veículo, verifica quantas caixas, digamos, de leite em pó, serão carregadas, vai à via onde está esse produto, coloca o número certo de caixas no carrinho, e continua a operação levando o produto a ser carregado no respectivo veículo local. Esse processo fica mais eficiente quando toda a carga é recebida e despachada em paletes, pois então se empregam equipamentos de melhor produtividade.

No modelo de dois estágios os caminhões que chegam descarregam na via referente a porta de entrada, após este descarregamento são rotulados com códigos de barras, e encaminhados por funcionários que re-dividem os paletes para as vias correspondentes às portas de saída.

Em pesquisa recente Adami Alberto (2011) testa estas duas estratégias diferentes de manuseamento e preparo de materiais para entender como elas afetam o desempenho dentro de um terminal de cross dock em relação a: (i) quantidade de recursos necessários (empilhadeiras) e (ii) tempo esperado para carga e descarga que chegam/partem do cross dock. Não é levado em consideração no modelo desenvolvido aspectos como: otimização do agendamento de caminhão ou o número de portas necessárias para minimizar o tempo de espera do caminhão para carregamento/d Descarregamento nos cross docks. A principal ferramenta é a utilização do software de simulação Rockwell Arena, antes, porém o autor dimensiona a necessidade de recursos no modelo tanto para o cross dock de estágio único, quanto para o cross dock de dois estágios para poder executar de forma eficiente todos os conjuntos de dados adotados. Os indicadores de desempenho utilizados por ele no modelo são:

- tempo de trânsito, tempo de carga, tempo de pista, tempo de cruzamento;
- quantidade de empilhadeiras necessárias;
- taxa de utilização das empilhadeiras;
- tempo de espera dos caminhões de saída;
- número de pedidos falhos (não encaminhados aos seus destinos finais).

As conclusões obtidas pelo autor de acordo com as premissas estabelecidas são: (i) de que o cross dock de dois estágios é mais versátil do que o de estágio único. Após ser dimensionado, de fato, ele pode desempenhar eficientemente as operações usando o mesmo número de recursos, apesar do gerenciamento dos caminhões de entrada/saída mudar; (ii) a estratégia de preparar diferentes tipos de carga em diferentes pistas não melhora as operações de carregamento quando as atividades de carga e descarga ocorrem em momentos diferentes do dia. Isto é causado pelo atraso entre as chegadas e saídas de cargas. Portanto, as empilhadeiras podem encontrar todos os itens na pista correspondente a porta de saída. Dessa forma, as distâncias que as empilhadeiras precisam se deslocar no estágio único são bem menores do que as distâncias no cross dock de dois estágios. Isso possibilita obter tempos menores para a atividade de carregamento, apesar do tempo de busca ser muito alto. Por outro lado, a medida que a simultaneidade entre as atividades de carga e descarga aumenta, a probabilidade de não encontrar na pista o item correto correspondente a porta de saída aumenta, e as empilhadeiras precisam buscar por isso em outras pistas. Dessa forma, eliminando o tempo de busca e utilizando um ordenamento preciso e ordenado da carga, o processo de sortimento leva a um desempenho melhor da atividade de carregamento.

Gue e Kang (2001) introduzem um novo tipo de fila, denominada “staging queues” ou “filas em estágio” para o caso de cargas unitizadas, principalmente em paletes, para poder comparar os diferentes protocolos de preparação do frete. Diferentemente do tipo de fila comum, onde os clientes seguem em frente depois de cada serviço deixando espaços vazios no fim da fila para novos clientes, este novo tipo de fila formado por paletes não se move para frente depois de cada serviço, é preciso algum tipo de manuseamento manual para que isso ocorra. Para ilustrar este tipo de fila podemos também citar empresas de aluguel de carros. Os clientes ao devolverem seus carros devem estacionar nas pistas correspondentes a devolução, geralmente 3 à 5 pistas, na pista que tiver mais espaço. À medida que cada carro da pista vai sendo deslocados os outros carros estacionados não se movem, pois estão desocupados. Os autores utilizam

o pacote de *Simulação Arena* para investigar três áreas: (i) o desempenho das “filas de estágio” em paralelo; (ii) o comportamento das filas de etapas seriais (uma após a outra), que são encontrados em alguns cross-dockings do setor de varejo; (iii) desenvolver resultados para um sistema fechado, no qual as chegadas aguardam para se juntar a uma fila bloqueada ao invés de empacarem. Assumem que chegadas e tempos de serviços (a partir de único servidor) estão exponencialmente distribuídos. Seus resultados, mesmo irrealistas para muitas situações práticas, afirma o autor, dão algumas dicas sobre o comportamento de diferentes “filas em estágio”. Para sistemas de “filas em estágio” em paralelo, é melhor ter filas mais curtas, portanto mais pistas de entrega de carros, no exemplo das empresas de aluguel de carro. Ainda sobre os resultados, o cross-docking de dois estágios tem menor rendimento do que comparado a um cross-docking de estágio único quando agentes bloqueiam entre os estágios (ou fases).

Bartholdi, Gue e Kang (2007) modelam “filas em estágio” como uma cadeia de Markov de tempo contínuo. Seus resultados, assim como Gue e Kang (2001) sugerem que sistemas de múltiplos estágios podem ter importantes vantagens operacionais, porém seu rendimento é menor do que um sistema de estágio único. A implicação para o desenho do cross dock é que, enquanto um sistema de dois estágios oferece as duas vantagens de preparar na entrada (recebimento) e na saída (despacho), essas vantagens chegam a um custo de menor produção. Na prática isso seria realizado com maiores níveis de congestionamento a medida que a produção aumenta, ou com maiores custos de mão de obra. Eles também acreditam que se uma empresa investe em sistemas de informação e investe em relações com seus fornecedores necessários para operações de pré-distribuição, podem se beneficiar do estágio único de cross-docking aumentando assim a produtividade e diminuindo as necessidades de mão de obra.

Taylor e Noble (2004) também usam a simulação para analisar os métodos de estadiamento em vários ambientes de cross-docking. Em seu estudo, três alternativas de preparo são analisadas: fluxo automático, filas de um estágio e de dois estágios são estudados sob dois tipos (layouts) de cross docks (bloco e de alternâncias de layouts) e três cenários de demanda de saída (fluxos de mercadorias iguais, alguns têm fluxos mais elevados e colocando-os com as melhores portas, e alguns têm fluxos mais elevados, mas colocando-os em localizações menos favorecidas). Após as simulações, eles avaliam esses cenários com quatro critérios de desempenho: o tempo médio de fluxo por paleta, o makespan para completar o processamento de toda carga de entrada, o número

médio com base no tempo de paletes alocados em áreas de preparo e o número médio com base no tempo de paletes alocados na região central da fila de transbordo. O resultado para eles é que o tipo de demanda de saída é mais importante do que o layout ou o tipo de preparo.

As questões levantadas por Taylor e Noble (2004) motivaram um estudo realizado por Sandal (2005) que analisa as estratégias de preparo mais apropriadas na operação de cross-docking em função dos atributos da carga (número e dimensões de diferentes tipos de caixas) e em função do carregamento dos reboques, a fim de permitir carga ótima nos caminhões de saída. Fator como manuseamento dos materiais e utilização do espaço deve ser considerado para analisar as diferentes estratégias de preparo, de modo a encontrar um equilíbrio entre os diferentes parâmetros. Equações de 4.1 a 4.3 são as limitações das dimensões que garantem que a largura, profundidade e altura das caixas carregadas para o caminhão de saída não excedam as respectivas dimensões do reboque. A equação (4.4) garante que o peso total de todas as caixas carregadas permanece abaixo dos limites especificados. A função principal tem como objetivo maximizar o lucro, isto requer maximização dos veículos de saída e minimização do custo do espaço. Esta mesma função descrita é apenas usada para representar o problema com a finalidade de definição do problema e não para a geração de uma solução.

Parâmetros:  $\mu_{jk}$  - utilização do caminhão  $j$  do tipo  $k$  ;

$R_{jk}$  - receita gerada pelo caminhão  $j$  do tipo  $k$  por milha;

$n_{ipjkl}$  - número de pés necessários para mover o pacote  $i$  da porta de entrada  $p$  para o caminhão  $j$  do tipo  $k$  para a porta de saída  $l$  ;

$N_{jk}$  - número médio de milhas por viagem percorrida pelo caminhão  $j$  do tipo  $k$  ;

$box_{isxyz}$  - volume da caixa  $i$  com dimensões  $x$ ,  $y$  e  $z$  na faixa  $s$  da linha  $r$  ;

$T_{WHD}$  -  $W \times H \times D$  (Total do volume do reboque);

$c_1$  - custo para mover o material por pés (ft);

$c_2$  - custo por pés quadrados (sq ft) de espaço;

$A$  - total disponível da área de preparo por pés quadrados;

$W$  - largura do reboque;

$H$  - altura do reboque;  
 $D$  - profundidade do reboque;  
 $E$  - peso máximo que pode ser carregado em um caminhão de saída  $j$  do tipo  $k$ ;

$x, y, z$  - dimensão da caixa  $i$ ;  
 $r$  - única linha ou camada vertical que carrega de baixo para cima o reboque;  
 $s$  - faixa dos quais uma fila é composta por;  
 $w$  - peso da caixa  $i$  ou unidade de carga em libras.

Formulação:

$$\text{Max } \sum \mu_{jk} R_{jk} N_{jk} - c_1 \sum n_{ipjkl} X_{ijk} - c_2 A \quad (2.1)$$

$$\text{Sujeitos à: } \mu_{jk} = \frac{\sum \text{box}_{ixyz}(X_{ijk})}{T_{WHD}}$$

$$\sum X_{ijk} x_{irs} \leq W \quad \forall r \text{ e } s \quad (2.2)$$

$$\sum X_{ijk} \max(y_{irs}) \leq H \quad \forall r \quad (2.3)$$

$$\sum X_{ijk} \max(z_{irs}) \leq D \quad \forall s \quad (2.4)$$

$$\sum X_{ijk} w_i \leq E \quad (2.5)$$

$$0 \leq \mu_{jk} \leq 1$$

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{se a caixa } i \text{ é carregada para o caminhões } j \text{ do tipo } k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$n_{ipjkl} \geq 0, A \geq 0$$

$$r, s \geq 0$$

Integrado a este algoritmo para maximização dos veículos de saída, um modelo de simulação utilizando o *Simulador Arena* analisou quatro estratégias de preparo em um ambiente de cross dock. Os resultados encontrados são também quantificados utilizando uma função lucro. A análise sugere que o carregamento em reboques de saída simultaneamente ao usar uma estratégia de preparo zoneada, cargas que não podem ser carregadas imediatamente para um reboque de saída, desempenhou uma melhor estratégia comparada com as outras. Observou-se também que o transporte de mercadorias com caixas de maior dimensão melhora o

tempo total de operação, apesar da baixa utilização do volume do reboque.

## 2.5 MODELOS DE ALOCAÇÃO DE PORTAS

Muitas pesquisas têm estudado o problema de alocação de porta. É uma questão crítica, uma vez que determina a curto e médio prazo o planejamento das operações de cross-docking. A boa atribuição de portas nas docas torna a operação mais eficiente.

Duas formas de modelos envolvendo alocação de portas podem ser encontradas na literatura. Alguns autores trabalham com modelos estocásticos de alocação de portas visando o agendamento de caminhões influenciado pela roteirização dos mesmos. Por outro lado, autores modelam problemas de agendamento de caminhão tendo como foco a minimização de distâncias internas. Conforme Gue (1995), ao colocar reboques nas portas corretas, os gestores de terminais evitam que os trabalhadores viajem muito longe reduzindo as distâncias e o congestionamento de empilhadeiras e, portanto, a operação total de cross-docking.

Shakeri et al, 2012 destaca que normalmente o desejado pelos gestores dos terminais, a alocação de portas e empilhadeiras, é considerada não preemptivo – não altera a ordem de (ou tirar de execução) um processo em detrimento de outro com uma prioridade maior – em todo cross-docking. Atribuição de porta não preemptivo incorre em complexidade na viabilidade do problema estudado de agendamento de caminhão.

### 2.5.1 Modelos de Agendamento de Caminhões

O agendamento de caminhão é decisão importante na operação de cross-docking, uma vez que ele gerencia as operações diárias de cross-docking. A suavidade de funcionamento dentro do cross-docking é relacionada com a sua boa programação, que determina as sequências de caminhões de entrada e saída nas portas dos terminais de cross-docking para que alguns critérios de desempenho sejam atendidos. Os agendamentos podem afetar o congestionamento, o fluxo de produtos, o tempo total no sistema das cargas (makespan), que por sua vez podem elevar os custos. As variações nas características operacionais do cross-docking pode resultar em diferentes metodologias de modelagem e avaliação para o cronograma de caminhões. Portanto, o objetivo de

algumas programações de modelos propostos para o problema é minimizar o makespan, a fim de minimizar o custo.

O problema de agendamento de caminhão leva em conta as limitações temporais e determina onde e quando os caminhões devem ser processados. Como mencionado anteriormente, as portas são consideradas como recursos escassos que precisam ser programadas ao longo do tempo e a atribuição de caminhões para as portas é normalmente realizada em um horizonte de curto prazo.

Há uma ligação óbvia entre problema de roteamento de veículos e o problema de agendamento de caminhão. Por um lado, os tempos de chegada dos caminhões de entrada são determinados pela rota que os caminhões seguem. Estes tempos de chegada são um parâmetro importante, pois determinam quando um caminhão pode ser atribuído a uma porta de descarga (entrada no cross dock). Além disso, os prazos que devem ser levados em conta durante a programação de caminhões de saída são geralmente definidos pela rotas de entrega desses caminhões. Por outro lado, se o agendamento de caminhões também determina que os bens são combinados em um caminhão, isto influencia o encaminhamento das rotas dos caminhões de saída (Van Belle et al, 2012).

Outra ligação direta do *agendamento de caminhões* é o *agendamento de recursos internos* necessários para processar os caminhões. A atribuição de caminhões para portas determina a distância que os trabalhadores e empilhadeiras tem que viajar dentro do terminal e, portanto, influencia fortemente as distâncias percorridas, bem como a sua carga de trabalho. O impacto é ainda maior se a tarefa é realizada em um horizonte de curto prazo. Além disso, se a carga de trabalho é não devidamente equilibrada, o congestionamento pode ocorrer dentro do terminal que poderia significativamente aumentar os custos de manuseio operacionais. Então, quando a resolução do problema de agendamento de caminhão, a decisão dos decisores deve levar em conta os recursos internos e não devem esquecer ao mesmo tempo o impacto no desempenho operacional.

O modelo mais citado usado para descrever o problema de alocação de portas é o de Tsui e Chang (1990). Em sua abordagem eles apresentam um problema para atribuição de portas para caminhões com programação bilinear, de tal forma que a distância total de viagens na instalação seja minimizada. Eles assumem que cada origem e cada destino só pode ser atribuídos uma porta de entrada e uma porta de saída, respectivamente. Este é um Problema de Atribuição Quadrático (Quadratic Assignment Problem). Tsui e Chang (1992) estenderam seu

estudo e formularam um algoritmo exato baseado na técnica branch-and-bound para resolver o problema bilinear.

Parâmetros:

$M$  - número de origens;

$N$  - número de destinos;

$I$  - número de portas de entrada;

$J$  - número de portas de saída;

$w_{mn}$  - número de viagens necessárias do equipamento de manuseio de materiais para mover itens originários de  $m$  para a porta do cross dock onde o frete destinado para  $n$  está sendo consolidado;

$d_{ij}$  - distância entre a porta de entrada  $i$  e a porta de saída  $j$ ;

$s_m$  - volume de mercadorias de origem  $m$ ;

$S_i$  - capacidade da porta de entrada  $i$ ;

$r_n$  - demanda do destino  $n$ ;

$R_j$  - capacidade da porta de saída  $j$ .

Variáveis de decisão:

$x_{mi} = 1$  se a origem  $m$  é atribuída a porta de entrada  $i$ ,  $x_{mi} = 0$  caso contrário;

$y_{nj} = 1$  se o destino  $n$  é atribuída a porta de saída  $j$ ,  $y_{nj} = 0$  caso contrário.

Formulação:

$$\text{Minimizar: } \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N d_{ij} w_{mn} x_{mi} y_{nj} \quad (2.6)$$

$$\text{Sujeito à: } \sum_{m=1}^M s_m x_{mi} \leq S_i ; \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (2.7)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{mi} = 1 \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (2.8)$$



$$\sum_{n=1}^N r_n y_{nj} \leq R_j \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (2.9)$$

$$\sum_{j=1}^J j_{nj} = 1 \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2.10)$$

$$x_{mi} = 0 \text{ ou } 1 \quad m = 1, 2, \dots, M ; i = 1, 2, \dots, I$$

$$y_{nj} = 0 \text{ ou } 1 \quad n = 1, 2, \dots, N ; j = 1, 2, \dots, J$$

Onde, (2.7) garante a capacidade de cada porta de entrada  $S_i$  não ser excedida, (2.8) garante que para cada origem é atribuída apenas uma porta de entrada, (2.9) garante a capacidade de cada porta de saída  $R_j$  não ser excedida, (2.10) garante que cada destino é atribuído apenas uma porta de saída.

Bartholdi e Gue (2000) também estudam o problema de atribuição de portas, porém assumem que os caminhões de entrada são atribuídos em curto prazo. Num primeiro instante, modelam os caminhões de entrada utilizando o conceito de “reboque médio”, onde se assume que cada caminhão possui a carga a ser enviada para cada destino  $j$ , com peso  $w_j$ , com  $w_j$  sendo a média dos pesos das cargas transportadas para o destino  $j$  durante algum período histórico. Em seguida eles especificam as portas, tanto as de entrada como as de saída e as atribuições das portas de saída como sendo o “layout” das instalações de cross dock. Em terceiro lugar, porque os autores acreditam que a distância de deslocamento não é uma medida exata para determinar um ótimo “layout”, eles modelam o problema usando uma função objetivo que minimiza os custos totais de trabalho. Em vez da distância de deslocamento, o tempo de deslocamento deve ser levado em conta, o que também depende do tipo de carga, do sistema de manuseamento utilizado e do congestionamento. Portanto os custos totais de trabalho são definidos como a soma das despesas do deslocamento e os custos causados por vários tipos de congestionamento, incluindo congestionamento de espaço. Finalmente, para resolver o problema de atribuição os autores utilizaram um procedimento “*Simulated Annealing*” que troca pares de caminhões sequencialmente. No estudo de caso aplicado em um cross dock existente e com base nos resultados, eles mostram que houve uma melhora na produtividade em torno de 11,7%, eles também sugerem algumas diretrizes para tornar os “layouts” eficientes.

Van Belle et al (2012) apresenta um modelo para a resolução do problema de agendamento de caminhão com o objetivo de minimizar a combinação ponderada do tempo total de viagem e o atraso total. O problema é formulado como um modelo de programação mista que pode ser resolvido a otimização para problemas de pequeno tamanho. Vários detalhes não são levados em consideração como, por exemplo, congestionamento interno, capacidade de armazenamento, disponibilidade de empilhadeiras, entre outros. A abordagem “Tabu search” foi utilizada bem como um processo eficaz de soluções computadorizadas de boa qualidade.

Gue (1999) usa a mesma percepção de layout de Bartholdi e Gue (2000), mas em vez de considerar os fluxos de cargas das portas de entrada para destinos a ser conhecidos e ser independente do layout, o autor agora assume o oposto. Ele afirma que, se os caminhões de entrada são alocados de acordo com: (i) o conteúdo dos caminhões já esperados nos cross docks; (ii) a localização das portas, então os fluxos de materiais dependem do layout da instalação. O resultado desta política de programação de agendamento futuro em tempo real é que os fluxos de materiais são alterados, o que significa que o modelo de “reboque médio” não se sustenta mais. Para modelar esses fluxos alterados, Gue (1999) constrói ‘reboques tendenciosos’, que contêm carga que é tendenciosa para aqueles destinos que estão mais próximos às portas de entrada para as quais estes reboques são atribuídos. Por exemplo, quando uma política de programação futura é usada, as portas de entrada mais próximas à porta de saída para São Paulo receberão mais carga para São Paulo do que aquelas que estão mais distantes. Isto está em forte contraste com cada porta de entrada recebendo a mesma quantidade de carga para São Paulo, como vimos no modelo “reboque médio”. Para examinar o efeito do agendamento futuro e para encontrar o layout com o menor custo de mão de obra, o autor usa um algoritmo de busca local no espaço de solução de todos os layouts, que troca pares de caminhões. Finalmente, a simulação foi usada para testar as diferentes soluções e relatar uma diminuição dos custos de mão de obra de 15% a 20%.

Em (Yu et al, 2008) um layout semi-permanente é considerado. Isto significa que em vez de mudar o layout periodicamente, como Gue (1999) fez, os autores agora não assumem apenas alocar os caminhões que chegam a curto prazo, mas também os caminhões de saída. Usando os dados sobre o conteúdo real de um caminhão de entrada após a sua chegada, uma política on-line é sugerida para alocar caminhões para as portas com base no tempo total de viagem necessários para consolidar a carga. Cada vez que várias portas de

entradas estão disponíveis, o caminhão de entrada é descarregado na porta onde são necessários o mínimo de horas-homens. Quando todas as portas estão ocupadas, o caminhão é enviado para uma área para ser estacionado temporariamente e se uma porta se torna disponível a política então decide, do mesmo modo, quando um dos reboques estacionados é para ser descarregado. Esta política on-line obviamente só pode ser utilizada quando a alocação dos caminhões e os correspondentes destinos forem fixados. Em vez de utilizar um modelo determinístico baseado na média de volumes entre pares origem-destino, os autores sugerem um cenário baseado no modelo estocástico para atribuir destinos. Cada porta de saída é alocada para um destino no máximo e o objetivo é minimizar os gastos esperados com horas-homem na consolidação da carga diária. Este *problema de alocação de portas de saída* é resolvido por uma heurística de busca local e um algoritmo genético e os resultados mostram uma redução de 20% no tempo de viagem em comparação com a prática atual.

Boysen (2010) trata de um problema especial de agendamento de caminhão dentro de um cross dock na indústria alimentícia de uma grande cadeia de varejo alemão – estoque zero (zero-inventory) – onde os requisitos rigorosos de refrigeração proibem o armazenamento intermediário dentro dos terminais, de modo que os produtos devem ser instantaneamente carregados em caminhões refrigerados de saída. Três objetivos operacionais diferentes são considerados: (i) minimização do tempo de escoamento; (ii) tempo de processamento e (iii) atraso. Aqui é pressuposto que um dos lados da doca recebe os caminhões de entrada e o outro lado recebe os caminhões de saída, de modo a facilitar o manuseamento de materiais dentro do terminal. O autor menciona mais algumas premissas para o modelo e formaliza o problema de agendamento de caminhão.

Para cada caminhão de entrada  $i$  o conjunto  $L_i$  é conhecido, que compreende todos os caminhões de saída. Assim, diz o autor, podemos encontrar o conjunto  $L_o$  de caminhões de entrada  $o : L_o = \{i \in I / \{o\} \subseteq L_i\} \quad \forall o \in O$ . Definindo o conjunto  $\eta(o)$  de períodos que o caminhão de saída deve ficar alocado:

$$\eta(o) = \left\{ t = 1, \dots, T / \min_{i \in L_o} \{\theta(i)\} \leq t \leq \max_{i \in L_o} \{\theta(i)\} \right\} \quad \forall o \in O \quad (2.11)$$

Onde  $\theta(i)$  denota o conjunto de períodos que o caminhão de entrada  $i$  é alocado dentro da matriz  $\sigma$  (a matriz dos caminhões de entrada alocados nas portas).

O conjunto  $\xi(t)$  de caminhões de saída processados no período  $t$  não pode exceder o número  $D^o$  de portas de saída. Que pode ser calculado como:

$$\xi(t) = \{o \in O / \{t\} \subseteq \eta(o)\} \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (2.12)$$

Três objetivos são levados em consideração:

(i) Fluxo do tempo: o fluxo de tempo por caminhão de saída  $o$  é representado pelo maior elemento (período) do conjunto  $\eta(o)$ :

$$F(\sigma) = \sum_{o=0} \max \{\eta(o)\}.$$

(ii) Tempo de operação: minimizando o tempo de processamento dos caminhões de saída, o número médio de veículos processados simultaneamente por período é reduzido, bem como, o número escasso de portas de saída são menos utilizadas, ou seja, aumenta a flexibilidade sempre que pedidos urgentes precisam ser adicionalmente programados. O tempo de processamento total dos caminhões de saída pode ser calculado:

$$P(\sigma) = \sum_{o=0} \max |\eta(o)|.$$

(iii) Atraso: muitas vezes os embarques têm datas definidas com seus clientes,  $DD_o$ , para não evitar possíveis penalidades o atraso dos caminhões pode ser minimizado considerando a data limite de entrega. O atraso total dos caminhões de saída seria:

$$T(\sigma) = \sum_{o=0} \max \{0, \max \{\eta(o)\} - DD_o\}.$$

Modelo matemático: a matriz  $\sigma : \{1, \dots, T\} \times \{1, \dots, D^I\} \rightarrow I$  ( $I$  - conjunto de caminhões de entrada;  $D^I$  - número de portas de entrada) é determinada minimizando umas das funções objetivo (2.13) à (2.15), sujeitas as restrições (2.16) e (2.17):

$$\min F(\sigma) = \sum_{o=0} \max \{\eta(o)\} \quad \text{ou} \quad (2.13)$$

$$\min P(\sigma) = \sum_{o=0} \max |\eta(o)| \quad \text{ou} \quad (2.14)$$

$$\min T(\sigma) = \sum_{o=0} \max \{0, \max \{ \eta(o) \} - DD_o \} \quad (2.15)$$

$$\text{Sujeito à: } |\theta_i| = 1 \quad \forall i \in I \quad (2.16)$$

$$\xi(t) \leq D^o \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (2.17)$$

Restrição (2.16) garante que cada caminhão de entrada é processado em um exato período. A restrição (2.17) garante que o número de caminhões de saída num período  $t$  não exceda o número de portas de saída  $D^o$  disponíveis.

Por se um problema com muitas incertezas com relação a chegada e saída dos caminhões, no modelo citado anteriormente o autor sugere já serem conhecidos, o mesmo cita alguns estudos futuros para o problema de agendamento de caminhão, como: (i) novos algoritmos e procedimentos capazes de melhorar o desempenho devem ser investigados; (ii) outras características operacionais precisam ser consideradas, como exemplo, o autor cita os caminhões que não chegam no horário previsto, uma data adicional deve ser atribuída a cada caminhão de entrada, e os tempos de chegada podem ser incorporados facilmente no modelo e nos algoritmos similares. Outra característica operacional é com relação ao tempo de movimento das mercadorias que depende da distância entre as portas de chegada e de saída, ou tempo de processamento do caminhão requer mais algumas alterações, que também podem ser incorporados ao modelo a ser simulado. O autor afirma ainda ser esse um modelo base para o problema de agendamento de caminhão, que pode ser adaptado para cobrir várias outras extensões de problemas do mundo real relacionados a este tipo de problema.

Bartz-Beielatein, et al. (2006) considera outra medida - tempo de espera para os caminhões entre a chegada ao terminal e ser associado a uma porta além do volume transportado para o interior dos terminais de cross-docking. Os caminhões devem ser alocados a um porta, logo que possível após a sua chegada ao terminal. Cada caminhão tem um tabela de tempo individual indicando o tempo de chegada e o último horário, que seria o de partida do terminal. O planejador deve reservar um intervalo de tempo dentro deste período de tempo, que é longo o suficiente para descarregar e carregar o número reservado de unidades de

carga. Se um caminhão não está alocado logo após a sua chegada, o motorista tem que esperar em uma zona de estacionamento até que ele receba mais informações. Portanto, minimizando os tempos de espera há uma diminuição dos pátios lotados. Apesar de vários modelos matemáticos diferentes terem sido construídos com base em diferentes medidas de desempenho, observa-se que as suas funções objetivo é não-linear, o que impede o uso estabelecido de métodos de programação inteira. Por esta razão, meta-heurísticas são amplamente aplicados para o problema atribuição de porta. Bartholdi e Gue (2000) construíram um layout de cross-docking eficaz utilizando um procedimento de “*Simulated Annealing*”. Bermudez e Cole (2001) apresentam um algoritmo genético para a atribuição de portas em terminais *break-bulk* LTL para minimizar a distância de viagem total ponderada, um substituto para custo de mão de obra e tempo de ciclo.

Expondo alguns desses modelos que envolvem alocação de portas, mais precisamente o problema de agendamento de caminhão, não encontramos na literatura estudos que considerem a fila de caminhões, tanto caminhões de entrada quanto caminhões de saída, em suas modelagens. De fato, a fila formada por caminhões a espera de descarregamento/carregamento influencia diretamente os custos das operações totais em um Centro de Distribuição que opera utilizando a técnica de cross-docking. No próximo capítulo abordaremos com mais detalhes as características da fila formada em um cross-docking e como a determinação do número de portas influencia as operações de transbordo de cargas e conseqüentemente o tempo total do caminhão no sistema.

## 2.6 MODELOS NÃO ESTACIONÁRIOS DE FILAS

O sistema de serviços tipicamente tem taxas de chegada que variam fortemente por hora durante o dia. Descaracterizando o modelo estacionário. Assim existe a necessidade de modelos para chegada não estacionária destes processos.

Primeiramente iniciamos com alguns métodos para geração de variáveis aleatórias exploradas por Luc Devroye (1986). O autor afirma que a geração de variáveis aleatórias não uniformes esta preocupada com a geração de variáveis com certas distribuições. Tais variáveis são muitas vezes discretas, levando a valores em um conjunto contável, ou absolutamente contínuo, e assim descrito por uma densidade.

### 2.6.1 Método da Inversão

Para uma variável univariada, o método da inversão é teoricamente aplicável. Dada a função  $F$  e sua inversa  $F^{inv}$ , gera-se uma variável aleatória  $X$  com essa distribuição como  $F^{inv}(U)$ , onde  $U$  é uma variável aleatória  $[0, 1]$  uniforme. Este é o método de escolha quando o inverso é facilmente computável. Por exemplo, um padrão variável aleatória exponencial (que tem densidade  $e^{-x}$  com  $x > 0$ ), pode ser gerado como  $\log\left(\frac{1}{U}\right)$ . A Tabela 2.1 2.1 seguir fornece alguns exemplos adicionais.

Tabela 2.1 - Algumas densidades com funções de distribuição

| Nome        | Densidade                    | Função de Distribuição   | Variável aleatória                                |
|-------------|------------------------------|--------------------------|---|
| Exponencial | $e^{-x}, x > 0$              | $1 - e^{-x}$             | $\log\left(\frac{1}{U}\right)$                    |
| Weibull     | $ax^{a-1}e^{-x^a}, x > 0$    | $1 - e^{-x^a}$           | $\left(\log\left(\frac{1}{U}\right)\right)^{1/a}$ |
| Gumbel      | $e^{-x}e^{-e^{-x}}$          | $e^{-e^{-x}}$            | $-\log\log\left(\frac{1}{U}\right)$               |
| Logística   | $\frac{1}{2 + e^x + e^{-x}}$ | $\frac{1}{1 + e^{-x}}$   | $-\log((1-U)/U)$                                  |
| Cauchy      | $\frac{1}{\pi(1+x^2)}$       | $1/2 + (1/\pi)\arctan x$ | $\tan(\pi U)$                                     |
| Pareto      | $\frac{a}{x^{a+1}}, x > 1$   | $1 - 1/x^a$              | $1/U^{1/a}$                                       |

Fonte: O autor

### 2.6.2 Transformações Simples

Chama-se simples transformação quando se usa funções e operadores que estão facilmente encontrados, como: trigonométrica, exponencial e funções logarítmicas. A densidade normal padrão é dada por  $\exp\left(-x^2/2\right)\sqrt{2\pi}$ . Entretanto, o próximo passo é olhar para transformações simples de  $k$  variáveis aleatórias uniformes  $[0,1]$ , onde  $k$  é um pequeno inteiro fixo, ou um inteiro aleatório com uma média pequena. No método de Box-Muller (Box e Muller, 1958) um par de variáveis aleatórias independentes é obtida por:

$$(X, Y) = \left( \sqrt{\log(1/U_1)} \cos(2\pi U_2), \sqrt{\log(1/U_1)} \sin(2\pi U_2) \right) \quad (2.18)$$

onde  $U_1, U_2$  são variáveis aleatórias independentes uniformes  $[0, 1]$ .

A densidade beta (a, b) é dada por:

$$\frac{x^{a-1}(1-x)^{b-1}}{B(a, b)}, \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (2.19)$$

onde  $B(a, b) = \Gamma(a)\Gamma(b)/\Gamma(a+b)$ . A variável aleatória simétrica beta (a, a) pode ser generalizada:

$$\frac{1}{2} \left( 1 + \sqrt{1 - U_1^{\frac{2}{2a-1}} \cos(2\pi U_2)} \right) \quad (2.20)$$

onde  $a \geq 1/2$ . Devroye (1996) prova que para todo  $a > 0$ :

$$\frac{1}{2} \left( 1 + \frac{S}{\sqrt{1 + \frac{1}{\left( U_1^{\frac{1}{a}} - 1 \right) \cos^2(2\pi U_2)}}}} \right) \quad (2.21)$$

onde S é um sinal aleatório. Outros modelos de geração de variáveis aleatórias podem ser encontrados em Devroye, 1986.

Whitt 2000 afirma que ponto do processo não estacionário pode ser eficientemente simulado explorando uma representação da composição da taxa de um processo com a função da taxa de chegada acumulada, desde que um algoritmo eficiente esteja disponível para gerar essa taxa de um processo, assim como o caso de processos de renovação estacionária, processos de Poisson modulados com Markov e outros processos. A eficiência geral pode ser conseguida construindo uma tabela do inverso da função de taxa de chegada acumulada quando não estiver explicitamente disponível.



### 2.6.3 Modelo Geral baseado em composição

Um dos processos de chegada encontrados na literatura para este caso é o processo de não-Poisson para o caso não estacionário. He, Liu e Whitt (2015) desenvolveram um modelo geral de não-Poisson em que o processo de chegada é não estacionário.

O modelo apresenta no processo de chegada dois recursos principais:

(i)  $\lambda \equiv \{\lambda(t) : t \geq 0\}$ , onde  $\lambda$  é a taxa de chegada previsível ao longo do tempo;

(ii) variabilidade estocástica não-Poisson caracterizada por um único parâmetro  $c_A^2$  (variabilidade estocástica adicional);  $c_A^2 = 0$  sem variabilidade e  $c_A^2 = 1$  processo de Poisson.

Seja  $A(t)$  o número de chegadas no intervalo  $[0, t]$  para  $t \geq 0$ , e seja  $\Lambda$  a taxa de chegada cumulativa, usando a função composição temos  $(x \circ y)(t) \equiv x(y(t))$ ,  $t \geq 0$ , ou seja:

$$A \equiv N \circ \Lambda, \quad t \geq 0 \quad (2.22)$$

onde  $N$  é o processo de contagem estocástica com valores não-negativos não-decrescentes. A função da chegada acumulada é dada por:

$$\Lambda(t) = \int_0^t \lambda(s) ds, \quad t \geq 0 \quad (2.23)$$

com  $0 < \lambda_{LB} \leq \lambda(t) \leq \lambda_{UB} < \infty$  para números positivos  $\lambda_{LB}$  e  $\lambda_{UB}$ . A contagem do processo  $N$  pode ser recuperado fazendo  $N = A \circ \Lambda^{-1}$ , onde  $\Lambda^{-1}$  é a inversa de  $\Lambda$  e com  $N$  satisfazendo o Teorema Central do Limite:

$$t^{-1/2}[N(t) - t] \Rightarrow N(0, c_N^2), \quad \text{com} \quad t \rightarrow \infty \quad (2.24)$$

onde  $\Rightarrow$  denota convergência na distribuição e  $N(m, \sigma^2)$  denota uma variável aleatória com distribuição normal (gaussiana) com média  $m$  e variância  $\sigma^2$ , obtendo:

$$\Lambda t^{-1/2}[A(t) - \Lambda(t)] \Rightarrow N(0, c_N^2), \quad \text{com} \quad t \rightarrow \infty \quad (2.25)$$

de modo que  $c_A^2 = c_N^2$  é o parâmetro de variabilidade assintótico de  $A$  com base no Teorema Central do Limite. Posteriormente o autor engloba ao modelo geral do processo de não-Poisson com chegadas não estacionárias, o processo de Cox não estacionário, com base em métodos de composição.

Seja  $N$  a composição de outros dois processo estocásticos:

$$N \equiv M \circ C, \text{ com } t \geq 0 \quad (2.26)$$

onde  $M$  é um processo de contagem estocástica com valores de número inteiro não negativos não decrescentes e  $C$  é um processo estocástico acumulativo, expresso como:

$$C(t) = \int_0^t Z(s) ds, \quad t \geq 0 \quad (2.27)$$

Com  $\{Z(t) : t \geq 0\}$  sendo um processo de taxa estocástica com amostras não negativas. Assumiu-se que os processos estocásticos as componentes  $M$  e  $C$  são mutuamente independentes. A combinação de (2.22) e (2.26) da a seguinte composição  $A : A = M \circ C \circ \Lambda$ . Essa representação de  $N$  se reduz a um processo de Cox estacionário se assumir  $M$  ser um processo de Poisson. Para maior aprofundamento deste modelo ver He, et al (2016).

#### 2.6.4 Método Thinning

Tal como acontece no método da inversão, o método de Thinning é um algoritmo para geração de intervalos de tempos estacionários para obtenção de um processo não-estacionario e então oferecendo uma análise para média e variância em processos não estacionarios e não-Poisson.

Gerhardt e Nelson (2009) aplicam esse método para processos renováveis estacionários.

*Algoritmo de Thinning para processos renováveis estacionários*

1. Seja os contadores  $n = 1, k = 1$  e  $T_0 = 0$  gerar  $S_1 = G_e$ .
2. Gerar  $U_1 \sim \text{Uniforme}[0,1]$ . Se  $U_1 \leq r(S_1)/r^*$ , então
  - (a) Conjunto  $T_1 = S_1$
  - (b) Retorne intervalo de chegadas  $Y_1 = T_1 - T_0$

(c) Conjunto  $k = 2$

3. Conjunto  $n = n+1$ . Gerar  $X_n \sim G$ . Conjunto  $S_n = S_{n-1} + X_n$ .

4. Gerar  $U_n \sim Uniforme[0,1]$ . Se  $U_n \leq r(S_n)/r^*$ , então

(a) Conjunto  $T_k = S_n$

(b) Retorne intervalo de chegadas  $Y_k = T_k - T_{k-1}$

(c) Conjunto  $k = k+1$

5. Vá para o passo 3.

Assim, a sequência  $\{Y_k, k \geq 1\}$  é a realização dos tempos de chegada para o processo não estacionário gerado a partir do método de Thinning. Para mais processos de Thinning ver Gnedenko e Kovalenko (1989), Miller (1979), Rolski e Szekli (1991) que usam Thinning para chegadas em processo de Poisson na estimativa de funções de renovação.

## 2.6.5 Método Simples para Distribuições Multivariadas

Mais um método proposto por Devroye (1986) agora para vetores aleatórios. O método da inversão continua da mesma forma, primeiro é gerado  $X_d$  (conjunto de vetores) de uma distribuição marginal, então  $X_{d-1}$  dado  $X_d$ , usando uma distribuição condicional, e assim por diante. Se por alguma razão a distribuição tem densidade que é uma função  $\sum_i x_i^2$  somente, então é mais vantajoso encontrar a marginal  $\sum_i x_i^2$ , gerar uma variação aleatória dessa distribuição marginal e, em seguida, gerar uma variação aleatória uniformemente distribuída com o raio aleatório dado. E para gerar um ponto uniformemente distribuído na superfície da unidade, basta gerar a distribuição independentemente identicamente distribuída do padrão normal da variável aleatória  $X_1, \dots, X_d$  e normaliza o comprimento para um. Às vezes, deseja-se gerar vetores aleatórios com certa estrutura de dependência. Isso pode ser capturado por várias medidas de correlação. Para uma pesquisa de geradores variáveis aleatórios, veja Devroye (1986a). Uma interessante nova área de pesquisa está relacionada ao desenvolvimento de geradores com uma dada estrutura de copula. A copula de duas variáveis aleatórias uniformes  $[0,1]$   $X$  e  $Y$  são dados pela função de distribuição conjunta.

$$C(x, y) = P\{X \leq x, Y \leq y\} \quad (2.28)$$

Segundo Devroye (1986a) duas variáveis (com funções de distribuição  $F$  e  $G$ , respectivamente) possuem a estrutura da copula dada por  $C$  se  $F(X)$  e  $G(Y)$  (ambos uniformes  $[0,1]$ ) tiveram função de distribuição conjunta  $C$ . Assim, precisamos de métodos para gerar vetores aleatórios com função de distribuição  $C$ .

## 2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo de revisão bibliográfica foi dividido em duas partes: uma parte foi descrito alguns trabalhos que utilizaram modelos da teoria de filas clássicos e modelos não estacionários, entre eles o mais utilizado são os modelos de Poisson não estacionários, e alguns trabalhos publicados em redes de cross-docking e simulação, a segunda parte apresenta alguns modelos para geração de variáveis aleatórias não uniformes propostas por Luc Devroye (1986) e modelos aplicados em alocação de portas e agendamento de caminhão em redes de cross-docking para que se tenha uma visão mais geral dos problemas correlatos tratados na literatura, caracterizando, assim, o estado da arte em relação ao problema estudado. Como pode-se observar, as diversas abordagens encontradas na literatura para o problema de filas utiliza modelos clássicos, mais recentemente tem-se observado a utilizando de taxas de chegadas utilizando o modelo de Poisson para a não estacionariedade. Nenhuma abordagem foi encontrada para problemas envolvendo taxas de chegadas não estacionárias em redes de cross-docking. No próximo capítulo será apresentada as conceituações sobre cross-docking, bem como sua utilização, vantagens e desvantagens e modalidades desta técnica logística.

### 3. CROSS-DOCKING

#### 3.1 CONCEITUAÇÃO DE CROSS-DOCKING

O cross-docking consiste na transferência ou movimento de produtos ou de mercadorias desde o ponto de recebimento ou recepção (conhecido como docas), diretamente para o nulo, ponto de expedição e entrega, com tempo em estoque limitado ou preferencialmente permitindo que os responsáveis pelos centros de distribuição se concentrem no fluxo de produtos ou mercadorias e não na armazenagem das mesmas. Isso nos dá uma clara visão de que a sincronização entre o recebimento e a expedição de mercadorias é essencial para a eficiência do processo, podendo ser crítico para a viabilidade da operação, reduzindo assim o lead time enquanto mantém (ou aumenta) o nível de serviço ao cliente.

Figura 3.1 - Cross dock na rede varejista Sam's Club, EUA



Boysen e Fliedner (2010) afirmam que esta prática logística é usada principalmente na execução de entregas em centros urbanos, onde a circulação de veículos de grande porte sofre restrições sobre a sua dimensão e peso, impedindo-os de efetuar as entregas. Tais veículos descarregam seus produtos em um armazém, conhecidos como docas

transversais, a Figura 3.1 exemplifica como os paletes podem ser organizados dentro de um cross dock. Os produtos cruzam o armazém em esteiras e/ou empilhadeiras manuais e, em seguida, carregam outro veículo de menor porte, que efetuará as entregas. Em particular, no processo de triagem, existem diferentes estratégias de manuseio, que serão posteriormente explicadas.

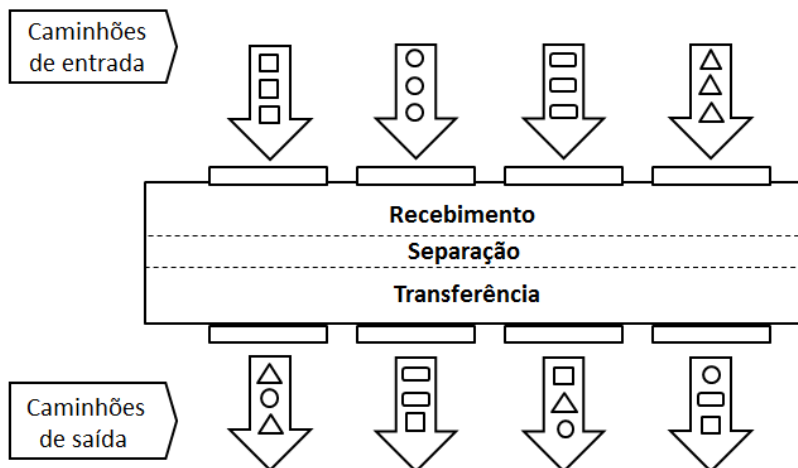
Segundo Zecevic e Gojkvic (2010) o sistema tradicional de processamento de mercadorias em armazéns e/ou centros de distribuição é um sistema que se caracteriza, na prática, por uma “desorganização controlada” onde frequentemente os serviços ou atividades ocorrem de forma desarticulada, sem organização e com custos operacionais decorrentes mais elevados, ou seja, a prestação de um mau serviço. Os bens são primeiramente recebidos e então armazenados, por exemplo, em prateleiras de paletes. Quando um cliente solicita um item, os trabalhadores buscam no estoque de armazenamento e enviam para o destino. Dentre essas quatro principais funções de armazenagem (recebimento, armazenamento, separação de pedidos e transporte), o armazenamento e a separação (picking) de pedidos são geralmente os mais caros. O armazenamento é caro porque existem os custos de manutenção de estoque e, a separação de pedidos, porque é um trabalho intensivo. Uma abordagem para reduzir os custos poderia visar a melhoria de uma ou mais destas funções ou, de outro lado, melhorar a forma como elas interagem afirma Bartholdi e Gue (2004).

O cross-docking pode ser então descrito como o processo de consolidação de carga com o mesmo destino (mas vindo de várias origens), com mínima manipulação e com pouco ou nenhum armazenamento entre a descarga e o carregamento das mercadorias. Se os bens são armazenados temporariamente, estes devem ser apenas por um curto período de tempo. Um limite exato é difícil de definir, mas muitos autores falam cerca de 24 horas, por exemplo. Se os bens são colocados em um armazém ou em prateleiras de separação de pedidos, ou se o estadiamento leva vários dias ou mesmo semanas, o processo não é considerado cross-docking, mas é classificado como armazenagem (tradicional). Na prática, a maioria dos cross docks (terminais onde ocorrem o cross-docking) são longos retângulos estreitos (formato da letra I)<sup>1</sup>, mas outras formas são também utilizadas (Bartholdi e Gue, 2004).

---

<sup>1</sup> Os layouts e formatos dos tipos existentes de cross docks são explicados no Capítulo 4.

Figura 3.2 - Representação típica de distribuição de um cross-docking



Fonte: O autor

A Figura apresenta uma representação esquemática das operações de movimentação de materiais em um cross dock em formato de I com 8 portas (docas). Os caminhões que chegam vão diretamente para uma doca ou esperam numa fila enquanto não lhe é atribuído uma doca. Logo após o caminhão chegar à doca de entrada, a sua carga (por exemplo, paletes, embalagens ou caixas) é descarregada e o destino final desta é identificado. Em seguida, os produtos são transportados para outra doca por algum dispositivo de manuseio de materiais, como um trabalhador que opera um carrinho ou um sistema de correia transportadora. Lá, as mercadorias são carregadas em um caminhão de saída que as encaminhará ao destino final, não deixando antes de serem confirmados os respectivos códigos de barras, ou outro tipo de verificação, para que se tenha o total controle dos movimentos efetuados, realizando assim a ordem de expedição. Uma vez que um caminhão de entrada é completamente descarregado ou um caminhão de saída é completamente carregado, o caminhão libera a doca para a entrada de outro caminhão. Um bom exemplo é o Serviço Postal dos EUA (Fedex) e muitos outros: tudo que eles recebem deve ser discriminado, classificado e enviado o mais rápido possível. Com armazenamento, anteriormente citado, de no máximo 24 horas.

Os candidatos mais óbvios para cross-docking são os produtos que já foram encomendados pelo cliente final antes de o transporte do fabricante para o armazém ser iniciado, em outras palavras, os destinos

de todos os bens são conhecidos quando eles chegam ao terminal de transbordo (cross docks). Outros incluem produtos com prazos de entrega curtos, produtos com alta demanda e produtos com demanda altamente previsível (Richardson, 1999).

Esta técnica caracteriza-se pela sua complexidade e, para ser bem sucedida, necessita da participação e colaboração de toda a cadeia, com constante troca de informação. A Figura mostra a organização dos paletes para envio na empresa Costco.

Figura 3.3 - Organização dos paletes no cross dock da Costco



Um fator importante para a análise dos transportes de uma empresa é a forma pela qual ela realiza suas compras e recebe seus suprimentos. Existem dois meios para operar as compras: pelo sistema CIF (transporte por conta do fornecedor) ou pelo sistema FOB (transporte por conta da empresa). De acordo com Dias (1993), a tendência normal dos setores de compras ou suprimentos é optar pelo sistema CIF, de forma a receber a carga em seus depósitos, deixando os fornecedores incumbidos de escolher os meios de transporte para o cumprimento dos prazos de entrega.

Schaffer (1998), afirma que o sucesso do sistema de cross-docking depende da atenção dada a aspectos como: parceria entre os membros, confiabilidade no fornecedor e nos produtos, comunicação eficaz dentro



da organização e com os parceiros, pessoal qualificado (mão de obra) e gestão estratégica.

### 3.2 MOTIVAÇÕES PARA O USO DO CROSS-DOCKING

Cross-docking é uma estratégia logística que está ganhando cada vez mais espaço dentro das empresas. Embora não seja uma prática nova, tem havido um ressurgimento nos últimos anos do interesse nesta prática. Segundo Van Belle et al (2012), mais de 85% dos trabalhos acadêmicos encontrados são publicados a partir de 2004. Sua capacidade de encurtar o ciclo de transporte, controlar os custos de manutenção de inventário e entregar JIT com um investimento inicial mínimo faz o cross-docking ser uma opção atraente para muitas empresas que respondem às pressões econômicas.

Saddley Creek Corporation desenvolveu uma pesquisa em Dezembro de 2010 a fim de obter uma melhor compreensão dos impactos das condições econômicas recentes sobre esta prática. Um total de 219 formulários foi concluído tornando esta pesquisa estatisticamente válida. A análise foi completada e os resultados publicados em 2011. Dos entrevistados, quase 90,7% dizem que são os responsáveis ou tem influência sobre as estratégias de cross-docking em sua companhia. São profissionais formados na área logística e/ou em meios de transporte, gestão da cadeia de suprimentos e gestão empresarial.

A pesquisa indicou que o cross-docking tem aumentado significativamente nos últimos três anos, sendo tal fato atribuído às condições imprevisíveis da economia. O influxo de operações indica que as empresas estão encontrando um valor significativo em realizar cross-docking.

Apesar dos entrevistados terem dito que muitos fatores contribuíram para a decisão do uso inicial de cross-docking na sua empresa, os motivos principais foram: (i) a melhoria dos níveis de serviços (37,9%); (ii) redução dos custos de transporte (32,4%); (iii) consolidação das cargas (caminhões cheios) para o destino (32,4%). Outra pergunta realizada aos entrevistados: o que faz o cross-docking ser uma prática atraente no ambiente econômico de hoje?

"Cross-docking é uma opção eficaz para muitas empresas, porque ao mesmo tempo em que não é necessariamente fácil de realizar, normalmente não exige um investimento monetário grande ou uma mudança na infraestrutura", explica Mike DelBovo, vice-presidente sênior, Saddle Creek Transportation Inc. "Em vez disso, envolve um investimento de tempo e energia para melhoria do processo. No lugar de

tijolo e argamassa, os praticantes do cross-docking tem como itens, melhorar o fluxo de comunicação, regular as relações com as operadoras e melhorar o desempenho do serviço. Este investimento é mais aceitável particularmente quando as empresas estão examinando todas as oportunidades possíveis para controlar os custos ".

Na verdade, cross-docking é parte da estratégia para reduzir custos e melhorar a eficiência das cadeias de suprimentos. Para muitos entrevistados o cross-docking, como mencionado anteriormente, elimina as duas operações mais caras: o armazenamento e o manuseio excessivo dos materiais.

O objetivo principal do cross-docking é permitir a consolidação de muitas cargas menores, de vários fornecedores e os beneficiários de outro lado, de modo que somente caminhões lotados são despachados. Esses caminhões são classificados de acordo com a quantidade de carga que estão transportando, ou seja, caminhões completos (FTL) e caminhões com carga parcial (LTL). Normalmente um transportador classifica o frete por um limite de peso. Um carregamento FTL é mais barato do que um carregamento LTL, porque pode atender a um número maior de clientes em um curto período de tempo e com apenas uma viagem. Desta forma, o maior uso da versão FTL permite que economias no transporte sejam realizadas, aumentando assim as vantagens advindas da implementação e do uso do sistema de cross-docking. Essas economias, segundo Richardson (1999), variam de 5% a 20% dos custos de manuseio de materiais, podendo atingir economias maiores. O cross-docking possui então, uma capacidade de reduzir os custos de forma estratégica, pois essa redução não afeta o seu nível de serviço, ou seja, os produtos tornam-se mais disponíveis aos clientes e sua entrega mais rápida.

### 3.3 TENDÊNCIAS

Diferentemente do que ficou conhecida como “produção em massa”, hoje as indústrias tendem a obter: (i) uma produção enxuta (produção customizada – evitando altos níveis de estoque e privilegiando entregas fragmentadas e mais frequentes), (ii) a terceirização e (iii) a produção offshore; concentradas na redução de custos, aumentando assim os riscos significativamente (Levi et al, 2008).

Por exemplo, consideramos uma montadora de automóveis cujos fornecedores de peças estão localizados em outras cidades, ou até mesmo em outros países. Com pouca incerteza no transporte e um cronograma estável de suprimentos, as peças podem ser entregue just-in-time às unidades montadoras, com base na programação fixa de produção.

Contudo, podem ocorrer situações imprevisíveis, tais como: calamidades climáticas, ataques terroristas, terremotos, fechamento de rodovias, como ocorrido recentemente com a greve de caminhoneiros – devido a alta no combustível e valores baixos para o frete – comprometendo assim a adesão a este tipo de estratégia, pois a falta de peças, por exemplo, acarreta a paralisação das linhas de produção.

De modo semelhante, a terceirização e a produção offshore implicam uma maior diversidade geográfica e, conseqüentemente, desastres naturais ou causados pela mão do homem podem ter um impacto em toda a cadeia.

Na década de 80 e meados dos anos 90, as empresas descobriram novas tecnologias e estratégias de produção que lhes permitiram reduzir custos e competir com mais eficiência em diferentes mercados. Estratégias como o just-in-time, a produção enxuta, a gestão da qualidade total, a terceirização, entre outras, ganharam notável popularidade com grandes investimentos para implementá-las. Contudo, nos últimos anos, ficou evidente que muitas empresas já haviam reduzido seus custos ao menor valor praticável e, agora, algumas delas estão descobrindo que a gestão eficiente da cadeia de suprimentos é o próximo passo a ser tomado no sentido de aumentar lucros e fatias de mercado (Levi et al, 2008).

Um sequenciamento inadequado de recebimento de caminhões de transporte nas docas aumenta o tempo de conclusão da operação, com isso o tempo total de operação no sistema (makespan) é prejudicado, que por sua vez cria custos mais elevados. Portanto, cada vez mais pesquisas nesta área estão sendo desenvolvidas para minimizar o makespan, e com isso minimizar ainda mais os custos.

Outra grande tendência no mercado mundial é o uso de cross-docking na cadeia de frios. Muitas pesquisas desenvolvidas nessa área demonstram o interesse de muitos gestores principalmente pelas vantagens e benefícios que esta técnica fornece.

### **3.3.1 Cross-docking no Mundo**

O propósito original de um cross-docking no Walmart foi ganhar uma vantagem de desconto nos preços através da compra de grandes quantidades de produtos. Os executivos das empresas são capazes de saber quando cada loja precisa de um produto e em que quantidade, visto que a tecnologia de informação necessária está embutida em sua cadeia de suprimentos. Como resultado, a Walmart não só consolida produtos de vários fornecedores e muitas lojas em alguns embarques, mas também os coordena de tal forma que o tempo de trânsito das transferências para re-

consolidar nas instalações é minimizado. Eliminando assim duas etapas de atividades do armazém tradicional: armazenamento e separação de pedidos. A implementação de um cross dock também aumenta o giro de estoques por causa do tempo de trânsito de curta duração (Kittithreerapronchai, 2009).

Outra grande empresa, a Home Depot opera um cross dock na Filadélfia, que atende mais de 100 lojas no Nordeste dos EUA. A cultura do Home Depot permite que gerentes das lojas tenham uma grande autonomia em relação à seleção de produtos, e níveis de estoque, entre outros. No passado, cada loja fazia os pedidos para os fornecedores separadamente, e as ordens eram enviadas em cargas fracionadas – ou seja, menos carga nos caminhões (LTL) diretamente às lojas. Agora a Home Depot usa cross-docking para reduzir custos dos fornecedores por meio da consolidação de pedidos entre as suas lojas e consolidação em quantidades cheias junto aos seus fornecedores. Aqui é como o novo sistema funciona: cada uma das 100 lojas faz os pedidos (ordens) para cada fornecedor em um dia específico da semana. O fornecedor consolida todos os pedidos e envia cargas cheias de produtos para o cross dock na Filadélfia. Ali, os trabalhadores transferem os produtos para caminhões menores (caminhonetes) em direção a lojas individuais (ou duas lojas em algumas rotas com várias paradas), de forma que caminhonetes de saída contenham produtos de muitos fornecedores para algumas lojas específicas. Os custos de transporte são menores, porque as cargas para dentro e fora do cross dock estão em quantidade cheia nos caminhões (Bartholdi e Gue, 2009).

Na América do Norte outras grandes empresas adaptaram e implementaram a rede de cross-docking, como exemplo a Costco, Fedex, Sam's Club, Toyota, Mitsubischi, entre outras empresas. De acordo com Bartholdi e Gue (2004), existem mais de 10.000 cross docks apenas nos EUA e Canadá. Harp Food Stores, relata uma economia significativa no transporte, estoque e custos de estocagem após a implementação de cross-docking nos seus sistemas (Snyder, 1995). Kinnear (1997) também relata melhora semelhante após a implementação de cross-docking na Goodyear na Grã-Bretanha.

O interesse atual em cross-docking foi confirmado por uma pesquisa no Reino Unido: o setor de logística no varejo de supermercados colocou isso como uma das mudanças prováveis mais importantes a ocorrer em transporte e armazenagem (Fernie et al, 2000).

Assim como os EUA, a Europa esta aumentando consideravelmente seu interesse no sistema logístico cross-docking. Em pesquisa, a GS1 mostrou que menos de um quarto de todas as encomendas

recebidas pelas empresas vêm através de cross-docking. Porém, as empresas antecipam que mais da metade de todas as encomendas serão utilizadas as redes de cross docks.

Outra grande aplicação que vem ocorrendo em muitos países desenvolvidos é o cross-docking aplicado à cadeia de frios – bens perecíveis que são sensíveis a temperaturas mais elevadas – constituindo um tipo particular de cadeia de suprimentos. Uma pesquisa realizada no Reino Unido prevê o aumento no consumo dos alimentos congelados em mais de 30%, representando 10% de toda comida consumida no Reino Unido, refletindo o interesse acentuado do consumidor por alimentos desta natureza (Mckinnon e Campbell, 2008).

Em pesquisa recente Qiu et al, (2009), enfatizaram algumas características distintas da cadeia de frios:

- Primeira característica: custo elevado, devido principalmente ao fato da carga precisar ser mantido a temperaturas baixas. Para isso ocorrer é preciso ter equipamentos especializados, tais como: caminhões refrigerados, instalações refrigeradas durante o processo de armazenamento, distribuição e vendas. Para melhorar a eficiência operacional precisa ainda dispor de avançados sistemas de informação;
- Segunda característica: dispor de forte tecnologia para implementar a gestão e controle de temperaturas em todo processo logístico da cadeia de frio;
- Terceira característica: controle da temperatura. A maioria dos alimentos congelados tem vida útil curta, para isso o controle da temperatura deve ser rigoroso e constante, desafiando os níveis de serviços logísticos prestados e um impacto direto na eficiência operacional;
- Quarta característica: nível mais elevado de organização da cadeia de suprimentos e requisitos de coordenação. Para alcançar uma operação eficaz é necessário estabelecer uma cadeia de alimentos de frios completa para controlar toda a cadeia de suprimentos em tempo para coordenação entre as partes.

O autor afirma que esta é uma operação logística de alto desempenho, monitorado por uma tecnologia de informação avançada, integrando custos baixos, tempo e “estoque zero”. Como resultado, a operação de toda cadeia de abastecimento é eficiente e ordenada.

### 3.3.2 Cross-docking no Brasil

Diferentemente do que ocorre com as grandes empresas e redes varejistas na América do Norte, Europa e em outros países, no Brasil as empresas ainda se concentram em armazenagem tradicional.

De acordo com o jornal O Estado de São Paulo, publicado em 17/04/2015, a oferta de condomínios industriais e galpões logísticos quase dobrou nos últimos três anos e, apesar da crise que assola o Brasil, a expectativa é de trajetória ascendente. Independentemente das estatísticas, que variam conforme a classificação dos galpões, o setor tem crescido a uma taxa média de 20% ao ano.

O mercado começou a se desenvolver no final da década de 1990 e surfou na onda de crescimento do País nos anos 2000, com a melhora da renda e expansão do crédito. O aumento do consumo, fator que turbinou o Produto Interno Bruto (PIB) em anos recentes, tem participação preponderante no desenvolvimento desse setor. Para atender a demanda do mercado, as empresas procuram centros logísticos próximos dos consumidores para armazenar e distribuir seus produtos com mais rapidez e custo menor.

“Com a expansão da economia, uma grande fatia da população passou a ter acesso a uma gama maior de produtos, de escova de dente a automóveis. E isso impulsionou o setor”, afirma o diretor da Jones Lang Lasalle, Pedro Candreva. Não por acaso o Estado que mais se desenvolveu no País foi São Paulo, que abriga quase dois terços de todos os galpões do Brasil. “É aqui que a demanda está concentrada”, completa a vice-presidente da consultoria imobiliária Colliers Internacional, Paula Casarini.

Pelos dados da empresa, a expectativa é que, só no primeiro semestre deste ano, seja acrescentado 1,3 milhão de m<sup>2</sup> aos 5,9 milhões de m<sup>2</sup> já instalados no Estado. Esse montante representa 73% de tudo que será entregue ao País até junho. O crescimento de construções no Estado ocorreu no entorno de importantes rodovias, como a Anhanguera e a Bandeirantes, e na região de Guarulhos, estratégica por estar entre as rodovias Dutra e a Ayrton Senna.

O novo eixo que começa a ser explorado pelos investidores está na Rodovia Castelo Branco até a cidade de Sorocaba, afirma Candreva. Além disso, Guarulhos voltou a ser um novo ponto procurado pelas empresas. “As companhias procuram locais próximos de boas rodovias e sem risco de enchentes.”

O setor de supermercados, por exemplo, está mudando estratégia e ocupando um único centro logístico para otimizar equipe e custos. Para

completar, restrições de acesso a grandes centros urbanos fizeram muitas empresas buscarem alternativas fora das cidades.

Os dados fornecidos demonstram a importância que muitas empresas estão dando aos centros logísticos, uma vez que, muitos desses se transformam em centros de distribuição e plataformas de transbordo de carga (consolidação/desconsolidação).

### 3.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO CROSS-DOCKING

Embora a concepção de uma eficiente rede de docas seja importante, o sucesso do cross-docking depende de quão bem cada doca é administrada. Um cross-dock mal gerenciado poderá aumentar os custos de manuseio das cargas e prejudicar o processo. Para melhorar o desempenho, um gerente enfrenta muitas decisões tanto operacionais quanto estratégicas e táticas. Por exemplo, ele pode optar por usar mais ou menos carrinhos para lidar com as cargas na descarga dos caminhões alimentadores; ele pode abrir mais ou menos portas de recepção, decidir sobre a forma como os bens fluirão pela rede para minimizar os custos, entre outros.

O cross-docking, em busca da redução de custos por meio de uma quantidade otimizada de operações de movimentação e níveis de estoque baixos, tem muitas vantagens, destacando-se:

- Redução de custos: custos de armazenagem, custos de manuseio, custos de mão de obra e custos com distribuição (transporte) são reduzidos;
- Redução de tempo: curto prazo de entrega (do fornecedor para o cliente);
- Redução da área física necessária no centro de distribuição: com a redução ou eliminação do estoque, a área necessária no centro de distribuição é reduzida. Essa é também uma das principais razões do ponto de vista da empresa e seus acionistas/investidores;
- Redução do estoque em toda a cadeia de abastecimento e consequente redução do nível de obsolescência: o produto passa a fluir mais rapidamente pela cadeia de abastecimento não sendo colocado em estoque. Dessa forma, reduz o risco de obsolescência do produto, fator muito importante em setores que trabalham com produtos perecíveis e de alto conteúdo tecnológico;

- Redução do risco de perdas e danos;
- Melhor utilização dos ativos (por exemplo, caminhões lotados);
- Melhor correspondência entre as quantidades de embarque e a demanda real;
- Aumento do giro dos produtos no centro de distribuição: a velocidade dentro do centro de distribuição aumenta;
- Disponibiliza os dados sobre o produto para outros fins/estudos: devido ao uso de tecnologias de informação que proporcionam a comunicação entre os elos da cadeia logística.

Dentro do contexto de tecnologias de informação podemos observar o crescimento e difusão das ideias de Gestão da Cadeia de Suprimentos (SCM) e de Resposta Eficiente ao Consumidor (ECR).

O método de cross-docking também apresenta algumas desvantagens. Por exemplo, o elevado esforço requerido dos diversos membros da cadeia de abastecimento para que esta técnica seja bem sucedida. Com a especialização, investimento econômico e esforço compartilhado se podem conseguir bons resultados, porém em termos reais são fatores difíceis de conseguir. Se em termos práticos se fala em fluxo de mercadorias, em termos funcionais fala-se em fluxo de informação, e tanto um como o outro devem ser contínuos e devidamente geridos.

Indo mais além, para que o sistema seja verdadeiramente eficaz, esse fluxo de mercadorias deve ocorrer rapidamente evitando paradas, e para isso, a troca de informação deve também ocorrer de forma exata e sem interrupções.

A descentralização dos estoques aumenta a quantidade de estoque necessária para atender os níveis de disponibilidade de produto desejados, tornando também mais complexo o seu gerenciamento. Em função da maior incerteza provocada pela divisão da demanda em áreas regionais, a manutenção de toda a linha de produtos em cada centro de distribuição avançado é sujeita à falta de estoques. Desta forma, o objetivo inicial de prover rápido atendimento e alta disponibilidade pode ser prejudicado pela ocorrência de pedidos incompletos com a redução de estoques causada pelo cross-docking (Ballou, 2006).

A complexidade do gerenciamento de atribuição de portas, tanto de entrada quanto de saída, a dificuldade na realização do agendamento de caminhões e o esforço necessário para operar de forma eficiente um



cross-docking, levando-se em consideração uma série de fatores e influências externas, tornam as operações difíceis de serem trabalhadas (Goddefroy, et al 2013).

### 3.5 REQUISITOS PARA IMPLEMENTAÇÃO E PROBLEMAS DE DECISÃO

Como já vimos, cross-docking é uma técnica logística eficiente que pode ser utilizada para consolidar rapidamente várias fontes de carregamentos e realizar economias no transporte de saída. Este processo logístico reduz o tempo de manuseio de materiais enviando, quase que diretamente, as mercadorias recebidas para outros locais.

Dentro do contexto de gestão estratégica, os gestores precisam resolver muitos problemas para poder projetar e gerenciar um terminal de cross-docking. Segundo Boysen e Flidner (2010), eles podem ser classificados como:

- Localização do terminal de cross-docking (s): há muitos trabalhos publicados na literatura sobre modelos de otimização para localização de terminais de cross-docking. O primeiro trabalho publicado sobre este tema aparece com Pierre de Fermat (1601 – 1665), que declarou o problema da seguinte maneira: “dado três pontos no plano, encontrar o quarto ponto tal que a soma da sua distância para os três pontos dados é mínima.” Há um livro recentemente editado por *Zvi Drezner e Horst W. Hamacher* chamado "Facility Location, Applications and Theory" em que os autores mostram diferentes soluções para a resolução deste problema. Outro trabalho que analisa os pontos de transbordo é “A Branch And Bound Algorithm for the Transportation Problem with Location of  $p$  Transshipment Points” de Alfredo Marin e Blas Pelegrin. Neste trabalho, os autores analisam a solução para um número predeterminado de pontos de transbordo, porém eles adicionam o fato de que existe fluxo de material dos clientes para o ponto de transbordo.
- Disposição do terminal: algumas empresas adquirem instalações já existentes de cross docks, na impossibilidade de construção de novos, sem ficar atento às diversas formas existentes desses terminais. Um terminal com a disposição

errada pode gerar maiores custos para a empresa, pois seu desempenho interno pode diminuir bastante.

- Atribuição do destino para as portas: Operar uma instalação de cross-docking demanda atribuir portas de entrada e saída para os caminhões. A atribuição determina a quantidade de manuseio de carga dentro da instalação e, portanto, é crucial para a eficiência. Normalmente, é uma decisão de curto prazo, pois cada porta pode servir para vários destinos em uma sequência diferente a cada dia, dependendo do agendamento de cada caminhão. No entanto, podemos tomar uma decisão de médio prazo, atribuindo um destino fixo para cada porta para um longo período de tempo. Essa atribuição fixa facilita a alocação das cargas para os caminhões uma vez que os operadores podem se acostumar com o desenho da instalação. Por outro lado, essa atribuição fixa de destino para as portas limita a flexibilidade para agendamento dos caminhões no curto prazo (dia a dia) uma vez que não se podem aproveitar portas vazias quando um determinado destino está com sua porta sobrecarregada. Tsui e Chang (1992), no artigo “*An optimal solution to a dock door assignment problem*” abordaram esse problema de atribuição de portas, fator determinante para a eficiência das operações, e o resolveram como um problema de atribuição quadrática que minimiza os fluxos de carga entre as portas.
- Roteamento do veículo: o problema de roteamento dos veículos determina um conjunto de rotas para um conjunto de veículos previamente estabelecidos, que atenderá um número de clientes dispersos geograficamente. O objetivo é atender vários clientes com demandas conhecidas, minimizando o custo do transporte entre a instalação de cross-docking e os clientes, e entre o cross-docking e as fontes de abastecimento (ex.: fábricas). Em visita a JBS Foods em julho de 2014, foi possível observar que o roteamento é um problema bem conhecido e amplamente tratado. Nesta empresa, um software realiza a roteirização, porém sempre com ajuda manual dos operadores, que tentam minimizar ainda mais os custos envolvidos. Os problemas citados por eles são: (i) há cargas que não são entregues (por ex.: casos de rejeição do cliente) e voltam para o centro de distribuição – estas precisam ser novamente roteirizadas; (ii) falta de espaço nos caminhões

quando os pallets não podem ser desmembrados, ou quando há cargas muito frágeis, não permitindo a colocação de outro pallet sobre elas. Por exemplo, se o caminhão pode transportar cinco toneladas, os roteadores na programação de rotas alocam um total aproximado de cinco toneladas para este caminhão de saída, porém quando são embarcados, alguns pallets não podem ser postos sobre outros e assim são deixados para uma próxima roteirização; (iii) mão de obra desqualificada e despreparada, problemas com a terceirização dos caminhões que realizam as entregas, alguns caminhões não sofrem nenhum tipo de revisão mecânica, exemplo: no caso de cargas resfriadas pode comprometer a qualidade do produto.

- Agendamento das operações de cross-docking: a eficiência de um terminal de cross-docking depende da coordenação adequada dos fluxos de entrada e saída dos caminhões das docas. Com isso, o gerente de operações enfrenta duas decisões inter-relacionadas: onde e quando os caminhões devem ser acoplados no terminal. O problema do agendamento do caminhão compreende a atribuição de uma doca para cada caminhão de entrada e de saída, e o cronograma de todos os caminhões numa mesma doca. É tarefa do gerente de operações considerarem uma restrição adicional, em que os caminhões de saída não liberam a doca até que todos os pallets, provenientes de diferentes caminhões de entrada, sejam entregues no transbordo. Assim a sincronização no fluxo dos produtos de entrada/saída e o agendamento dos caminhões são cruciais para o sucesso da operação;
- Alocação de recursos dentro do terminal: para um determinado agendamento de caminhões, o problema de programação de recursos dentro do terminal (ex.: scanners (Figura ), empilhadeiras, mão de obra, entre outros) é um problema de programação complexo em si mesmo, uma vez que o uso de vários recursos precisa ser coordenado. "Cross-docking – JIT scheduling with time Windows" por Li et al, 2004 e "Cross-docking – JIT scheduling: an alternative solution approach" por Alvarez-Perez et al. modelam essas tarefas como um problema de programação de máquinas e equipamentos e apresentam meta-heurísticas diferentes como

solução. O agendamento de caminhões é altamente relacionado com este problema, porque o intervalo de tempo entre cada tarefa de entrada e saída é o resultado de um agendamento de recursos detalhado. Portanto, tanto a tarefa de agendamento de caminhões quanto a tarefa de agendamento de recursos internos poderia ser resolvida por meio de uma simulação. No entanto, a pesquisa existente abstém-se de tal melhoria, porque esta exigiria o agendamento do uso de cada funcionário em detalhe. Assim, os tempos médios de tratamento da carga dentro do cross dock determinado, por exemplo, a partir de dados históricos, deve captar essa relação com precisão suficiente para nos permitir assumir um tempo fixo entre as tarefas de entrada e de saída, que depende apenas do par de portas, entre os quais a carga é transportada;

Figura 3.4 - Túnel de leitura/ scanning do código de barras



- Embalando mercadorias de/para os caminhões: o problema das transferências de embalagens dentro dos caminhões também influencia os tempos de carga e descarga dos caminhões, assim como a manipulação das cargas dentro do cross dock. Mas isso (embalagem) não parece estar relacionado de forma significativa com a decisão de agendamento dos caminhões, uma vez que o empacotamento

das cargas no caminhão de entrada não é conhecido até se abrir o caminhão. Ainda, juntar cargas e empacotá-las próxima à porta de saída demandaria integrar essa atividade de planejamento com o agendamento dos caminhões de saída, aumentando a complexidade do planejamento como um todo. Por estas razões, geralmente se assume que a influência dos tempos de embalagem é muito pequena e já está incluída no tempo total de transporte da carga dentro da instalação de cross dock.

### 3.6 CENTRO DE DISTRIBUIÇÃO

A logística antigamente era vista como um conjunto de atividades meramente operacionais. Hoje, as mudanças tecnológicas, juntamente com o crescente ambiente competitivo, têm favorecido o desenvolvimento da logística em termos conceituais e tecnológicos.

Uma definição para logística seria: “a parte do gerenciamento da cadeia de abastecimento que planeja, implementa e controla de forma eficiente e eficaz o fluxo direto e reverso, a armazenagem de mercadorias, os serviços e as informações relacionadas entre o ponto de origem e o ponto de consumo, a fim de atender às necessidades dos clientes”. (Council of Supply Chain Management Professionals, 2011)

As empresas, por sua vez, estão procurando alternativas para facilitar o gerenciamento de suas atividades, com a adoção de abordagens sofisticadas de gerenciamento, visando aumentar o controle, reduzir os custos e obter informações precisas que possam de fato agilizar a tomada de decisão e, conseqüentemente, melhorar o nível de sustentação de estratégias mercadológicas.

Surge assim uma questão básica do gerenciamento logístico: como estruturar sistemas de distribuição capazes de atender de forma econômica os mercados geograficamente distantes das fontes de produção, oferecendo níveis de serviço cada vez mais altos em termos de disponibilidade de produto e tempo de atendimento. Neste contexto, a atenção se volta para as instalações de armazenagem e como elas podem contribuir para atender de forma eficiente as metas estabelecidas de nível de serviço. A funcionalidade destas instalações dependerá da estrutura de distribuição adotada pela empresa (Lacerda, 2000).

Um armazém moderno típico é CD inteligente em que os produtos e pacotes são processados em tempo real, podendo estar dentro e fora do cronograma. Estes armazéns dinâmicos e inteligentes também possuem todas as funções de distribuição logística, com armazenamento de estoque

mínimo. Entradas e saídas devem ser reguladas de forma precisa e racionalizadas de forma inteligente. Portanto, o ambiente de distribuição tem como objetivo tornar as operações cada vez mais eficientes. As empresas podem cortar custos através da redução de estoque em todas as etapas da operação, incluindo a distribuição. Ao mesmo tempo, os clientes exigem melhores serviços, que se traduzem em embarques mais precisos e oportunos. Em vez de esperar uma semana para receber um produto, a maioria dos clientes quer que as entregas se façam em um ou dois dias. Na maioria dos ambientes de produção, porém, é difícil enviar produtos diretamente da fábrica para o cliente, e assim pontos de modo intermediários são necessários para conectá-los. Um ponto intermediário, em uma cadeia de suprimentos, é um CD.

Os CDs tornaram-se o grande fator de diferenciação competitiva, tendo como principal finalidade agregar valor por meio da disponibilidade imediata de produtos, com flexibilidade para atender as demandas de forma personalizada e com a velocidade exigida pelo consumidor. O CD, diferente do armazém geral, tem como finalidade gerenciar o fluxo de produtos e informações associadas, de modo que possa contribuir para a redução das distâncias, diminuindo os prazos de entrega, contribuindo para o atendimento das necessidades dos consumidores (Silva, 2000).

Figura 3.5 - Centro de distribuição



O CD (Figura ) serve como um ponto de abastecimento intermediário entre unidades produtoras e consumidoras, proporcionando agilidade no tempo de resposta numa eventual necessidade de reposição. A Associação Brasileira de Logística (Aslog, 2010) define o CD como

um armazém cujo objetivo é a gestão dos estoques de mercadorias na distribuição física. O CD recebe cargas consolidadas de diversos fornecedores e as fraciona. Após essa fase a empresa deve novamente consolidar os produtos, agora em quantidades e variedades necessárias às suas unidades descentralizadas para, em seguida, enviá-los (Barros, 2005).

Segundo Lima (2002), desta forma as empresas sentiram necessidade de utilizar o CD para que a crescente demanda de pedidos pudesse ser mais bem gerenciada. A demanda aumenta por dois motivos: maior variedade de produtos (em função não só do lançamento de novos produtos, mas também da grande variedade de cores, modelos e embalagens) e necessidade de melhor atendimento ao cliente (com tempo de entrega cada vez mais curto).

Sintetizando, tem-se que as principais atividades de um CD são:

1. Recebimento: A atividade de recebimento é a primeira etapa da trajetória do produto no CD. Consiste na entrada dos produtos, conferência física de quantidade e qualidade dos mesmos, e dos dados da nota fiscal. Qualquer diferença entre o solicitado e o entregue deve ser sinalizada neste momento, antes dos produtos entrarem propriamente no CD.

Um processo de recebimento de produtos inicia-se quando um veículo entra no CD, aproxima-se e estaciona na doca. Após estacionar o veículo, retiram-se os produtos para iniciar a contagem e conferência física do material. Em alguns CDs poderá haver equipamentos para nivelar o caminhão com a plataforma, com isso evita-se eventuais acidentes durante a movimentação de mercadorias (Moura, 1997).

Podem-se utilizar tecnologias para agilizar o processo tais como: código de barras, coletores de dados e RFID;

2. Movimentação: inicia-se logo após o recebimento da carga, podendo ocorrer de duas formas; (i) transferência do material da área de recebimento ao local onde ficará estocada e (ii) a separação, quando se retiram os produtos da área de estocagem e os alocam ao espaço para consolidação dos pedidos, podendo utilizar para isso a mão de obra humana ou equipamentos como esteiras, paleteiras, transpaleteiras e empilhadeiras (Figura ), por exemplo.

A movimentação e o manuseio de materiais consomem mão de obra, tempo e dinheiro. A oportunidade de reduzir a intensidade da mão de obra e aumentar sua produtividade reside nas novas tecnologias de

movimentação e manuseio de materiais, que estão emergindo nos dias de hoje.

Figura 3.6 - Empilhadeiras para manusear paletes na Costco, EUA



Atualmente, uma das formas mais utilizadas de embalagens é a paletização. O palete (do inglês *pallet*) é uma plataforma de madeira, metal, fibra ou outro material, disposta horizontalmente, na qual a carga pode ser empilhada e estabilizada (Mahomey, 1985);

3. Armazenagem: é a guarda temporária de produtos para posterior distribuição. Essa atividade é fundamental no CD, pois possibilita uma boa utilização do espaço e dos recursos operacionais, além da diminuição de tempo para localizar os produtos no interior do armazém. São compostas, por estruturas como porta-paletes, drive-in, estanterias e racks, que são separadas por corredores para ter acesso às mercadorias;

4. *Picking*: é o processo de seleção e retirada dos produtos referentes aos pedidos, nas quantidades corretas. Tal processo é tão importante que, de acordo com Drury (1998), cerca de 60% dos custos operacionais em um CD típico podem ser atribuídos a atividade de picking.

5. Expedição: é a última etapa realizada no CD, consistindo, basicamente, na conferência e no carregamento dos veículos. Envolve atividades como:



validação do pedido e da nota fiscal, emissão de documentos de expedição e pesagem da carga, por exemplo.

### 3.7 FORMAS DE ORGANIZAÇÃO INFORMACIONAL E SEUS EFEITOS NO DESEMPENHO

A importância da informação dentro das organizações, tanto em níveis operacionais, táticos e estratégicos, aumenta de acordo com o crescimento da complexidade das organizações. A informação é vista como um elemento essencial para tomadas de decisão, e pode determinar o êxito ou fracasso de um empreendimento.

Os sistemas integrados dão às empresas a flexibilidade para responder rapidamente às solicitações dos clientes e ao mesmo tempo, produzir e manter em estoque apenas o necessário para atender aos pedidos existentes. Sua capacidade de tornar a expedição mais veloz e precisa, minimizar os custos e aumentar a satisfação do cliente também gera mais lucratividade para as empresas (Laudon, 2007).

O cross-docking é um sistema logístico complexo e para ter sucesso os participantes da cadeia, desde os fabricantes até os varejistas, devem trabalhar em constante integração dos fluxos de materiais com fluxo de informação. Como exemplo, poderíamos citar os procedimentos informatizados de agendamento, que possibilitam uma sincronização eficiente de caminhões de entrada e de saída nos cross docks. Tal ferramenta torna-se indispensável para otimizar o tempo do caminhão no sistema, bem como, otimiza a utilização e manuseio de equipamentos para a descarga e tem impacto direto na mão de obra disponibilizada.

Kendall e Kendall (1991) comentam que os responsáveis pela tomada de decisão começam a considerar que a informação já não é um produto exclusivamente colateral das operações da empresa e sim um dos promotores da mesma.

A qualidade e a confiabilidade têm se tornado mais importantes com a introdução da produção just-in-time e com o uso dos sistemas ERP – Enterprise Resource Planning (sistema de informação que integra todos os dados e processos de uma organização em um único sistema), pois dessa forma os componentes e matérias-primas somente são solicitados quando existe a demanda, o que reduz, sensivelmente, os custos com armazenamento. As parcerias na cadeia de suprimentos permitem as empresas gerenciar fornecedores e subfornecedores a cooperar e maximizar a lucratividade para todos os parceiros (Killen, 2004). Podemos citar o caso de uma indústria média norte-americana de autopeças, situada no estado de Illinois, que conseguiu reduzir o tempo

entre o pedido e a entrega de seis para duas semanas, aumentando a eficiência na data prometida para envio do produto de 60% para 95% e reduzindo as reservas de insumos em 60%. Outra diferença notável: a troca de documentos entre departamentos que demorava horas ou mesmo dias caiu para minutos e até segundos.

Para que o sistema apresente resultados satisfatórios é necessário que as operações internas no terminal sejam adequadamente dimensionadas, tanto sob o ponto de vista de recursos humanos, como também no que se refere a equipamentos e tecnologia da informação.

Por outro lado, a eficiência operacional de um centro de distribuição depende muito do sistema de rotulagem das unidades de carga. O método mais eficiente está ligado ao uso de RFID ou código de barras, que deverão já vir instalados desde a origem dos produtos e com todas as informações previamente transmitidas ao centro de controle do terminal. Com isso, torna-se possível agilizar todas as operações no terminal. Para que se atinjam níveis de eficiência adequados, os protocolos de tratamento e transmissão das informações devem ser uniformes para todos os participantes. Mas, de novo, as empresas abastecedoras são heterogêneas, com diversos graus de avanço tecnológico, e o mais provável será a ocorrência de situações mistas numa primeira fase das operações (Novaes et al, 2015).

Como já citado anteriormente, é imprescindível para o ótimo desempenho do processo logístico aplicado na cadeia de frios um complexo sistema de informação. Tal sistema fornece uma infra-estrutura forte e apoio teórico para o controle de temperaturas em alimentos que tem como prioridade baixas temperaturas, do fornecedor ao cliente final. Por ser uma área nova e um mercado emergente, muitos pesquisadores e empresas ainda terão muitos desafios para sua implementação.

Exceto para os fatores externos, como vimos a técnica logística cross-docking só pode ser bem sucedida, se o projeto de layout dos cross docks, aliado às políticas operacionais, com transmissão das informações de forma homogênea, forem processos executados de forma eficiente.

### 3.8 MODALIDADES DE CROSS-DOCKING

Armazenagem e cross-docking são partes contínuas de distribuição. Tradicionalmente, o objetivo da armazenagem é melhorar o atendimento ao cliente por meio do armazenamento de estoques em um local próximo aos clientes. Como uma alternativa, cross-docking é uma estratégia mais recente proposta para eliminar o custo de armazenamento

movendo o inventário rapidamente através de um cross dock sem armazenamento para os clientes (Gue, 2007).

Por este motivo, o sistema de cross-docking surge para reduzir ao máximo o nível dos estoques, realizando entregas frequentes e diminuindo o custo operacional. As instalações que operam cross-docking não realizam as etapas de armazenamento e picking, pois as cargas recebidas pelos fornecedores são separadas e imediatamente transferidas para as áreas de saída dos carregamentos. Com isso, a operação de cross-docking busca eliminar ou diminuir duas das etapas mais caras realizadas em um armazém, que é o processo de armazenagem e picking.

Podem-se definir modalidades de cross-docking. Alguns autores diferem em suas definições a cerca dos tipos de cross-docking existentes, gerando assim diversas classificações.

A primeira classificação feita por Lacerda (2000) classifica o cross-docking como puro: os produtos chegam pelas docas transversais de recebimento e atravessam o CD diretamente para serem embarcados, ou onde os produtos são mantidos em uma área de espera para o posterior carregamento na plataforma de embarque.

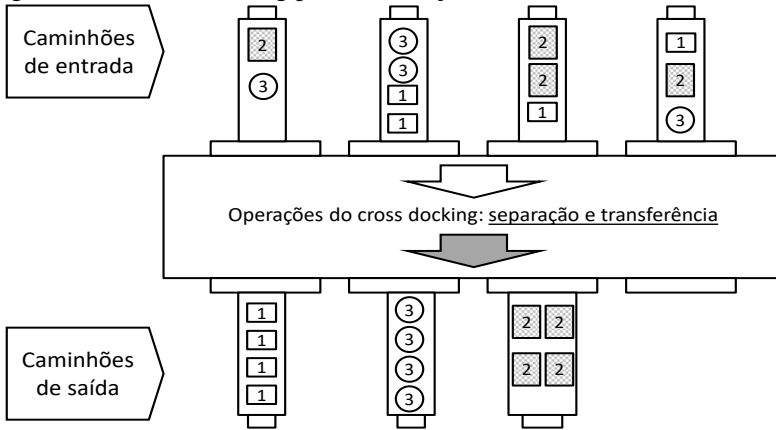
A classificação apresentada pela EAN Internacional (2000). No Pre-Packed Cross-docking os pacotes são preparados pelos fornecedores de acordo com as ordens de cada loja. O CD apenas separa e embarca os pacotes por lojas, não existindo manuseio. Outra maneira seria o *Intermediate Handling Cross-docking*. Nesse tipo de cross-docking o CD recebe, quebra e consolida as cargas, definindo a unidade de distribuição, ou seja, a preparação dos pedidos é feita pelo CD por meio do manuseio de material.

Os elementos comuns a todas essas operações são: a consolidação e o intervalo de tempo extremamente curto entre as operações de entrada e de saída (geralmente menos de um dia). O curto tempo do ciclo é possível, porque o destino das mercadorias é conhecido antes ou imediatamente determinado quando eles são recebidos. Com relação a isso Bartholdi, Gue, e Kang (2001), sugerem classificar o cross dock em duas categorias:

**1. Cross docks pré-distribuição:** os destinos são pré-determinados e etiquetados nas unidades despachadas pelos fornecedores antes de chegar ao terminal de cross-docking, para que os trabalhadores possam transferir em seguida tais remessas diretamente após a descarga para os caminhões de saída. É difícil de implementar, porque os fornecedores dos produtos precisam saber detalhes sobre cada destino (quantidades, tipos, etc.) antes

de enviar a remessa. Isto envolve um volume expressivo de transferência de informação, integração de sistemas e coordenação (Figura );

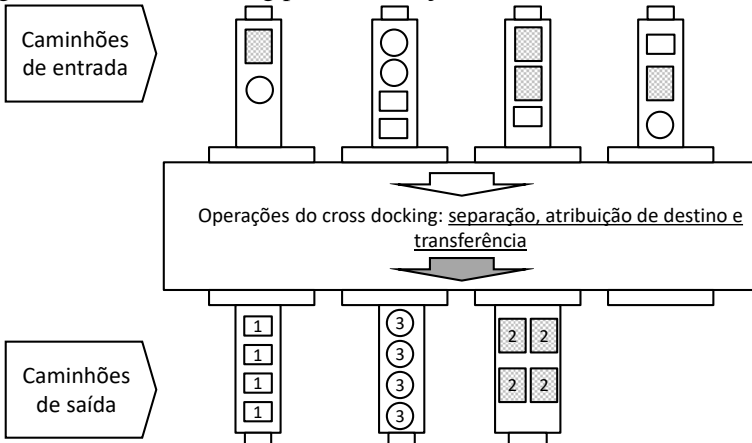
Figura 3.7 - Cross-docking pré-distribuição



Fonte: O autor

**2. Cross docks pós-distribuição:** a carga de entrada chega sem um pré-destino determinado, e os trabalhadores no cross dock atribuem os destinos para os embarques. Esta alternativa oferece a vantagem de adiar os destinos finais, mantendo confidencialidade dos mesmos, mas retardam o desempenho de certas atividades (tais como: fixação de preço e re-embalagem), nas docas de valor adicionado (Figura ).

Figura 3.8 - Cross-docking pós-distribuição



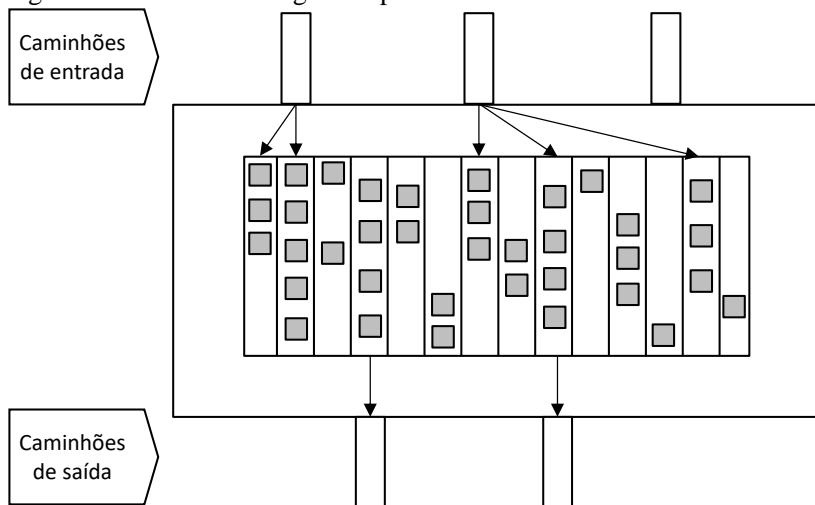
Fonte: O autor

### ***Classificação com base no método de preparação do frete***

De acordo com Napolitano (2000) apud Yang e Balakrishnan (2010), outra forma de classificar os cross docks é de acordo com o método de transporte de mercadorias de armazenamento temporário, são:

**1. Cross-docking de etapa única (de um estágio):** os paletes são descarregados e alocados em vias correspondentes a portas de entrada ou saída (Figura 3.9). Paletes de chegada (*inbounds*) são geralmente alocados nas vias que correspondem a porta de entrada quando os destinos finais são ainda desconhecidos na chegada/recebimento. Contudo, se os paletes de chegada já estão pré-empacotados, podem ser re-divididos (facilmente nas portas de entrada) para diferentes destinos, os paletes são provavelmente melhor alocados nas vias que correspondem às portas de saída. A alocação dos paletes de acordo com as portas de saída oferece aos funcionários a melhor visibilidade dos paletes aguardando em cada porta de saída, e pode facilitar uma melhor utilização do espaço durante o carregamento.

Figura 3.9 - Cross-docking de etapa única

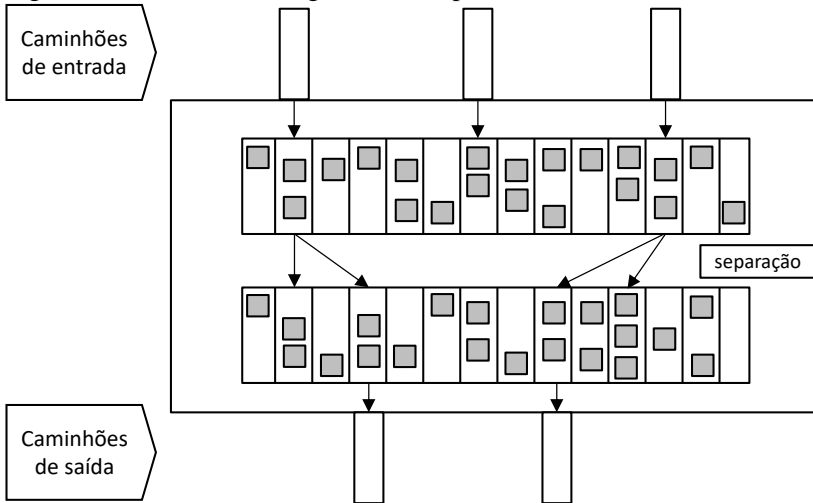


Fonte: O autor

**2. Cross-docking de duas etapas (de dois estágios)** (Figura 3.10): oferece a vantagem de permitir que os funcionários no corredor central possam re-dividir ou re-empacotar os paletes das vias que correspondem às portas de entrada para as vias que correspondem às portas de saída. Nas portas de entrada, os paletes são descarregados diretamente nas vias que

correspondem às portas de entrada. Os paletes podem então ser re-divididos ou re-empacotados. Um cross-docking de duas etapas oferece a vantagem de re-empacotar cargas das vias de entrada em paletes firmemente empacotados e melhor visibilidade para carregar os paletes firmemente para os caminhões de saída. As desvantagens são que cada paleta é manuseada mais uma vez, há a necessidade de mais espaço para acomodar o corredor central adicional e as vias, e há a necessidade de um cross dock maior, o que pode resultar num maior tempo de operação e esforço.

Figura 3.10 - Cross-docking de duas etapas



Fonte: O autor

**3. Cross-docking com etapas livres:** não usa qualquer fila onde os paletes são alocados numa extremidade e puxados a partir do outro. Ao contrário, uma área livre é reservada próxima a cada entrada, saída, e/ou em ambas as portas. Por exemplo, na área livre de cada porta de entrada, paletes são descarregados dos caminhões de entrada (*inbound*), redistribuídos e re-empacotados, antes de serem transportados para cada porta de saída. Similarmente, os paletes podem também ser redistribuídos ou alocados na área livre para cada porta de saída antes de serem carregados nos caminhões de saída (*outbound*). Além dos cross-dockings de etapa única, duas etapas e livre, Napolitano (2000) sugeriu que cargas de entrada podem também ser redirecionadas para uma área separada de redistribuição e re-empacotamento antes de serem transferidas de volta para as portas de saída.

Apesar das várias modalidades de cross-docking e tipos encontrados é preciso considerar a possibilidade de combinar mais de um tipo de cross-docking, avaliando diferentes alternativas em cada aplicação prática específica. Não há uma resposta certa, mas sim uma combinação de estruturas que leva a um conjunto de vantagens e desvantagens, que precisam ser avaliadas sob a ótica tanto do cliente quanto do empresário/acionista.

### 3.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi introduzida a conceituação da técnica logística de cross-docking, um dos motivadores deste estudo, uma estratégia que vem ganhando cada vez mais importância dentro das empresas que respondem a pressões econômicas cada vez mais frequentes, buscando assim novas práticas para controlar custos e aumentar a eficiência para o cliente final. Discutimos as vantagens e desvantagens do uso desta técnica que assim como todas as estratégias, se mal administrada pode ser prejudicial para todo o processo. O capítulo introduz também o uso desta técnica no mundo. Por ainda ser uma técnica nova, o Brasil ainda carece de muitos investimentos e estudos nessa área. Alguns layouts são discutidos, porém neste estudo optou-se por usar o formato do CD em forma de I, que é a forma mais utilizada em Centros de Distribuição que utilizam a técnica logística de cross-docking. No próximo capítulo serão introduzidos dois modelos de filas que serão aplicados em um estudo de caso para o problema de filas dos caminhões que chegam a um terminal de transbordo. Um modelo utilizando modelo de filas clássico e outro um modelo de fila não estacionário.





## 4. MODELO TEÓRICO

### 4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

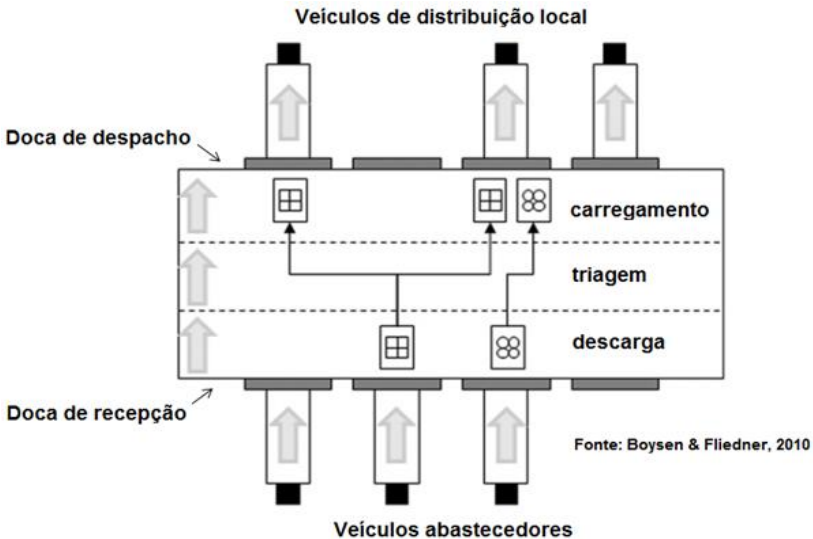
Um veículo que chega ao terminal para descarregamento de produtos e encontra uma posição de atendimento não ocupada pode se dirigir diretamente a essa doca para descarregamento. No entanto, muitas vezes as posições de descarga estão ocupadas e o veículo precisa entrar numa fila, recebendo, para isso, uma senha. Para o dimensionamento do número necessário de docas de recepção, e da área de estacionamento no pátio voltada aos caminhões que aguardam descarga, é necessário determinar o número de posições de descarga e o número esperado de veículos na fila, para isso adotando-se um nível de serviço adequado. O número de posições de descarga atuando em paralelo na doca de recepção é determinado pela aplicação de um modelo matemático de fila, ou por simulação.

Um elemento importante nos modelos clássicos de filas é a notação de Kendall, Saaty (1961), apud Novaes (1975) e Fogliatti (2007), que possibilita a classificação das filas de acordo com diversos fatores. Os principais fatores são: (a) o processo probabilístico de chegadas, (b) o processo probabilístico de atendimento, (c) o número de posições de atendimento em paralelo, (d) a capacidade física do sistema, (e) a disciplina de atendimento (Fogliatti e Mattos, 2007). Por exemplo, uma fila do tipo  $M/M/n/\infty/FIFO$ , na notação de Kendall, tem as seguintes características:

- a) As chegadas dos elementos obedecem a um processo probabilístico de Poisson, que é representado pela letra  $M$ ;
- b) Os tempos de atendimento nas instalações de serviço obedecem a uma distribuição exponencial negativa, também representada pela letra  $M$ , pois a distribuição exponencial está intimamente ligada à distribuição de Poisson;
- c) Existem  $n$  posições de atendimento operando em paralelo;
- d) A capacidade do sistema de filas é infinita ( $\infty$ ), podendo receber um número não restrito de unidades que desejam serem atendidas pelo sistema;
- e) A ordem de atendimento da fila é *FIFO*, conceito em inglês que significa que o atendimento é realizado na ordem de chegada.

No caso de terminais de cross-docking, num lado da instalação chegam os caminhões alimentadores (Figura ). O tipo de distribuição das chegadas pode ser Poisson, ou pode obedecer a outros tipos de distribuição probabilística. O atendimento, no caso de um CD, é o processo de descarga do caminhão, cujo tempo de duração vai depender de uma série de fatores, como o tipo da carga, o equipamento utilizado, o tipo de Tecnologia da Informação empregado na transmissão de informações entre a empresa fornecedora dos produtos e o operador do terminal, os recursos humanos alocados à operação, o layout do terminal, etc. Esses aspectos serão discutidos adiante, em maior detalhe.

Figura 4.1 - Representação esquemática de um terminal de tipo cross-docking



Fonte: O autor

Na plataforma de recepção, são alocadas  $n$  posições de descarga (docas, ou portas de recepção) para os veículos previstos para essa operação. Na notação de Kendall anteriormente indicada não há restrição de espaço para os veículos que esperam na fila (capacidade  $\infty$ ). De fato, o número de posições de espera na fila é uma das variáveis que se pretende dimensionar de forma a projetar as áreas externas do terminal e, por isso, deixamos em aberto para que o modelo a especifique. Finalmente, em nosso exemplo, a ordem de atendimento é FIFO, ou seja, o serviço de descarga é ministrado na ordem de chegada dos caminhões.

Há, na literatura, muitas aplicações de modelos de fila, além dos textos referenciados.

Para determinar a solução teórica de um modelo de filas clássico, admite-se que o processo permaneça em operação com as mesmas características básicas por um longo período de tempo, convergindo então para uma situação de equilíbrio estocástico, denominada regime estacionário. Tal comportamento é derivado das propriedades de Cadeias de Markov, em que a maioria dos modelos de fila se baseia (Fogliatti e Mattos, 2007). Um grande número de modelos de filas atende a essa condição. Há muitas situações práticas em que isso ocorre. Por exemplo, o atendimento de veículos num posto rodoviário de pedágio durante certo período de tempo, navios esperando atracação num terminal portuário, filas de pessoas nos caixas de bancos, etc.

Modelos clássicos de fila desse tipo, no entanto, geralmente não se aplicam ao dimensionamento de terminais de cross-docking, uma vez que, na maioria dos casos, o processo de formação da fila não atinge um regime estacionário, que é um requisito básico para aplicação desses modelos. Três razões principais justificam essa afirmação. Em primeiro lugar, as operações de cross-docking são realizadas dentro de períodos de tempo pré-definidos (janelas de tempo), em que os veículos chegam ao terminal obedecendo a uma programação temporal pré-fixada e normalmente curta. Durante essa janela de tempo, nem sempre o processo estocástico tem condições de atingir o regime estacionário. Em segundo lugar, a taxa de chegadas dos caminhões ao CD pode variar significativamente ao longo do período de operação de cross-docking, situação essa que difere substancialmente dos casos clássicos. Finalmente, ao terminar o tempo estabelecido previamente para a chegada dos caminhões, pode haver ainda veículos na fila, fazendo com que a operação de descarga continue por mais algum tempo, sem que se observem novas chegadas. Esses aspectos serão discutidos em maiores detalhes nas próximas seções.

Mesmo considerando que modelos estacionários de fila normalmente não se aplicam a problemas relacionados à operação de terminais de tipo cross-docking, foi feito, a seguir, uma aplicação com dados do problema a ser abordado adiante, para efeitos comparativos.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

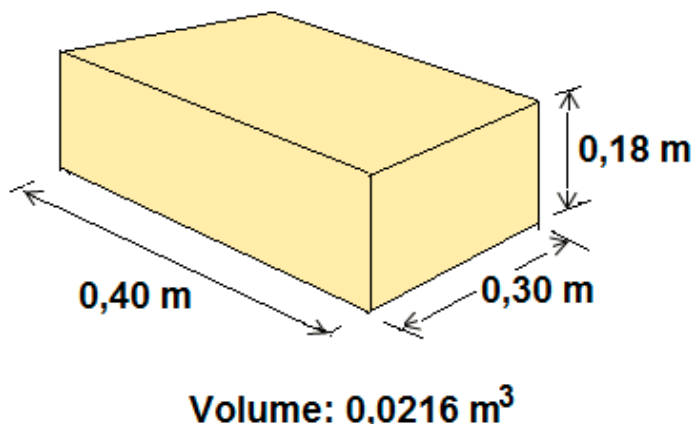
Trata-se de uma cadeia de supermercados que opera um terminal de cross-docking, recebendo produtos de empresas fornecedoras e os

transferindo para veículos que abastecem as lojas da empresa. Neste caso específico, o sistema opera da seguinte forma:

- A empresa supermercadista organiza a recepção de lotes de produtos despachados por fornecedores, em seu depósito central, dentro de horários previamente determinados;
- No horário previamente acertado, chegam os caminhões das indústrias fornecedoras ao armazém central da empresa cliente;
- À medida que se processa a descarga, funcionários do armazém fazem a triagem dos produtos e os encaminham à doca de despacho de acordo com as quantidades a serem destinadas a cada loja;
- Na doca de despacho, são carregados os veículos que fazem as entregas dos produtos às diversas lojas varejistas da empresa supermercadista;
- Uma vez totalmente descarregado o caminhão do fornecedor, a posição respectiva na doca de recepção fica liberada e, em seguida, outro veículo atraca para a descarga, na hora previamente alocada para tal operação;
- Quando todos os produtos provenientes dos fornecedores forem totalmente descarregados, e os veículos de distribuição estiverem plenamente carregados, é iniciado o processo de distribuição para as lojas da cadeia de supermercado.

Neste exemplo é assumido que o processo de formação de filas é estacionário, com o terminal operando continuamente. Admite-se, numa aproximação preliminar, que todos produtos chegam em caixas uniformes de papelão (*cartons*, em Inglês), com as dimensões indicadas na Figura 4.2. A caixa mostrada na Figura 4.2 é entendido como a unidade *equivalente de manipulação do produto*. Assim, os fluxos de produtos que chegam, são manipulados, e posteriormente embarcados no terminal são medidos simplificarmente em número de caixas equivalentes.

Figura 4.2 - Caixa padrão de acondicionamento dos produtos



Fonte: O autor

A composição da frota de caminhões alimentadores é a apresentada na Tabela 4.2. O terminal recebe continuamente uma média de 10.625 caixas equivalentes de produto por hora. Admitindo taxa constante de chegadas e média de 463,8 caixas por veículo (Tabela 4.2), obtém-se a taxa média de chegadas de caminhões igual à 22,9 veículos por hora. Neste exemplo, o tempo médio de descarga de um veículo é de 43,8 minutos, conforme Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Composição da frota de veículos alimentadores

| <b>Tipo de caminhão</b> | <b>Capacidade de carga (kg)</b> | <b>Frequência nas chegadas (%)</b> | <b>Número de caixas por caminhão (u)</b> | <b>Tempo médio de descarga de um veículo (min)</b> |
|-------------------------|---------------------------------|------------------------------------|--|--|
| <b>Toco</b>             | 6.000                           | 70                                 | 428                                      | 40   |
| <b>Truck</b>            | 10.000                          | 20                                 | 714                                      | 67   |
| <b>VUC(*)</b>           | 3.000                           | 10                                 | 214                                      | 24   |
| <b>Situação média</b>   | 6.300                           |                                    | 463,8                                    | 43,8   |

(\*) Veículo urbano de carga

Fonte: O autor

Para o dimensionamento da fila, do tempo médio de espera e das posições de estacionamento, foi aplicado o modelo de fila M/M/C/∞/FIFO, segundo a notação de Kendall. Admitindo que a taxa média de chegada dos caminhões no terminal seja constante, ou seja,

$\lambda(t) \equiv cte$  ou  $\lambda = 22,9$  veículos por hora, e obedecendo a um processo de Poisson. Ademais, a distribuição dos tempos de atendimento na doca de recepção é admitida como sendo uma exponencial negativa, com tempo médio de serviço de 43,8 minutos, ou 0,73 horas, em cada posição de descarregamento, e com  $\mu = \frac{1}{0,73} = 1,37$  veículos por hora.

Seja  $r = \lambda/\mu$ . O tempo médio de espera na fila, para esse tipo de fila, é dado por (Fogliatti e Mattos, 2007):

$$\bar{W}_q = \frac{r^n \mu}{(n-1)!(n\mu-\lambda)^2} P_0, \quad (4.1)$$

onde  $n$  é o número de docas de descarga e  $P_0$  é a probabilidade de não ter fila, dada por

$$P_0 = \left( \sum_{j=0}^{n-1} \frac{r^j}{j!} + \frac{n r^n}{n!(n-r)} \right)^{-1} \quad (4.2)$$

Por outro lado, para a fila M/M/C/ $\infty$ /FIFO, a função de distribuição acumulada do tempo de espera na fila, em função do tempo  $t$ , é a seguinte (Fogliatti e Mattos, 2006):

$$\tau_q(t) = 1 - P_0 \frac{r^n}{n!(1-\rho)} \exp[-(n\mu - \lambda)t], \quad (4.3)$$

onde  $\rho = \lambda/n\mu$  é o índice de congestionamento, que deve ser menor do que a unidade, de forma a garantir que o processo estocástico da fila atinja o regime estacionário (Novaes, 1975; Fogliatti e Mattos, 2007). Admitindo nível de confiança de 98% (ou outro, dependendo do nível de precisão necessário), Faz-se  $\tau_q(t) = 0,98$  na equação (4.3), que se torna:

$$P_0 \frac{r^n}{n!(1-\rho)} \exp[-(n\mu - \lambda)t] = 0,02, \quad (4.4)$$

a qual, resolvida em  $t$ , fornece o valor  $\tau_q^{(MAX)}$ , que é o tempo máximo provável na fila.

No Apêndice A é apresentado o programa em Delphi desenvolvido para determinar os elementos principais da fila M/M/C/ $\infty$ /FIFO deste exemplo, assim como os resultados. Com um número de docas  $n = 22$ , observa-se um índice de congestionamento  $\rho = 0,760 < 1$ , que garante que o processo estocástico da fila atinja um estágio estacionário. O número médio de caminhões na fila é igual à 0,5, e com 98% de certeza estatística pode-se observar um número máximo de 6,6 veículos na fila. O tempo máximo de espera na fila, por sua vez, é de 17,2 minutos.

Embora matematicamente correto, este modelo de filas não se aplica à maioria de exemplos de terminais do tipo cross-docking, como será visto a seguir.

#### 4.3 JANELAS DE TEMPO E DEMANDA VARIÁVEL EM TERMINAIS DE CROSS-DOCKING

A operação de terminais de cross-docking pressupõe a organização e a coordenação das chegadas dos veículos alimentadores, como também das operações internas e do carregamento dos veículos de distribuição. A organização e a coordenação das chegadas de veículos e das demais atividades nesse tipo de terminal afetam as características probabilísticas do sistema, levando a formulações estocásticas diversas das encontradas nos modelos de filas tradicionalmente utilizados na análise de problemas logísticos e de transportes.

Um elemento muito importante na operação de um CD com cross-docking é a sincronia entre as operações de recebimento de mercadorias na doca de recepção e o carregamento dos veículos de distribuição. Essa sincronia é necessária para reduzir praticamente a zero o estoque de produtos dentro da instalação e, conseqüentemente, minimizar, ao máximo, as dimensões das docas, a área do terminal e os custos operacionais. Com isso acaba-se reduzindo também o tempo de distribuição das mercadorias, visto que a carga permanece no terminal o mínimo tempo possível. Operações não sincronizadas e a desarticulação entre as atividades nas várias etapas das fases operacionais no terminal redundarão em quedas expressivas de eficiência, com a conseqüente redução das vantagens do empreendimento. Dessa forma, as chegadas de veículos de abastecimento ao terminal devem obedecer a horários pré-estabelecidos e controlados.

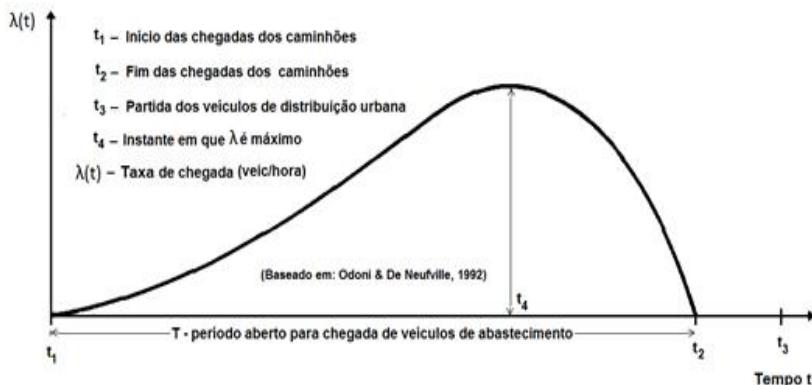
Na Figura 4.3 é mostrado um diagrama típico do processo de chegadas dos caminhões abastecedores no terminal, para uma operação de cross-docking programada, em que os operadores são obrigados a se enquadrar dentro de uma janela de tempo pré-definida. O diagrama da Figura 4.3 foi extraído do artigo de Odoni e De Neufville (1992), e refere-se às chegadas de passageiros para *check-in* em aeroportos. Apesar de referir-se a chegadas de pessoas à fila de *check-in* em aeroportos e terminais assemelhados, o esquema representa bem o comportamento humano noutros tipos de operação quando há claros limites de atendimento em termos temporais (janela de tempo). Em primeiro lugar, há uma restrição inferior para chegada ao sistema, uma vez que um elemento (um caminhão, em nosso caso) não pode ser recebido para ser

descarregado antes de um momento pré-definido (o instante  $t_1$ , na Figura 4.3).

Por outro lado, não é permitido receber um veículo para descarga além do instante  $t_2$  (Figura 4.3). Se fossem permitidas chegadas após o instante  $t_2$ , poderia não haver tempo suficiente para descarregar, processar e carregar os veículos de distribuição antes do instante de partida  $t_3$ .

De acordo com Odoni e De Neufville (1992), o comportamento dos usuários (neste caso, os operadores de caminhões) segue, em linhas gerais a seguinte regra: cada veículo alimentador que se destina ao terminal escolhe um momento  $t$  de chegada tal que, na sua percepção, garante uma probabilidade de 95%, ou maior, de cumprir a restrição superior da janela de tempo, ou seja, garantir o limite  $t \leq t_2$  (vide Figura 4.3). Assim, não é considerado o valor absoluto de  $t$ , mas o valor percebido, ou antecipado, pelo transportador. Em termos comportamentais, o valor percebido/ antecipado por ele é fortemente influenciado pelas suas piores experiências prévias, incluindo problemas de tráfego e condições meteorológicas anteriores, bem como o rigor imposto pela administração do terminal no cumprimento do horário pré-estabelecido.

Figura 4.3 - Processo de chegada dos caminhões alimentadores



Após o instante  $t_1$ , a doca de recebimento fica aberta para receber os caminhões para descarga. No início, a taxa  $\lambda(t)$  de chegadas de caminhões ao terminal é baixa, e  $\lambda(t)$  vai subindo lentamente até o instante  $t_4$ , onde  $\lambda(t)$  é máximo (Figura 4.3). Após esse instante, a preocupação dos motoristas em não perder o prazo de atendimento cresce, fazendo com que procurem chegar logo ao terminal, o que provoca a



redução paulatina da taxa, até que se torne zero no ponto  $t_2$ . Pode haver variações do tipo de curva nas aplicações, mas o formato da Figura 4.3 exprime com razoável fidelidade o comportamento humano em casos semelhantes.

A Figura 4.3 mostra duas características que diferenciam significativamente o processo de formação de fila de caminhões na plataforma de desembarque, quando comparado com o tipo de fila descrito na Seção 4.1:

- (a) Há uma janela de tempo pré-definida para a chegada dos caminhões, que vai do instante  $t_1$ , quando as docas de recebimento são abertas, até o instante  $t_2$ , quando as docas de recepção são fechadas;
- (b) Dentro da janela de tempo, observa-se que a taxa de chegadas dos veículos não é constante, mas varia de acordo com uma função, do tipo representado na Figura 4.3.

Observa-se que em situações desse tipo, com regras operacionais suficientemente rígidas, o processo estocástico de formação de filas pode não atingir o equilíbrio estacionário mencionado anteriormente para os modelos clássicos de fila. Torna-se então necessário aplicar um tipo de modelagem que não dependa do caráter estacionário do processo. Newell (1968, 1971) desenvolveu uma modelagem bastante original e robusta, voltada à solução de problemas de filas com estados transientes e não estacionários. Para isso é utilizada uma representação contínua, em que o processo de chegadas é representado como se seus elementos fossem um fluido em movimento.

#### 4.4 REPRESENTAÇÃO MATEMÁTICA DA FUNÇÃO $\lambda(t)$

Seja  $\lambda(t)$  a função que exprime a taxa de chegadas de produtos no terminal. A aproximação contínua empregada por Newell (1968, 1971) para o problema de formação de filas deste tipo é o modelo de difusão, a partir da equação de Fokker-Planck. Dentro desse tipo de formulação, a representação discreta é abandonada, e por isso adotamos nesta análise, como variável básica do processo estocástico, o número de caixas de produtos que chegam ao terminal (Tabela 4.2). Sua conversão para número de veículos é imediata, bastando utilizar o índice médio de 463,8 caixas por veículo indicado na Tabela 4.2.

Seja  $T$  a extensão da janela de tempo indicada na Figura 4.3, ou seja,  $T = t_2 - t_1$ .

Muda-se o eixo da abcissas, fazendo a origem de  $t$  no ponto  $t_1$ . Por outro lado, seja  $G$  a quantidade de produtos operados no terminal durante todo o período  $T$ , medido em caixas. Newell (1971) admitiu uma função do segundo grau para representar  $\lambda(t)$ , mas esse tipo de função não reflete a característica assimétrica da curva ao longo do tempo, como pode ser observado na Figura 4.3. Por esse motivo foi adotado uma representação de terceiro grau que, como mostrado adiante, aderiu satisfatoriamente às características desse tipo de curva:

$$\lambda(t) = f(a t + b t^2 + c t^3), \quad (4.5)$$

em que  $f$  é uma constante. Uma função de terceiro grau do tipo (4.5) pode ser representada a partir das raízes da equação

$$f(t - t_A)(t - t_B)(t - t_C) = 0, \quad (4.6)$$

onde  $t_A, t_B$  e  $t_C$  são as raízes. Uma vez que, de acordo com a Figura 4.3, se tem  $\lambda(0) = 0$ , faz  $t_A = 0$  em (4.6). Outra raiz de (4.6), neste caso, é  $t_B = T$ , pois  $\lambda(T) = 0$ . Substituindo em (4.6), obtém-se:

$$f t(t - T)(t - t_C) = 0. \quad (4.7)$$

Expandindo (4.7) obtém-se

$$\lambda(t) = f[t^3 - (T + t_C)t^2 + t_C T t], \quad (0 \leq t \leq T). \quad (4.8)$$

Para determinar  $f$  impõe-se que a integral de (4.8), no intervalo  $[0, T]$ , seja igual à  $G$ , que é a quantidade de produtos operada no terminal durante toda a janela de tempo  $T$ , num dia operacional típico

$$\int_0^T f[t^3 - (T + t_C)t^2 + t_C T t] dt = G. \quad (4.9)$$

Efetuada a integração (4.9), obtém-se

$$f = \frac{12G}{T^4}, \quad (4.10)$$

que, substituído em (4.8), leva à

$$\lambda(t) = \left(\frac{12G}{T^4}\right) [t^3 - (T + t_C)t^2 + t_C T t], \quad (0 \leq t \leq T). \quad (4.11)$$

Para determinar  $t_C$ , observa-se, na Figura 4.3, que a curva de  $\lambda(t)$  apresenta um ponto de máximo  $t_4$  no intervalo  $[0 - T]$ , aproximadamente em  $t_4 = \left(\frac{2}{3}\right)T$ . Para que  $t_4$  seja um ponto de máximo, duas condições devem ser observadas:

(a) A derivada de  $\lambda(t)$  deve se anular nesse ponto

$$\frac{\partial \lambda(t)}{\partial t} = \left( \frac{12G}{T^4} \right) [3t^2 - 2(T + t_C)t + t_C T] = 0; \quad (4.12)$$

(b) A derivada segunda de  $\lambda(t)$  deve ser negativa

$$\frac{\partial^2 \lambda(t)}{\partial t^2} = \left( \frac{12G}{T^4} \right) [6t - 2(T + t_C)] < 0. \quad (4.13)$$

Resolvendo a equação do segundo grau em  $t$  (4.12), obtêm-se as raízes,

$$t^{(1)} = \frac{2(T+t_C) + \sqrt{4(T+t_C)^2 - 12Tt_C}}{6}, \text{ e} \quad (4.14)$$

$$t^{(2)} = \frac{2(T+t_C) - \sqrt{4(T+t_C)^2 - 12Tt_C}}{6}. \quad (4.15)$$

Observa-se que, fazendo  $t_C = T$ , a derivada primeira de  $\lambda(t)$  se anula. De fato, tem-se

$$3T^2 - 4T^2 + T^2 = 0,$$

ou seja,  $t_C = T$  é uma raiz dupla de (4.5). Substituindo  $t_C$  por  $T$  em (4.14) e (4.15), é obtido as raízes  $t^{(1)} = T$  e  $t^{(2)} = \frac{1}{3}T$  de (4.12).

Colocando  $t_C = T$  em (4.13) observa-se que a condição necessária para que  $t$  seja um ponto de máximo é

$$t < \left( \frac{2}{3} \right) T,$$

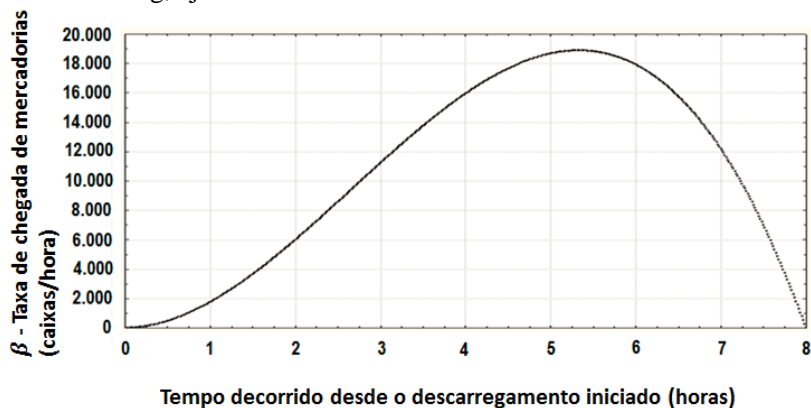
restrição essa observada apenas pela raiz  $t^{(2)}$ . Por outro lado,  $0 \leq t^{(2)} \leq T$ , o que satisfaz o imposto em (4.11). No entanto, observando a Figura 4.3, nota-se que a curva de  $\lambda(t)$  apresenta máximo no intervalo  $[0, T]$  aproximadamente no ponto  $t_4 = \left( \frac{2}{3} \right) T$ , enquanto  $t^{(2)} = \frac{1}{3}T$ . Inverte-se consequentemente o sentido da variável  $t$  de forma a garantir que  $t_4 = \left( \frac{2}{3} \right) T$ , para isso substituindo-a por  $T - t$  em (4.11). Colocando também  $t_C = T$  em (4.11), tem-se finalmente

$$\lambda(t) = \left( \frac{12G}{T^4} \right) [(T - t)^3 - 2T(T - t)^2 + T^2(T - t)], \quad (0 \leq t \leq T). \quad (4.16)$$

Considere o caso de uma cadeia supermercadista que possui um terminal de cross-docking, que opera a descarga de veículos de abastecimento durante uma janela de tempo de  $T = 8$  horas por dia, num total de  $G = 85.000$  caixas-equivalentes por dia. A curva de  $\lambda(t)$  ao longo da janela de tempo  $[0, T]$ , calculada através da relação (4.16), é apresentada na Figura 4.4, notando-se um bom ajuste quando comparada

com a Figura 4.3. Tem-se  $\lambda$  médio igual a 10.625 caixas equivalentes por hora, e  $\lambda$  máximo igual a 18.889 caixas equivalentes por hora.

Figura 4.4 - Curva da taxa  $\lambda$  de chegadas das mercadorias ao terminal de cross-docking, ajustada matematicamente



Fonte: O autor

## 4.5 FORMAÇÃO DE FILAS NA RECEPÇÃO DOS CAMINHÕES ALIMENTADORES

### 4.5.1 Fase inicial do processo estocástico sem formação de fila

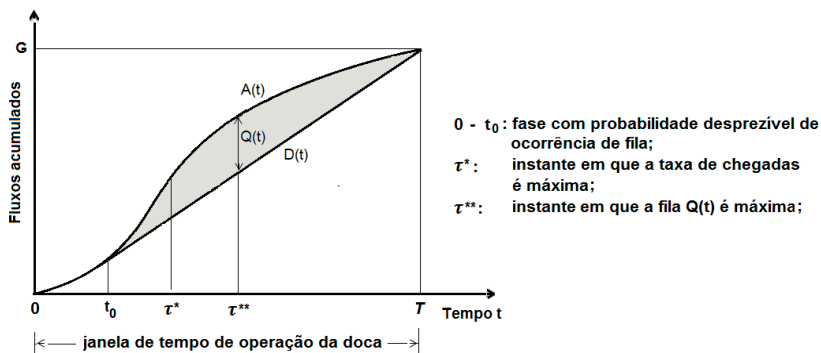
Seja  $D(t)$  a função acumulativa da capacidade de descarregamento de produto nas  $n$  portas operando simultaneamente e em paralelo, no terminal. Cada porta tem capacidade para descarregar, em média,  $\psi$  caixas por hora. A capacidade total média da doca de descarga é, portanto igual à  $\psi n$ . Foi admitido que a capacidade média de descarga seja constante durante o tempo, ou seja,  $D(t)$  varia linearmente em função do tempo:

$$D(t) = a + \psi n t \quad (4.17)$$

Para determinar o valor de  $a$ , indicado na relação (4.17), analisa-se, para isso, as características estocásticas da fila de veículos que se forma à espera de atendimento (Newell, 1968, 1971). Admiti-se que não haja fila no instante  $t = 0$ , ou seja,  $Q(0) = 0$ , onde  $Q(t)$  exprime o tamanho da fila no instante  $t$ . Numa primeira fase do processo, não haverá formação de fila, pois os valores de  $\lambda(t)$  são poucos expressivos em comparação à quantidade de portas disponíveis, a maioria delas ainda

vazias. Essa situação de ausência de fila tende a permanecer até um instante  $t_0$ , quando  $\lambda(t)$  atinge uma taxa de crescimento igual à  $\psi n$  (Newell, 1971) e a curva  $A(t)$  se separa da reta  $D(t)$ , conforme mostrado na Figura 4.5. A Figura 4.5 mostra também o instante  $\tau^*$  em que  $\lambda(t)$  é máximo e onde a tangente à curva  $A(t)$  começa a decrescer, bem como o instante em que a fila  $Q(t)$  se torna máxima.

Figura 4.5 - Fase entre o instante zero e o instante  $t_0$ , quando praticamente não há fila



Fonte: o autor

Assim, é necessário determinar  $t_0$  tal que,

$$\lambda(t_0) = \psi n, \quad (4.18)$$

ou seja, o instante  $t_0$  é aquele em que a taxa de chegadas dos produtos se torna igual à capacidade de descarga total da doca (Newell, 1971), incluindo todas as portas, ou seja

$$\left(\frac{12 G}{T^4}\right) [(T - t_0)^3 - 2 T (T - t_0)^2 + T^2 (T - t_0)] = \psi n. \quad (4.19)$$

A expressão (4.19) é uma equação do terceiro grau em  $t_0$  e pode ser resolvida matematicamente. No entanto, pode ser lançado mão de um processo de cálculo numérico para determinar  $t_0$ , especificamente o método da seção áurea (Novaes, 1978; Press et al, 2007).

O método da seção áurea parte da busca de Fibonacci (Novaes, 1978; Press et al, 2007). Kiefer (1953) demonstrou que existe uma estratégia ótima para localização de um ponto de ótimo de uma função unimodal de uma variável, num certo intervalo. Essa estratégia ótima é baseada na sequência dos números de Fibonacci (Press et al, 2007). O

onde  $N$  é um número inteiro escolhido a priori,  $k = 1, 2, \dots, N - 1$  e  $F_N$  é o número de Fibonacci, dado pela série

$$F_N = F_{N-1} + F_{N-2}, \quad (4.21)$$

com  $F_0 = F_1 = 1$  (Novaes, 1978).

A sequência de números de Fibonacci forma a equação de diferenças (4.21), cuja solução geral é do seguinte tipo

$$F_N = \alpha v_1^N + \beta v_2^N, \quad (4.22)$$

onde  $v_1$  e  $v_2$  são as raízes da seguinte equação característica

$$v^2 = v + 1. \quad (4.23)$$

A equação do segundo grau (4.23) tem as seguintes raízes:

$$v_1 = (1 + \sqrt{5})/2 \quad \text{e} \quad v_2 = (1 - \sqrt{5})/2 \quad (4.24)$$

O número  $(1 + \sqrt{5})/2 \cong 1,618$  é conhecido como razão da seção áurea, tida pelos gregos antigos como a proporção esteticamente perfeita entre dois elementos adjacentes. Para valores mais elevados de  $N$  vale a seguinte aproximação:

$$F_N = \alpha v_1^N + \beta v_2^N \cong \alpha v_1^N, \quad (4.25)$$

Assim

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \left( \frac{F_{N-1}}{F_N} \right)^n \cong \frac{\alpha v_1^{N-1}}{\alpha v_1^N} = \frac{1}{v_1} = \frac{2}{(1+\sqrt{5})} \cong 0,618 \quad (4.26)$$

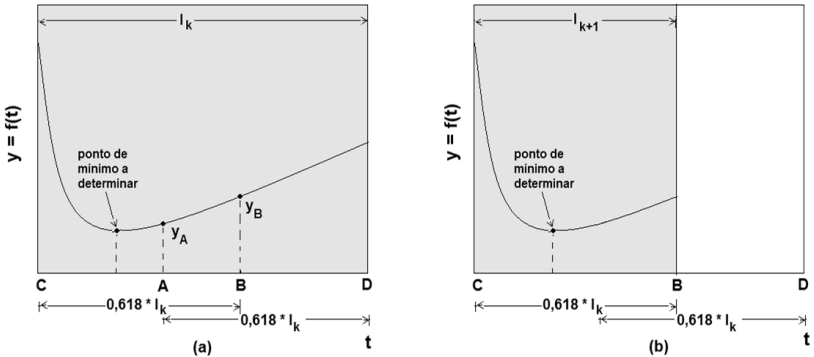
Dessa forma, no limite  $N \rightarrow \infty$ , o método de Fibonacci converge para o método da seção áurea, em que a partição sequencial do processo de busca (4.20) é substituído por

$$I^{(k)} = \left( \frac{1}{v_1} \right)^k I^{(0)} \cong (0,618)^k I^{(0)} \quad (4.54)$$

Seja, por exemplo, a função genérica e unimodal  $y = f(t)$  representada na Figura 4.6 (a). Após  $k$  estágios, chega-se ao intervalo reduzido de busca  $C - D$ , com extensão  $I_k$ . É aplicado, agora, o método da seção áurea, determinando os intervalos  $C - B = 0,618 * I_k$  e  $A - D = 0,618 * I_k$ . Ficam assim determinados os pontos B e A na Figura 4.6 (a). Uma vez que foi buscado o ponto de mínimo da função unimodal  $y = f(t)$ , e uma vez que  $y_A < y_B$  na Figura 4.6 (a), observa-se que o ponto de mínimo está situado no intervalo  $C - B$  da Figura 4.6 (a). Assim, foi suprido todo o trecho da curva à direita de B (Figura 4.6 (b)), restando a parte hachurada da Figura 4.6 (b) para o prosseguimento da busca. O

novo intervalo de busca  $I_{k+1}$  corresponde agora ao segmento  $C - B$ , e o processo prossegue até que se atinja um nível de precisão adequado.

Figura 4.6 - Representação do método da seção áurea utilizado para cálculo de  $t_0$ .



Fonte: o autor

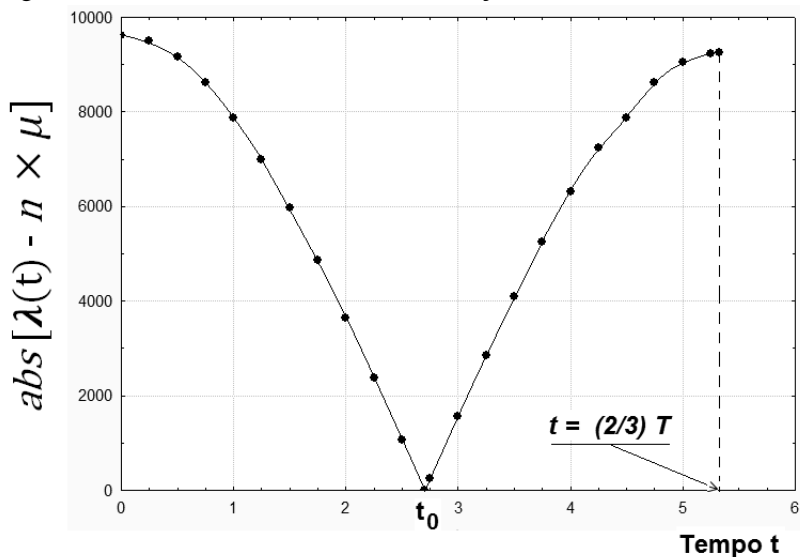
Através da relação (6.27), observa-se que, com  $k = 20$ , foi conseguido um nível de precisão igual a 0,000066 do intervalo inicial  $I_0$ , nível esse que satisfaz a maioria dos casos práticos. Caso seja requerida precisão maior, aumenta-se o valor de  $k$  adequadamente.

Como já dito, o método de busca da seção áurea funciona para obtenção do mínimo ou máximo de uma função unimodal de uma variável num certo intervalo. Nesta aplicação, o instante  $t_0$  é obtido minimizando a função  $f(t)$  dada pelo valor absoluto da diferença entre  $\lambda(t)$  e  $\psi n$ , conforme relação (6.18)

$$f(t) = \min\{abs[\beta(t) - \psi n]\} \rightarrow t_0 \quad (4.28)$$

No caso específico de  $t_0$ , o intervalo de busca de  $t_0$  é  $[0, \frac{2T}{3}]$ , pois, para  $t = (\frac{2}{3})T$ , a curva  $A(t)$  sofre uma inflexão, uma vez que a derivada de  $A(t)$  se anula nesse ponto (ponto de máximo de  $\lambda(t)$ ). Para aplicar o método da seção áurea a função  $f(t)$  deve ser unimodal no intervalo de busca. Para  $n = 15$  e  $\psi = 642$  caixas por hora, a Figura 4.7 mostra a variação da função (4.55) no intervalo  $[0, \frac{2T}{3}]$ . Observa-se a nítida unimodalidade da função, permitindo assim a utilização do método da seção áurea para determinação de  $t_0$ .

Figura 4.7 - Característica unimodal da função (4.28)



Fonte: o autor

#### 4.5.2 Duração do processo de descarregamento dos caminhões abastecedores

Seja  $A(t)$  a função acumulativa de chegadas de caminhões de abastecimento no terminal de cross-docking, dada por:

$$A(t) = \int_0^t \lambda(t) dt = G - f \left[ \left(\frac{1}{4}\right) (T - t)^4 - \left(\frac{2}{3}\right) T (T - t)^3 + \left(\frac{1}{2}\right) T^2 (T - t)^2 \right], \quad (4.29)$$

onde  $f$  é a constante definida anteriormente em (4.10). O elemento  $G$  que aparece em (4.29) resulta do processo de integração da função  $\lambda(t)$  quando se inverte a ordem de variação da variável  $t$ , conforme mostrado na Seção 4.4.

Observando a Figura 4.5, nota-se que  $D(t_0) = A(t_0)$ , uma vez que ambas são coincidentes nessa posição. Dessa forma, a equação da reta  $D(t)$  (equação 4.44) pode ser expressa especificamente para  $t = t_0$ :

$$A(t_0) = a + \psi n t_0, \quad (4.30)$$

e de (4.30) foi extraído o valor de  $a$



$$a = A(t_0) - \psi n t_0, \quad (4.31)$$

Levando a

$$D(t) = A(t_0) - \psi n t_0 + \psi n t, \quad (4.32)$$

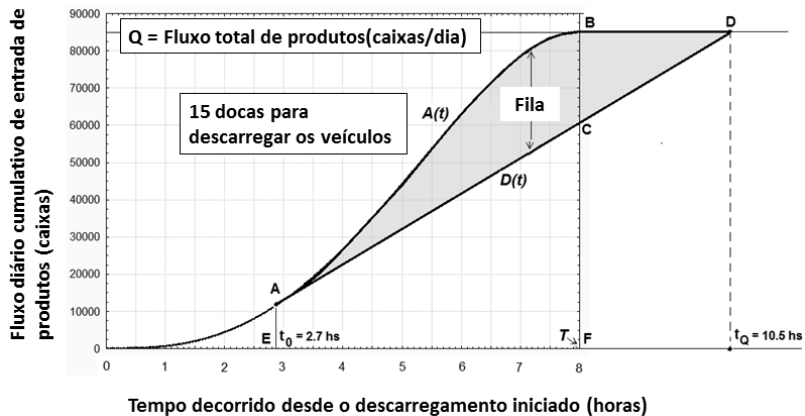
sendo que o valor de  $A(t_0)$  é calculado por meio da expressão (4.56), com  $t = t_0$ .

Na Figura 4.5 observa-se que o processo de atendimento dos veículos abastecedores termina no instante  $t = T$ , quando o último caminhão começa a ser descarregado. Mas, na maioria dos casos, não é isso que ocorre. De fato, seja  $t_Q$  o momento em que  $D(t)$  se iguala ao valor de  $G$ , ou seja, o momento em que a oferta de serviço  $D(t)$  atende plenamente a demanda diária  $G$ . Então o valor de  $t_Q$  é calculado através da expressão (4.59), fazendo-se  $D(t) = G$ :

$$t_Q = \frac{[G - A(t_0) + \psi n t_0]}{\psi n} \quad (4.33)$$

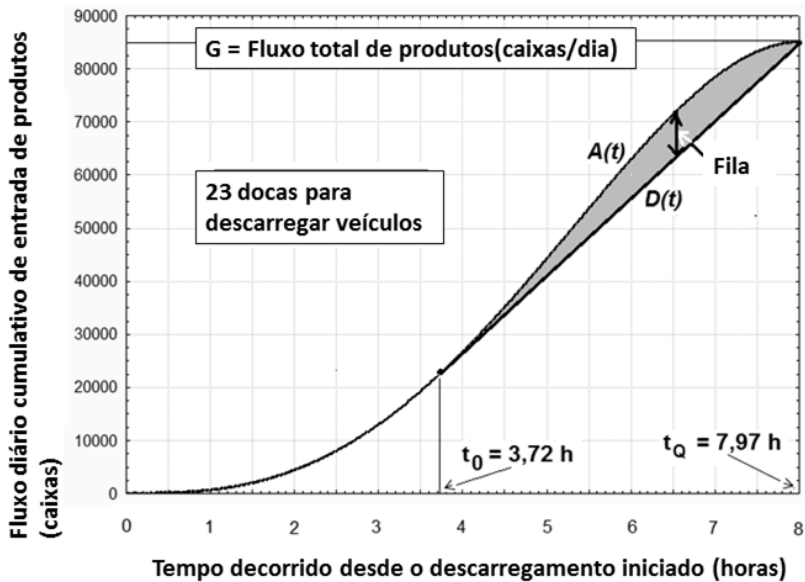
Para  $G = 85.000$  caixas,  $n = 15$  e  $\psi = 642$  caixas descarregadas por hora, a Figura 4.8 mostra o resultado da variação de  $D(t)$ , que atinge o limite  $D(t) = G$  no instante  $t_Q = 10,5 h$ , bem acima de  $t = T$ . Por outro lado, com 23 posições em paralelo na doca, a Figura 4.9 mostra que  $t_Q = 7,97 h$ , praticamente coincidente com  $T$ . Figura 4.11, por sua vez, com 27 posições de descarga, mostra a situação em que ocorre fila num período de tempo mais curto, limitado por  $t_0$  e  $t_Z$ . Finalmente, com  $n = 30$  posições, a Figura 4.12 indica  $t_Q = 7,13 h$ , mostrando que não ocorrem filas, uma vez que há capacidade de descarregamento em excesso. Entre os instantes  $t_Q$  e  $T$  ainda chegam alguns veículos nesse último caso, e há portas sobrando que providenciam a descarga desses veículos.

Figura 4.8 - Variação da fila para situação com tempo de descarga maior do que T



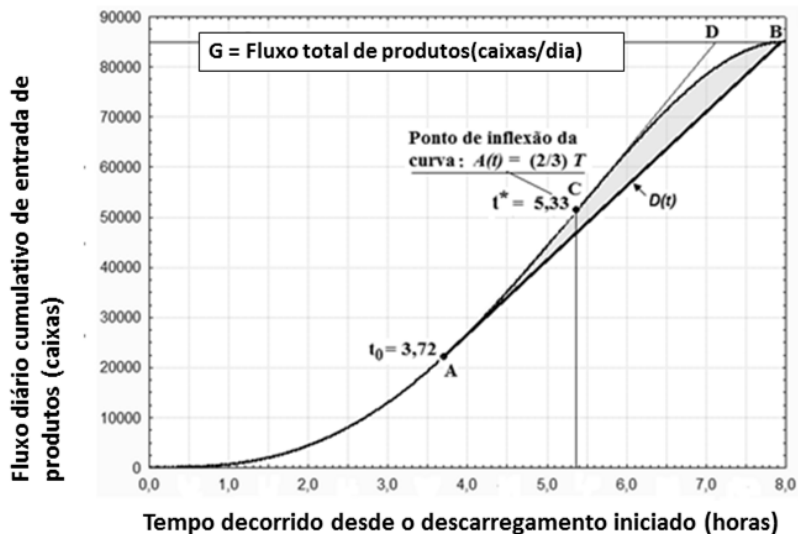
Fonte: o autor

Figura 4.9 - Variação da fila para situação com tempo de descarga igual a T



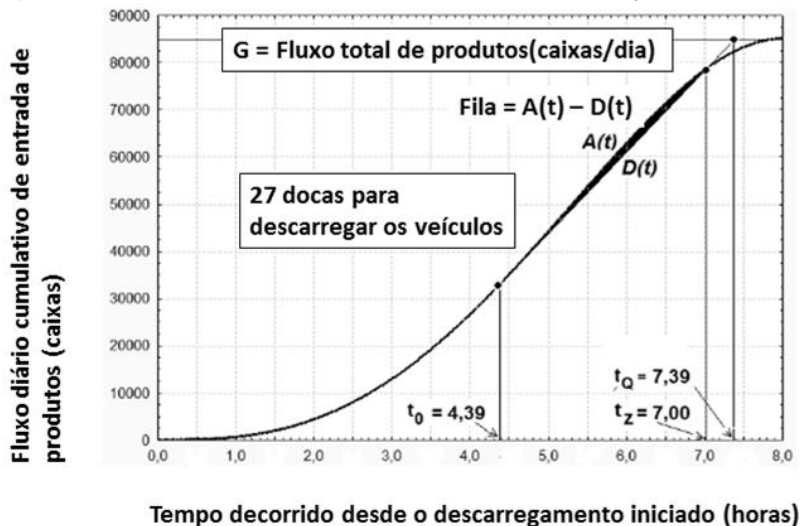
Fonte: o autor

Figura 4.10 - Tangente à curva  $A(t)$  quando  $t_0 \leq T$  e  $t_0 < t^*$



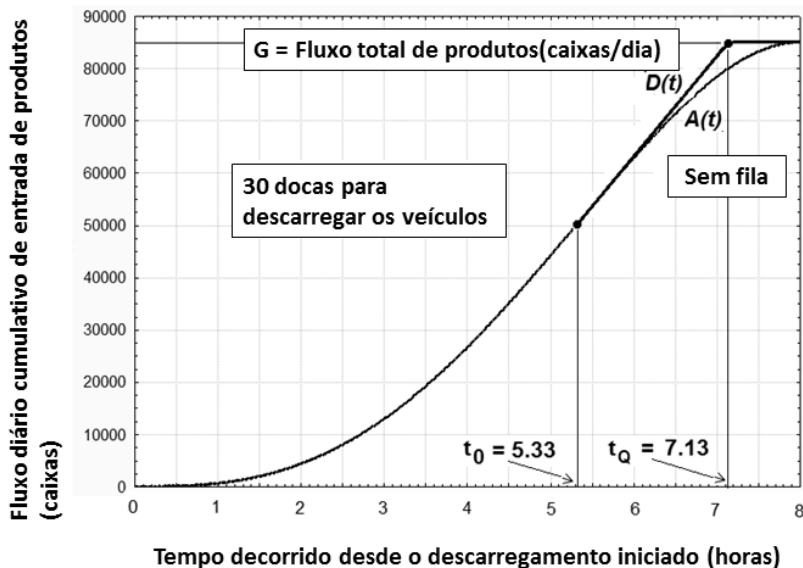
Fonte: O autor

Figura 4.11 - Fila ocorrendo em intervalo restrito entre  $t_0$  e  $t_z$



Fonte: O autor

Figura 4.12 - Situação em que não há formação de fila



Fonte: O autor

### 4.5.3 Extensão da fila

Teoricamente pode-se considerar que, para situações de fila não estacionárias deste tipo, a operação do terminal poderia se realizar com qualquer valor de  $n$  igual ou maior do que a unidade. Ocorre que o processo de descarregar as 85.000 caixas de nosso exemplo, levaria cerca de 5 dias e meio, com filas enormes de caminhões e tempos de espera absurdos. O correto será estabelecer um tempo máximo de operação diária da doca, e dimensionar o número de portas de forma que o tempo diário de operação do terminal não ultrapasse um determinado valor.

Por outro lado, se aumentar muito o número de portas na doca, pode-se chegar a uma situação de excesso de oferta, com poucas filas, com funcionários e facilidades (espaços no terminal, equipamentos, etc.) ociosos em boa parte do tempo. Dessa forma, o objetivo da análise é determinar a alocação de portas na doca que equilibre os custos de operação do terminal, com os custos operacionais dos transportadores. A análise da extensão da fila gerada em cada alternativa possibilita que se faça essa comparação de custos.

Para analisar a extensão da fila formada pelos caminhões abastecedores, admi-ti-se três casos, indicados pelas Figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11.

**Caso I:  $t_Q > T$**  (Figura 4.8)

A extensão  $Q(t)$  da fila varia entre os instantes  $t_0$  e  $t_Q$ , conforme mostrado na Figura 4.8, sendo que para  $0 \leq t \leq t_0$ , a fila é nula. Tem-se então os seguintes resultados:

$$(a) \quad 0 \leq t \leq t_0, \quad Q(t) = 0;$$

$$(b) \quad t_0 \leq t \leq T \quad Q(t) = A(t) - D(t) = G - f \left[ \left( \frac{1}{4} \right) (T - t)^4 - \left( \frac{2}{3} \right) T (T - t)^3 + \left( \frac{1}{2} \right) T^2 (T - t)^2 - [A(t_0) - \psi n t_0 + \psi n t] \right] \quad (4.34)$$

expressão obtida pela diferença entre as expressões (4.29) e (4.32).

$$(c) \quad T < t \leq t_Q$$

$$Q(t) = G - [A(t_0) - \psi n t_0 + \psi n t] \quad (4.35)$$

É de interesse para a análise três parâmetros: a fila média considerando todo o tempo de operação de descarga, a fila média considerando apenas a fase de congestionamento, bem como o valor máximo da fila. Posteriormente será analisado os tempos de permanência na fila.

A) Fila média considerando todo o tempo de operação de descarga, calculada para o intervalo  $0 \leq t \leq t_Q$ :

$$F_{med}^{(A)} = \frac{1}{t_Q} \int_{t_0}^{t_Q} [\emptyset - D(t)] dt, \quad (4.36)$$

onde

$$\emptyset = A(t) \quad \text{para} \quad t_0 \leq t \leq T \quad \text{e} \quad (4.37)$$

$$\emptyset = G \quad \text{para} \quad T < t \leq t_Q \quad (4.38)$$

B) Fila média considerando apenas a fase de congestionamento, que ocorre no intervalo  $t_0 \leq t \leq t_Q$ :

$$F_{med}^{(B)} = \frac{1}{(t_Q - t_0)} \int_{t_0}^{t_Q} [\emptyset - D(t)] dt, \quad (4.39)$$

onde  $\emptyset$  é dado por (4.37) e (4.38).

C) Valor máximo esperado da fila, dado por:

$$F_{max} = \max_{t_0 \leq x \leq t_Q} [\emptyset - D(t)]. \quad (4.40)$$

**Caso II:  $t_0 \leq T$  e  $t_0 < t^*$  (Figura 4.10)**

A curva  $A(t)$  sofre uma inflexão no ponto  $t^* = (\frac{2}{3}) \times T$ , onde a derivada de  $A(t)$ , que é  $\lambda(t)$ , atinge seu ponto máximo. Se  $t_0 < t^*$ , a tangente à curva  $A(t)$  em  $t_0$ , representado pelo segmento  $AB$  na Figura 4.10, toca na curva  $A(t)$  no ponto  $A$ , representada pela diferença  $A(t) - D(t)$ . Quando  $t_0 \geq t^*$ , ocorre o Caso III, que será analisado posteriormente, a tangente à curva  $A(t)$  é o segmento  $AD$ , que se desenvolve acima da curva  $A(t)$ , não gerando então a fila.

Na Figura 4.11 foi representada uma situação típica do Caso II, representada pela configuração de  $n = 27$  portas. Para essa configuração tem-se  $t_0 = 4,39$ , atendendo, portanto à classe  $t_0 < t^*$ . Para este caso torna-se necessário determinar o ponto  $t_Z$  em que a reta  $D(t)$  corta a curva  $A(t)$ . Para isso utiliza-se o método de busca da seção áurea, já usado para determinação de  $t_0$ . Só que agora a função objetivo é dada por

$$\min_{t^* \leq t \leq T} \text{Abs}[A(t) - D(t)] \rightarrow t_Z. \quad (4.41)$$

A *procedure* para determinar  $t_Z$  é denominada *busca\_tZ* no programa em Pascal desenvolvido para o problema.

A extensão  $Q(t)$  da fila varia entre os instantes  $t_0$  e  $t_Z$ , conforme mostrado na Figura 4.11, sendo que para  $0 \leq t \leq t_0$  e para  $t \geq t_Z$  a fila é nula. Temos então os seguintes resultados:

(d) Para  $0 \leq t \leq t_0$  e  $t \geq t_Z$ ,  $Q(t) = 0$ ;

(e) Para  $t_0 < t < t_Z$

$$Q(t) = A(t) - D(t) = G - f \left[ \left( \frac{1}{4} \right) (T - t)^4 - \left( \frac{2}{3} \right) T (T - t)^3 + \left( \frac{1}{2} \right) T^2 (T - t)^2 - [A(t_0) - \psi n t_0 + \psi n t] \right], \quad (4.42)$$

expressão obtida pela diferença entre as expressões (4.29) e (4.32).

A) Fila média considerando todo o tempo de operação de descarga, calculada para o intervalo  $0 \leq t \leq t_0$ :

$$F_{med}^{(A)} = \frac{1}{t_0} \int_{t_0}^{t_Z} [A(t) - D(t)] dt, \quad (4.43)$$

B) Fila média considerando apenas a fase de congestionamento, que ocorre no intervalo  $t_0 \leq t \leq t_Z$ :

$$F_{med}^{(A)} = \frac{1}{(t_Z - t_0)} \int_{t_0}^{t_Z} [A(t) - D(t)] dt, \quad (4.44)$$

C) Valor máximo esperado da fila, dado por:

$$F_{max} = \max_{t_0 \leq x \leq t_z} [A(t) - D(t)]. \quad (4.45)$$

**Caso III:**  $t_Q \leq T$  e  $t_0 \geq t^*$  (Figura 4.12)

Para este caso, a reta  $D(t)$  tangencia superiormente a curva  $A(t)$  e, como consequência a fila média e máxima esperadas são nulas.

#### 4.5.4 Tempo de permanência na fila

O artigo de Little e Graves (2008) mostra a validade da relação

$$Q = \lambda \times W, \quad (4.46)$$

onde  $Q$  é o número médio de elementos na fila,  $W$  é o tempo médio de espera de um elemento na fila, e  $\lambda$  é a taxa média de chegadas por unidade de tempo. A expressão (4.46) muito utilizada na prática, recebeu a denominação de “lei de Little”, em razão de seu caráter quase universal. A relação (4.46) é notadamente simples e geral. Para sua aplicação é necessário que o processo seja estacionário, mas há diversos casos de processos não estacionários, como o desta aplicação, em que ela também é aplicável.

A expressão (4.46) é utilizada neste trabalho para estimar o tempo médio de espera na fila, dado por  $W = Q/\lambda$ . Na Seção 4.4.3, foram mostrados como calcular a fila média, para os três casos descritos naquela seção. Precisamos agora calcular os valores de  $\lambda$  médio para os três casos mencionados.

**Caso I:** para este caso, a fila se forma no intervalo entre  $t_0$ , até o ponto  $t_Q$ . O número de veículos atendidos no intervalo  $t_0 \leq t \leq t_Q$  é dado por

$$N_V = \int_{t_0}^T A(t) dt, \quad (4.47)$$

Lembrando que chega zero veículo no intervalo  $T < t \leq t_Q$ , daí a razão de a integral se fechar em T. Tem-se então o valor de  $\lambda$  médio para este caso:

$$\bar{\lambda}^{(I)} = N_V / (t_Q - t_0), \quad (4.48)$$

levando à

$$\bar{W}^{(I)} = Q^{(I)} / \lambda^{(I)} \quad (4.49)$$

**Caso II:** para este caso, a fila se forma no intervalo  $t_0 \leq t \leq t_z$ , e portanto

$$N_V = \int_{t_0}^{t_z} A(t) dt, \quad (4.50)$$

Levando à

$$\bar{\lambda}^{(II)} = N_V / (t_z - t_0) \quad \text{e} \quad \bar{W}^{(II)} = Q^{(II)} / \lambda^{(II)}. \quad (4.51)$$

Finalmente, no **caso III**, a fila média e máxima é nula, e consequentemente o tempo médio de espera.

### 4.5.5 Variação aleatória da extensão da fila

Se dividirmos a janela de tempo  $0 \leq t \leq T$  em intervalos infinitesimais  $dt$ , em cada um deles pode ser considerado as chegadas como obedecendo a uma distribuição de Poisson, com média  $\lambda(t)$  (Newell, 1961, 1978). Por ser uma distribuição de Poisson, a variância é também igual à  $\lambda(t)$ . Por outro lado, o tempo de descarga de um veículo é regido por uma distribuição log-normal. A taxa de atendimento vai se processando num ritmo igual à  $n\psi$ , com variância igual a  $CV \times n\psi$  (vide seção 4.2).

A variância da diferença entre o processo de chegadas e o processo de atendimento é  $(A[t])$  e de descarga dos caminhões  $(D[t])$ , vão se acumulando ao logo do tempo  $t$ . Assim, a variância da fila, que é gerada de forma acumulada ao longo do tempo, é dada por (Newell, 1961).

$$varQ(t) \cong t [\lambda(t) + CV \times n\psi], \quad (4.52)$$

com o desvio padrão

$$\sigma_Q(t) = \{t[\lambda(t) + CV \times n\psi]\}^{1/2} \quad (4.53)$$

Uma vez que o processo de formação de filas é cumulativo ao longo do tempo, o que é mostrado pela expressão (4.52), e o número de etapas de evolução da fila são grandes, o teorema do limite central indica que a distribuição dos elementos na fila é aproximadamente normal (Newell, 1971). Assim, sendo  $\bar{Q}(t)$  o valor esperado da fila no instante  $t$  e adotando-se um nível de confiança estatístico de 95%, o limite superior da fila no instante  $t$  é dado por,

$$Q_{sup}^{(95\%)}(t) = \bar{Q}(t) + 1,96 \sigma_Q(t) \quad (4.54)$$



Outro elemento importante na análise da fila é o valor máximo observado da fila, já analisado na Seção 4.4.3.

## 4.6 APLICAÇÃO

### 4.6.1 Distribuição do tempo de descarga dos veículos

Trata-se de uma empresa supermercadista, que opera um terminal do tipo cross-docking, movimentando nessa instalação 85.000 caixas equivalentes por dia, com volume unitário de 0,0216 m<sup>2</sup> e peso unitário de 13,8 kg, num total aproximado de 1.173 toneladas por dia.

A taxa de chegadas dos caminhões de abastecimento já foi analisada na Seção 4.3. Trata-se agora do processo de atendimento (descarga). Três tipos de caminhões são considerados neste caso, com capacidade de carga e tempos de descarga apresentados na Tabela 4.2. Admiti-se que os tempos de descarga sejam regidos por distribuição log-normal, com os valores médios indicados na Tabela 4.2.

Na primeira fase da simulação, foi considerado o tempo de atendimento médio mostrado na Tabela 4.2, ou seja,  $\bar{S} = 43,8$  minutos, e desvio padrão igual à  $\sigma_S = 12,8$  minutos, com  $S$  regido por uma distribuição log-normal. De fato, o modelo estocástico simplificado descrito nas seções anteriores não permite desdobramentos por tipo de veículo, e como se deseja comparar os resultados dos dois enfoques, admiti-se inicialmente um tipo médio equivalente de veículo.

Seja  $S$  a variável aleatória a representar por uma distribuição log-normal, com média  $\bar{S}$  e desvio padrão  $\sigma_S$ . A função densidade de probabilidade  $f(S)$  é dada por

$$f(S) = \frac{1}{S v \sqrt{2\pi}} \exp \left[ \frac{-(\ln S - m)^2}{2v^2} \right], \quad (4.55)$$

Onde  $m$  e  $v$  são dois parâmetros auxiliares dados por:

$$m = \ln \left( \frac{\bar{S}^2}{\sqrt{\sigma_S^2 + \bar{S}^2}} \right) \quad e \quad v = \sqrt{\ln \left( \frac{\sigma_S^2}{\bar{S}^2} + 1 \right)} \quad (4.56)$$

### 4.6.2 Média e desvio padrão da taxa de descarga

A taxa de descarga numa porta qualquer da doca é o inverso do tempo de descarga, a menos de mudanças de unidades. Uma amostra simulada de 500 valores de  $S$  foi gerada e, a partir dessa amostra, foram

gerados 500 valores da taxa de descarga (figura 4.13), calculados por meio de:

$$\bar{\psi} = \frac{u \cdot 60}{\bar{S}}, \quad (4.57)$$

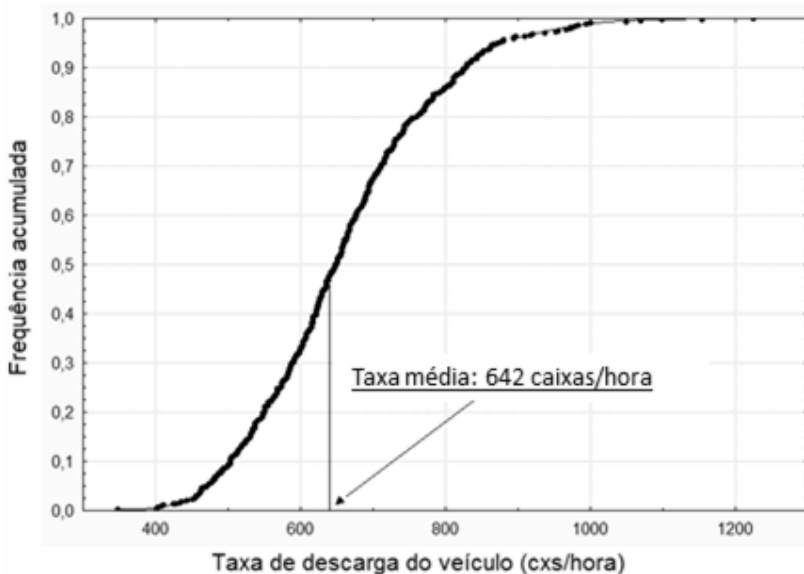
com  $\bar{S}$  expresso em minutos,  $\bar{\psi}$  expresso em caixas por hora, sendo  $u$  o carregamento médio de um caminhão (Tabela 4.2). Entrando com  $\bar{S} = 43,3$  minutos e  $u = 463,8$  caixas por veículo em (4.57), obtém-se  $\bar{\psi} = 642$  caixas por porta de descarga e por hora.

A partir dos 500 valores de  $\psi$  gerados, determinou-se o coeficiente de variação da amostra  $CV = 0,301$ , que é a relação entre o desvio padrão e a média. Dessa forma, determinou-se o desvio padrão e a variância de  $\psi$ :

$$\sigma_{\psi} = 0,301 \cdot 635,34 = 193,24 \text{ caixas} \quad e \quad (4.58)$$

$$\text{Var}(\psi) = 36.572,74 \quad (4.59)$$

Figura 4.13 - Distribuição acumulada da taxa de descarga dos veículos



Fonte: o autor

### 4.6.3 Faixa de variação do número de portas ( $n$ ) para recepção de veículos

Para valores de  $n$  muito baixos, o tempo de descarga é muito elevado, ultrapassando, de muito, o período de trabalho diário do terminal. Por isso, foi limitado a análise de  $n$  a um valor mínimo, neste caso estipulado em 10 portas.

Para determinar o extremo superior da análise de  $n$ , que foi denominado de  $n_Q$  no programa *Newell\_1* (Apêndice A) desenvolvido em Pascal, vale lembrar que a fila média e seus derivados não é mais positiva quando  $t_0 \geq \left(\frac{2}{3}\right)T$ , pois, nessas condições, a reta que representa  $D(t)$  tangencia superiormente a curva  $A(t)$ . Desse ponto em diante torna-se antieconômico acrescentar mais portas ao sistema, visto que o benefício é nulo.

Foi então desenvolvida a procedure *Busca\_nQ* (Apêndice A), que determina  $n_Q$  tal que

$$\text{Abs} \left[ t_0 - \frac{2}{3}T \right] < \varepsilon, \quad (4.60)$$

onde  $\varepsilon = 0,001$  é o nível de precisão para a busca. Como, para esse valor calculado a fila já é nula, foi subtraída uma unidade, ou seja,  $n_Q \leftarrow n_Q - 1$ .

Para esta aplicação obteve-se a seguinte faixa de variação de  $n$ :

$$10 \leq n \leq 29 \quad (4.61)$$

### 4.6.4 Medida de ocupação da doca de descarga

Na impossibilidade de determinar com maior precisão os custos ligados ao uso da doca, utiliza-se uma variável proxy com esse objetivo. O custo de utilização da doca, que é denominada  $DH$ , é proporcional ao produto de três elementos:

- número  $n$  de portas utilizadas, em paralelo, para a descarga;
- tempo de utilização diária da doca (horas);
- área reservada para descarga, por porta.

Sendo a área reservada em cada porta igual em cada configuração, pode-se simplificar a expressão da seguinte forma:

$$DH = n \times \tau, \quad (4.62)$$

onde  $\tau$  é o tempo de utilização diária da doca (horas).

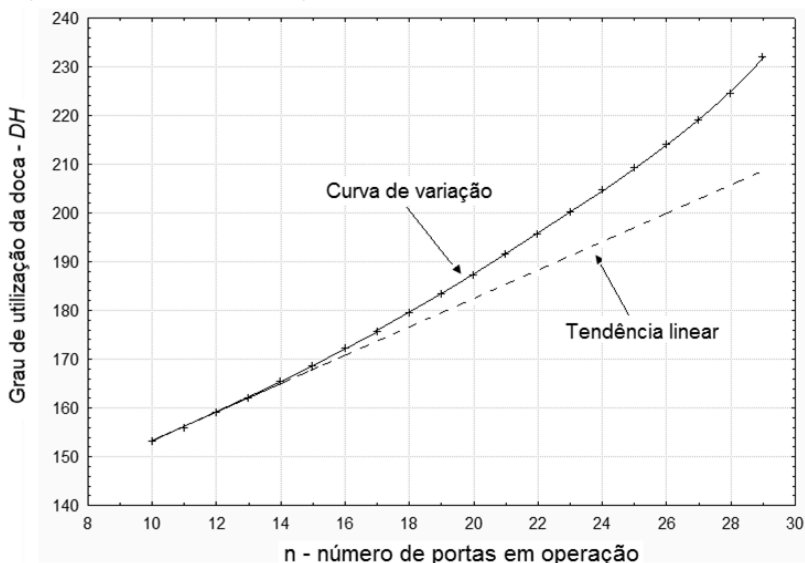
O tempo  $\tau$  é igual à  $t_Q$  mais o tempo médio de descarga  $\bar{S}$ , ou seja,

$$\tau = t_Q + \bar{S}, \quad (4.63)$$

pois, no instante  $t_Q$  o último caminhão da fila começa a ser descarregado, e esse processo dura um tempo igual a  $\bar{S}$ . Por outro lado, se  $t_Q < T$ , então  $t_Q = T$ , uma vez que o processo de descarga permanece aberto pelo menos durante um tempo  $T$ .

Na Figura 4.14 é mostrada a curva de DH em função de  $n$ . Observa-se que a variação de DH mostra-se não linear. Para  $n = 29$ , o grau de utilização da doca é 11,5% maior do que a tendência linear de evolução. Ou seja, para valores mais elevados de  $n$  a fila gerada tende a ser menor, mas a utilização da doca tende a crescer exponencialmente. Por essa razão, a variável  $DH$  foi utilizada como um elemento importante na definição do valor de  $n$  a ser adotado.

Figura 4.14 - Variação do grau de utilização da doca em função de  $n$



Fonte: o autor

#### 4.6.5 Tempo médio de permanência no sistema

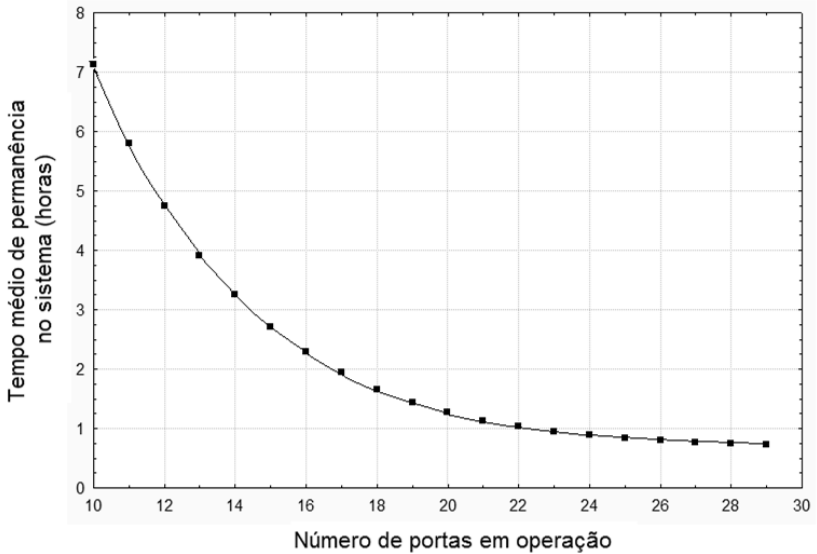
Seja  $\gamma$  a fração dos veículos que, ao chegar ao terminal, não enfrentam fila. Seja, por outro lado,  $\overline{WT}_{fila}$  o tempo médio na fila,

calculado dentro do intervalo de tempo quando ocorre congestionamento (isto é, fila). Quando ocorre fila, o tempo médio no sistema é igual à soma do tempo na fila e o tempo de descarga. Inversamente, quando não há fila, o tempo no sistema é igual ao tempo de descarga. Ou seja, o tempo médio no sistema,  $\overline{WT}_{syst}$ , é dado por:

$$\overline{WT}_{syst} = (1 - \gamma) (\overline{WT}_{fila} + \bar{S}) + \gamma \bar{S} \quad (4.64)$$

Na Figura 4.15 é mostrada a variação do tempo médio no sistema em função de  $n$ . Nota-se que  $\overline{WT}_{syst}$  se torna muito elevado quando é reduzido apreciavelmente o número de portas. Para  $n = 10$ , por exemplo, o tempo médio no sistema é de cerca de 7 horas. Como esse valor médio envolve as situações em que os veículos não enfrentam fila, e como as variações aleatórias no tempo são expressivas, a variável  $\overline{WT}_{syst}$  deve ser utilizada mais com a finalidade de comparação entre cenários, mas não deve ser utilizada para dimensionar a doca. No entanto, é um elemento que aparece com frequência em aplicações de filas, e por isso foi também estimado neste trabalho.

Figura 4.15 - Variação do tempo médio no sistema em função de  $n$



Fonte: o autor

#### 4.7 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MODELO TEÓRICO

Para aplicação do modelo foi desenvolvido um programa em Pascal, em plataforma Delphi XE7. A Tabela 4.3 mostra os resultados obtidos com a aplicação do modelo, para  $n$  variando de 10 a 29. Os resultados são referenciados à unidade “caixa”. Tais valores são então divididos por  $u = 463,8$  caixas por veículo para transformá-los em “veículos”.

Tabela 4.3 - Resultados da aplicação do modelo teórico

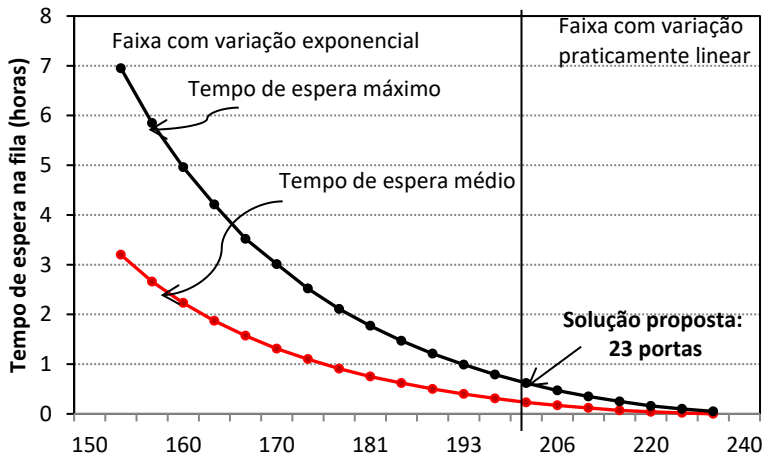
| Número de posições | Fila média (veículos) | Tempo de espera médio (h) | Tempo médio no sistema (h) | Tempo total médio de utilização das docas (h) | Taxa de ocupação média das docas (%) |
|--------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------------|---|--------------------------------------|
| 10                 | 39.9                  | 3.20                      | 3.75                       | 15.43   | 86.7                                 |
| 11                 | 36.0                  | 2.66                      | 3.22                       | 14.29   | 85.1                                 |
| 12                 | 32.4                  | 2.23                      | 2.79                       | 13.35   | 83.5                                 |
| 13                 | 28.9                  | 1.87                      | 2.43                       | 12.56   | 81.9                                 |
| 14                 | 25.7                  | 1.57                      | 2.14                       | 11.89   | 80.3                                 |
| 15                 | 22.7                  | 1.31                      | 1.89                       | 11.32   | 78.8                                 |
| 16                 | 19.9                  | 1.10                      | 1.69                       | 10.83   | 77.2                                 |
| 17                 | 17.2                  | 0.91                      | 1.51                       | 10.41   | 75.6                                 |
| 18                 | 14.8                  | 0.75                      | 1.36                       | 10.04   | 74.1                                 |
| 19                 | 12.6                  | 0.62                      | 1.24                       | 9.71  | 72.5                                 |
| 20                 | 10.5                  | 0.50                      | 1.13                       | 9.42  | 71.0                                 |
| 21                 | 8.6                   | 0.40                      | 1.04                       | 9.17  | 69.5                                 |
| 22                 | 6.9                   | 0.31                      | 0.97                       | 8.94  | 68.0                                 |
| 23                 | 5.4                   | 0.23                      | 0.90                       | 8.74  | 66.5                                 |
| 24                 | 3.9                   | 0.17                      | 0.85                       | 8.73  | 65.1                                 |
| 25                 | 2.7                   | 0.12                      | 0.81                       | 8.73  | 63.6                                 |
| 26                 | 1.7                   | 0.07                      | 0.78                       | 8.73  | 62.2                                 |
| 27                 | 0.9                   | 0.04                      | 0.75                       | 8.73  | 60.8                                 |
| 28                 | 0.4                   | 0.02                      | 0.74                       | 8.73  | 59.4                                 |
| 29                 | 0.1                   | 0.00                      | 0.73                       | 8.73  | 58.0                                 |

Fonte: O autor

Na Figura 4.16 é mostrada a variação tempo de espera na fila (médio e máximo) em função do grau de utilização da doca (DH) e de  $n$ . Observa-se que ocorrem duas faixas características de comportamento do tempo de espera na fila: na faixa  $n \geq 23$  (e  $DH = 200$ ) a variação do tempo de espera é praticamente linear, enquanto para  $n < 23$  a variação é nitidamente exponencial. Isso significa que  $n = 23$  portas é uma solução potencialmente adequada. De fato, na Tabela 4.3 pode-se ver que

a fila média é de 5,4 veículos e tempo de espera médio de 0,23 horas, ou seja, 13,8 minutos.

Figura 4.16 - Tempo de espera na fila em função do grau de utilização da doca



Fonte: o autor

Mostramos que um modelo aproximado e não estacionário da fila, baseado numa representação contínua da variável central, pode fornecer resultados suficientes para uma análise preliminar do problema. Através de um modelo de simulação, a análise pode ser aprofundada, levando a valores mais precisos dos resultados.

#### 4.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada duas modelagens. A primeira formulação, utilizando teoria das filas clássica (Notação de Kendall, 1961), considerando as chegadas como um processo de Poisson em que a distribuição é uma exponencial negativa. Um algoritmo simple na linguagem Delphi foi desenvolvido. Porém, modelos clássicos como esse não se aplicam a terminais de cross-docking, pois as chegadas não se mantêm constantes ao longo do tempo, e sim variam a todo instante. Na segunda formulação foi aplicado um modelo, que chamamos de modelo teórico, que independe da estacionaridade das filas. O modelo aplicado foi desenvolvido por Newell (1968) que considera as chegadas como sendo não estacionárias. O caso estudado, tanto na primeira formulação

quanto na segunda formulação é derivado de vários estudos no comportamento dos caminhões em terminais de carga/ descarga. Devido a complexidade das operações que envolvem um terminal de cross-docking, optou-se por se desenvolver primeiramente um modelo de filas não estacionárias para os caminhões abastecedores do terminal. O modelo completo foi caracterizado como um problema que busca o número de portas ideal para um terminal de cross-docking para que os caminhões alimentadores não permaneçam muito tempo no sistema. Para isso algumas variáveis são levadas em consideração, como, por exemplo, curva de chegada, duração do processo estocástico sem formação de filas, processo de descarregamento, extensão da fila, tempo médio de permanência na fila e no sistema. Todas as variáveis foram modeladas utilizando um algoritmo de linguagem de programação em Pascal. Essa modelagem não permitiu detalhamento das chegadas dos caminhões por tipo, e, portanto utilizaram-se as médias que estão descritas na tabela 4.2. Para a obtenção de uma solução, o número de portas mínima e máxima foi determinado, através de uma procedure Busca\_nQ. Graficamente chegou-se a uma possível solução. No próximo capítulo será apresentada uma modelagem utilizando o software de simulação Arena, visando avaliar e validar o modelo teórico.



## 5. SIMULAÇÃO

A simulação é utilizada quando não é possível fazer experimentações no sistema real (devido, por exemplo, ao longo tempo necessário para realizar o experimento, ou ao alto custo do experimento ou, ainda, à dificuldade de tratar fisicamente o experimento). Esta inclusive é a grande vantagem da simulação, permitir estudos de sistemas reais sem modificá-los, com velocidade e baixo custo quando comparados às alterações físicas e organizacionais reais necessárias para estudar as mesmas alternativas de cenários futuros. Dessa forma, mudanças podem ser tentadas e estudadas de forma sistemática sem interferir no sistema real (Baker, 1982).

Os modelos de simulação também são ferramentas úteis para auxiliar na tomada de decisões a respeito de investimentos em novas tecnologias, expansão da capacidade de produção, gerenciamento de materiais, recursos humanos e integração com os fornecedores, ou seja, através da simulação é possível responder a questões do tipo “o que aconteceria se?” (Freitas Filho, 2008). Freitas Filho (2008) destaca ainda que a simulação não substitui o trabalho de interpretação humana, mas fornece resultados para análises mais elaboradas a respeito da dinâmica do sistema, permitindo desta maneira uma interpretação mais profunda e abrangente do sistema estudado.

### 5.1 SIMULAÇÃO UTILIZANDO O SOFTWARE ARENA

Vimos que os modelos clássicos de filas possuem uma característica estacionária, e esses modelos possuem uma restrição de tempo, não caracterizando um problema contínuo. Portanto, modelos clássicos de fila desse tipo geralmente não se aplicam ao dimensionamento de terminais de cross-docking, uma vez que, na maioria dos casos, o processo de formação da fila não atinge um regime estacionário, que é um requisito básico para aplicação desses modelos.

O objetivo da segunda parte deste estudo será utilizar um pacote de simulação para validar o modelo teórico.

Usando a simulação será possível verificar: (i) a que nível de precisão o modelo teórico se aproxima dos modelos reais; (ii) caso a questão (i) não seja verificada, quais ajustes é preciso fazer no modelo teórico para que ele se ajuste aos problemas reais; (iii) a simulação utiliza ferramentas para que o problema seja mais detalhado, o que não é permitido no modelo teórico.

Portanto, através da simulação soluções intuitivas para o problema do dia a dia da empresa, no caso a formação de filas, podem ser modeladas e testadas resultando em avaliações quantitativas; permite a experimentação com as interações entre componentes de um sistema complexo e pode prever resultados. Além disso, alterações de processos existentes podem ser testadas sem que se tenha que alterar a rotina do sistema real, o que implicaria em desperdício de tempo e dinheiro. Permite ainda, explorar novos procedimentos operacionais, muito importantes para uma rede de cross-docking.

O pacote escolhido para o processo de simulação é o processo de modelagem usando o *Simulador Arena*, o modelo é estruturado e codificado com base na linguagem de simulação SIMAN por meio da seleção dos módulos que contêm as características dos processos a serem modelados. Essa técnica de simulação pode ser considerada como uma situação onde elementos estáticos, formando um ambiente bem definido com suas regras e propriedades, interagem com elementos dinâmicos, que fluem dentro desse ambiente, com isso o usuário pode extrair módulos, posicioná-los no modelo e parametrizá-los de acordo com as características observadas no sistema real (Sakurada et al, 2009). Dentre diversas possibilidades, o *Software Arena* pode ser aplicado na resolução de problemas com influência de gargalos, no nosso caso, formação de filas em centros de operações que operam com a técnica de cross-docking. Ambientes esses que precisam ser cautelosamente analisados, pois os impactos de uma boa gestão no controle das filas influencia toda rede logística.

De forma complementar, pode-se afirmar que o *Software Arena* utiliza um conjunto de módulos denominados *templates* que reproduz graficamente o comportamento dos eventos discretos em um determinado fluxo (Kelton et al, 2004).

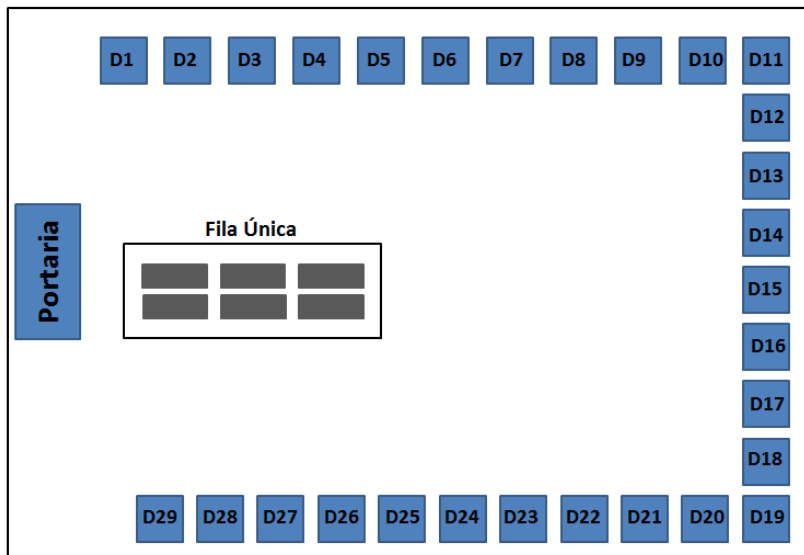
## 5.2 MODELAGEM

O caso estudado será agora modelado utilizando o software Arena a fim de validar o modelo teórico, cujo nível de precisão deve ser verificado.

Law (2007) sugere que se faça a coleta de informações sobre o layout e o nível de detalhamento do sistema a fim de facilitar a construção do modelo conceitual, e que se realize uma coleta de dados para fins de validação. Além disto, o autor ainda propõe que se comece com um modelo simples que facilite a execução e evite possíveis erros.

O layout ou arranjo físico de uma empresa representa um esboço da composição visual ou disposição física do espaço de trabalho nele envolvido, a Figura 5.1 representa a representação esquemática do sistema estudado.

Figura 5.1- Representação esquemática do CD

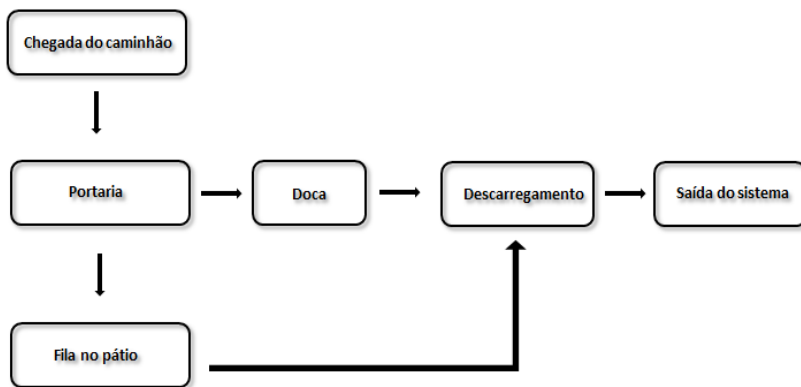


Fonte: O autor

### 5.2.1 Fluxograma do Processo

A Figura 5.2 representa o fluxograma do processo de atendimento dos caminhões ao chegarem no CD.

Figura 5.2 - Fluxograma do processo de atendimento



Fonte: O autor

### 5.2.2 Modelagem computacional do Problema Estudado

#### (i) Processo de Chegada dos Caminhões

O processo de chegada dos caminhões no modelo se inicia com a criação da entidade (caminhão) que chega ao Centro de Distribuição, denominado chegada dos caminhões. Para gerar os valores das chegadas dos caminhões, de acordo com o mesmo critério utilizado no modelo teórico, foi desenvolvido um programa utilizando a linguagem de programação Pascal, onde a função que gera a curva de chegada dos caminhões da Figura 4.4 foi implementada. A cada nova replicação são gerados aleatoriamente novos valores de chegada salvos em um arquivo texto "Lambda.txt". O módulo *Create* em suas configurações permite a criação de somente uma entidade denominada "Truck", Figura 5.3. Em seguida seus tempos de chegada são lidos pelo módulo *Read Write* e seus tempos são processados um por vez.

Figura 5.3 - Configurações do módulo de chegada

The screenshot shows a 'Create' dialog box with the following configuration:

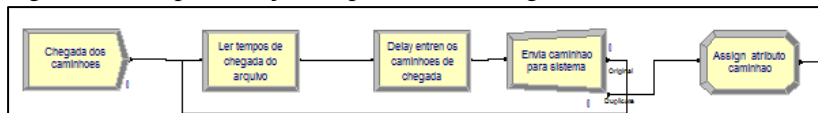
- Name:** Chegada dos caminhões
- Entity Type:** Truck
- Time Between Arrivals:**
  - Type: Constant
  - Value: 1
  - Units: Hours
- Entities per Arrival:** 1
- Max Arrivals:** 1
- First Creation:** 0.0

Buttons: OK, Cancel, Help

Fonte: O autor

Após a leitura de um dos tempos de chegada, o módulo *Delay* faz com que o tempo de simulação aguarde até que o tempo do arquivo seja alcançado. Após alcançar o tempo, o módulo *Separate* replica a entidade de chegada, retornando à original para o conector de repetição de leitura do arquivo e sua réplica é enviada para o módulo que representa a recepção do terminal de cross-docking Figura 5.4.

Figura 5.4 - Representação do processo de chegada dos caminhões

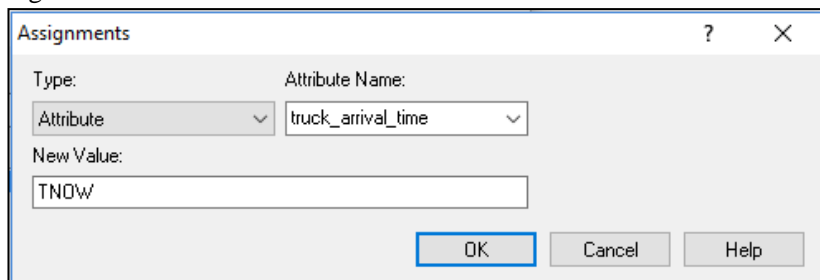


Fonte: O autor

#### (ii) Entrada na Estação Recepção

Após passagem pelo bloco *Assign* (Figura 5.4) usado para atribuir novos valores a variáveis, atributos de entidades, tipos de entidade, ou outras variáveis do sistema – neste modelo o primeiro *Assign* foi usado para criação do atributo `truck_arrival_time`, nesse atributo cada entidade que passa pelo bloco passa a conter o valor do relógio naquele momento (TNOW), conforme Figura 5.5 – a entidade “Caminhão” é então enviada para a “Entrada recepção”.

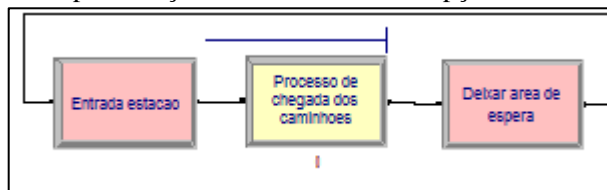
Figura 5.5 - Definindo o atributo



Fonte: O autor

A “Entrada Recepção” é um bloco do tipo *Station*, este bloco é utilizado para informar que a entidade ocupou uma estação, neste caso, admiti-se que a entidade esta dentro da estação de recepção. Posteriormente a entidade é enviada para o bloco *Process*. Quando um caminhão ocupa a recepção, outro caminhão que estiver vindo atrás deverá esperar em uma fila antes de ser atendido. Para isso devemos selecionar a ação lógica *Seize Delay Release*, desta forma o caminhão que entra reserva (*seize*) a recepção pra si, sofre o processamento, representado por um certo atraso no seu prosseguimento no fluxo (*delay*) e depois libera (*release*) a recepção para o próximo caminhão. O “Processo de Chegada dos Caminhões” possui um recurso “Porteiro” responsável pelo atendimento das entidades, o tempo de atendimento não é levado em consideração nesse modelo, portanto definimos como sendo zero. Após a passagem pelo bloco “Processo de Chegada dos Caminhões”, de acordo com a Figura 5.6, o caminhão vai para a estação “Deixar área de espera”, que seria a área de espera dos caminhões, pátio, caso as docas estejam ocupadas.

Figura 5.6 - Representação do Processo de Recepção



Fonte: O autor

Agora a entidade passa a esperar em uma área de espera enquanto alguma doca não é liberada. Assim que a doca é liberada o bloco *Assign* libera o caminhão para alguma doca.

## (iii) Entrada na Estação Docas

O módulo utilizado no modelo que tem a função de enviar a entidade para um recurso é o módulo *PickStation* Figura 5.7. Este módulo escolhe entre o grupo de estações com base na lógica de seleção definida com o módulo. O processo de seleção da estação é baseado no valor mínimo ou máximo de uma série de variáveis do sistema e expressões. Neste caso específico sempre que uma doca estiver disponível e houver caminhões na fila, o módulo *PickStation* enviará este caminhão para esta doca livre. O “Route Time” foi desconsiderado em um primeiro momento a fim de comparação com o modelo teórico.

Figura 5.7 - Módulo *PickStation*

The image shows a software configuration window titled "PickStation". At the top right, there are icons for help (?) and close (X). The window is divided into several sections:

- Name:** A dropdown menu showing "Pick Doca".
- Test Condition:** A dropdown menu showing "Minimum".
- Selection Based On:** A group box containing four checkboxes:
  - Number in Queue
  - Number of Resources Busy
  - Number En Route to Station
  - Expression
- Stations:** A list box containing eight entries: "Doca#01, Plataforma#01", "Doca#02, Plataforma#02", "Doca#03, Plataforma#03", "Doca#04, Plataforma#04", "Doca#05, Plataforma#05", "Doca#06, Plataforma#06", "Doca#07, Plataforma#07", and "Doca#08, Plataforma#08". To the right of the list are three buttons: "Add...", "Edit...", and "Delete".
- Transfer Type:** A dropdown menu showing "Route".
- Route Time:** A text input field containing "0".
- Units:** A dropdown menu showing "Hours".
- At the bottom, there are three buttons: "OK", "Cancel", and "Help".

Fonte: O autor

A Figura 5.8 representa o número de recursos criados com capacidade fixa disponíveis para os caminhões que chegam no sistema. O número de docas varia de acordo com o modelo teórico, de 10 a 29 docas. A Figura 5.9 mostra o módulo Resource que também foi utilizado no modelo para inserir falhas e estados do sistema. Alterando a capacidade que varia de 10 a 29 docas, juntamente com o módulo Failure ( Figura 5.10) – módulo do “Template Advanced Process” que coloca em “falha” as docas que não estão sendo utilizadas – faz com que o sistema opere com o número de docas escolhidas para análise.

Figura 5.8 - Número de recursos disponíveis para o descarregamento

| Resource - Basic Process |               |                |          |             |             |         |               |          |                   |
|--------------------------|---------------|----------------|----------|-------------|-------------|---------|---------------|----------|-------------------|
|                          | Name          | Type           | Capacity | Busy / Hour | Idle / Hour | Per Use | StateSet Name | Failures | Report Statistics |
| 2                        | Plataforma#01 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 3                        | Plataforma#02 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 4                        | Plataforma#03 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 5                        | Plataforma#04 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 6                        | Plataforma#05 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 7                        | Plataforma#06 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 8                        | Plataforma#07 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 9                        | Plataforma#08 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 10                       | Plataforma#09 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 11                       | Plataforma#10 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 12                       | Plataforma#11 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 13                       | Plataforma#12 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 14                       | Plataforma#13 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 15                       | Plataforma#14 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 16                       | Plataforma#15 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 17                       | Plataforma#16 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 18                       | Plataforma#17 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 19                       | Plataforma#18 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 20                       | Plataforma#19 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 21                       | Plataforma#20 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 22                       | Plataforma#21 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 23                       | Plataforma#22 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 24                       | Plataforma#23 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 25                       | Plataforma#24 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 26                       | Plataforma#25 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 27                       | Plataforma#26 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 28                       | Plataforma#27 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 29                       | Plataforma#28 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |
| 30                       | Plataforma#29 | Fixed Capacity | 1        | 0.0         | 0.0         | 0.0     |               | 1 rows   | ✓                 |

Fonte: O autor



Figura 5.9 - Módulo com a capacidade de docas funcionando

The screenshot shows a 'Resource' configuration window. It has a title bar with a question mark and a close button. The main area contains the following fields:

- Name:** A dropdown menu with 'Parking Area' selected.
- Type:** A dropdown menu with 'Fixed Capacity' selected.
- Capacity:** A dropdown menu with '23' selected.
- Costs:** Three input fields:
  - Busy / Hour:** 0.0
  - Idle / Hour:** 0.0
  - Per Use:** 0.0

Fonte: O autor

Figura 5.10 - Docas em funcionamento e em falhas

| Failure - Advanced Process |                 |      |         |               |           |                 |
|----------------------------|-----------------|------|---------|---------------|-----------|-----------------|
|                            | Name            | Type | Up Time | Up Time Units | Down Time | Down Time Units |
| 1                          | Failure Doca#11 | Time | 24      | Hours         | 0         | Hours           |
| 2                          | Failure Doca#12 | Time | 24      | Hours         | 0         | Hours           |
| 3                          | Failure Doca#13 | Time | 24      | Hours         | 0         | Hours           |
| 4                          | Failure Doca#14 | Time | 24      | Hours         | 0         | Hours           |
| 5                          | Failure Doca#15 | Time | 24      | Hours         | 0         | Hours           |
| 6                          | Failure Doca#16 | Time | 24      | Hours         | 0         | Hours           |
| 7                          | Failure Doca#17 | Time | 24      | Hours         | 0         | Hours           |
| 8                          | Failure Doca#18 | Time | 24      | Hours         | 0         | Hours           |
| 9                          | Failure Doca#19 | Time | 24      | Hours         | 0         | Hours           |
| 10                         | Failure Doca#20 | Time | 24      | Hours         | 0         | Hours           |
| 11                         | Failure Doca#21 | Time | 24      | Hours         | 0         | Hours           |
| 12                         | Failure Doca#22 | Time | 24      | Hours         | 0         | Hours           |
| 13                         | Failure Doca#23 | Time | 24      | Hours         | 0         | Hours           |
| 14                         | Failure Doca#24 | Time | 0       | Hours         | 24        | Hours           |
| 15                         | Failure Doca#25 | Time | 0       | Hours         | 24        | Hours           |
| 16                         | Failure Doca#26 | Time | 0       | Hours         | 24        | Hours           |
| 17                         | Failure Doca#27 | Time | 0       | Hours         | 24        | Hours           |
| 18                         | Failure Doca#28 | Time | 0       | Hours         | 24        | Hours           |
| 19                         | Failure Doca#29 | Time | 0       | Hours         | 24        | Hours           |

Fonte: O autor

Após a atribuição para alguma doca o caminhão começa o processo de descarregamento.

#### (iv) Processo de Descarregamento

O descarregamento dos caminhões obedece a mesma distribuição do modelo teórico. Na primeira fase da simulação, foi considerado o tempo de atendimento médio mostrado na Tabela 4.2, com tempos de descarga regidos por distribuição log-normal, com média  $\bar{S} = 43,8$  min e desvio padrão  $\sigma_S = 12,8$  min. De fato, o modelo estocástico simplificado

descrito nas seções anteriores não permite desdobramentos por tipo de veículo, e como se deseja comparar os resultados dos dois enfoques, admite-se inicialmente um tipo médio equivalente de veículo.

Após o descarregamento o caminhão é enviado para saída do sistema.

### **5.2.3 Análise do Processo de Replicação Utilizando Output Analyzer**

Quando se trabalha com simulação, inicialmente é preciso definir por quanto tempo a simulação vai rodar (um dia, uma semana, um mês ou apenas algumas horas). Normalmente, esta definição é feita de acordo com a própria natureza do sistema que está sendo modelado. Para o cálculo estatístico das variáveis de interesse, este período deve ser expurgado a fim de que não provoque uma distorção nos resultados (Banks & Norman, 1995).

O processo de análise dos resultados de simulação realizado através de um modelo computacional, lida com os dados que foram obtidos a partir dos experimentos. O principal objetivo é permitir a realização de inferências e previsões sobre o comportamento e o desempenho do modelo de simulação criado. A principal razão para uma maior atenção aos processos de análise dos resultados das simulações baseia-se no fato de, em geral, os modelos apresentarem um comportamento estocástico semelhante aos sistemas que estão imitando (Freitas Filho, 2008).

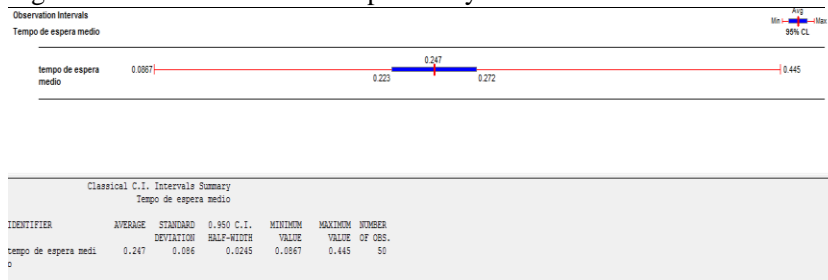
Os processos de verificação e validação do modelo são desenvolvidos considerando os resultados das execuções realizadas no modelo de simulação. Os resultados da simulação podem ser apresentados de várias formas. Harrel & Tumay (1995) comentam que existem vários tipos de relatórios de simulação, por exemplo:

- Relatórios de uma única replicação (mostram o desempenho da rodada de simulação utilizando média e variância);
- Históricos detalhados, mostrando conjuntos de dados e “plotagens” de observações ocorridas no tempo. São as chamadas estatísticas dependentes do tempo ou estatística temporal;
- Relatórios relâmpagos que são resumos estatísticos mostrando o estado do sistema em algum instante de tempo;

- Relatórios de múltiplas replicações que providenciam resultados combinados de várias rodadas de simulação, fazendo tratamentos estatísticos nos resultados com estimativas de erros, dentro de uma faixa de incerteza desejada, baseando-se em intervalo de confiança (Output Analyzer);
- Relatórios que comparam as saídas de vários cenários analisando os conjuntos de variáveis representativas dos mesmos.

As análises dos resultados também dependem do tipo da simulação adotada. A simulação pode ser identificada como sendo Terminal ou Não-Terminal. A diferença entre as duas está na possibilidade de ser definido um comprimento para a simulação. Se um sistema tem claramente definido um instante de início e um instante de término, o sistema é considerado terminal. Caso contrário, é chamado de sistema não-terminal. No nosso caso o sistema tratado é terminal. Para a simulação terminal é importante estabelecer quantas execuções (replicações) deve acontecer para que os resultados estatísticos tenham consistência (Freitas Filho, 2008). Por se tratar de um sistema terminal, a forma escolhida de análise de output foi através de múltiplas replicações, analisando os desvios, sob uma taxa de incerteza, com os resultados sendo tratados através de intervalos de confiança.

Figura 5.11 - Resultados do Output Analyzer



Fonte: O autor

Assim como no modelo teórico, foi assumido grau de confiança o valor de 95%, ou seja,  $\alpha = 5\% = 0,05$ . Consideramos 23 docas para os testes que determinam o número de replicações. Com auxílio da ferramenta *Arena® Output Analyzer* e seguindo o método aplicado por Freitas Filho (2008) obteve-se um número de 50 replicações ( Figura 5.11) que se ajustou ao problema estudado, com média geral do tempo de

espera igual a 0,247h, desvio padrão de 0,086 e semi-intervalo de confiança 0,0245. Segundo Freitas Filho (2008) é comum que se busque intervalos de confiança para os quais o valor de  $h$  seja aproximadamente, menor ou igual a 10% da média amostral. Logo  $0.247 * 0.10 = 0.0247$  praticamente igual ao valor de  $h = 0.0245$ .

A simulação trabalhou com um programa, como dito anteriormente, de chegadas aleatórias, portanto a cada nova replicação o programa gera valores de tempos de média de espera diferentes, porém muito próximos se considerar a média final do tempo médio de espera.

## 5.2.4 Validação do Modelo de Simulação

O processo de validação do sistema é uma etapa fundamental, pois é ele que determina se o modelo proposto detém precisão suficiente para representar o sistema real. Desta forma se o modelo não é uma aproximação do sistema real, todas as conclusões derivadas deste estarão susceptíveis a erros e poderão resultar em decisões incorretas. Sendo assim a validação pode e deve ser feita para todos os modelos, independentemente do sistema (Law e Kelton, 2000).

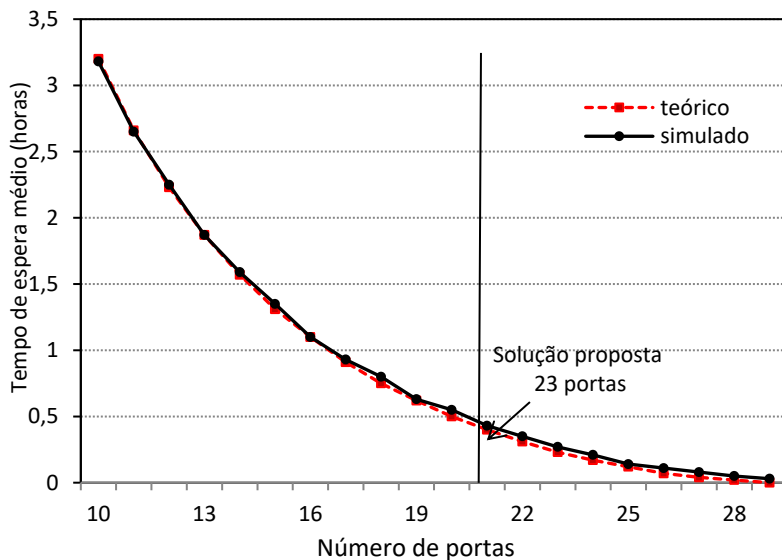
Dessa forma, antes de qualquer teste com o modelo, é necessário garantir que o mesmo foi verificado para que se possa começar a utilizar o modelo para reproduzir o sistema real, gerando os outputs que serão usados como base quantitativa para análises de decisão, sendo também necessário verificar se os resultados produzidos pelo modelo são coerentes com os resultados produzidos pelo sistema real, etapa conhecida como validação “Validação é o processo para determinar se o modelo de simulação é uma representação precisa do sistema, para objetivos particulares de estudo” (Law, 2006).

A simulação não objetiva resultados iguais, mas sim uma reprodução artificial com resultados coerentes com os resultados produzidos pelo sistema real.

O modelo foi testado e calibrado de acordo com os dados do modelo teórico, pois um dos objetivos é a comparação entre as duas modelagens propostas, pois a modelagem com equações matemáticas (tradicional) não permite detalhamentos que o uso da simulação permite. A modelagem utilizando módulos como o software Arena permite alterações no problema estudado, bem como identificar possíveis estrangulamentos do sistema. Nesse trabalho foi decidido, após análise do funcionamento do sistema, que se utilizaria o output do tempo médio de espera na fila para esta comparação (Figura 5.12).

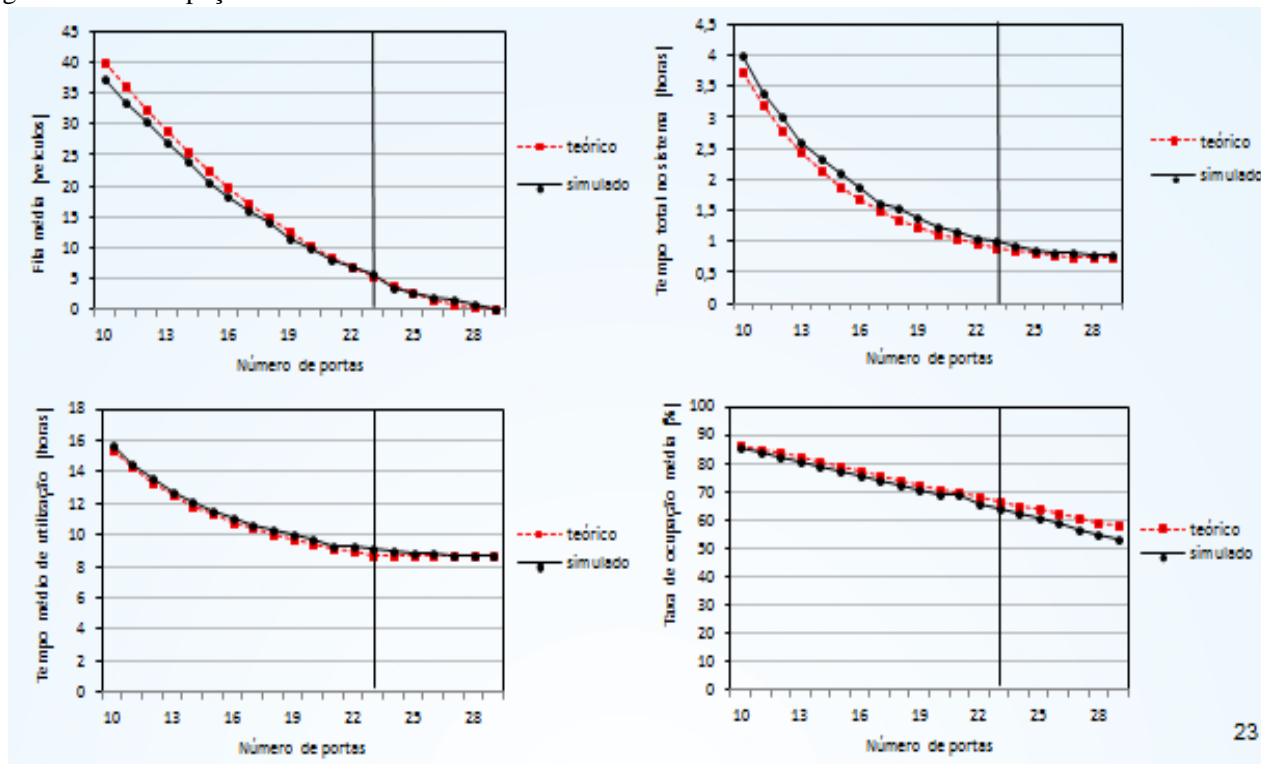
Inicialmente, a validação do modelo computacional foi obtida por meio da comparação dos resultados do modelo de simulação com o modelo teórico de acordo com a Figura 5.12. Assim como o tempo médio de espera as outras variáveis levadas em consideração no modelo Figura 5.13, a saber, fila média, tempo médio total no sistema, tempo médio total de utilização das docas e taxa de ocupação média tiveram comportamentos semelhantes e muito próximos quando relacionamos suas médias para esse problema.

Figura 5.12 - Tempo médio de espera na fila



Fonte: o autor

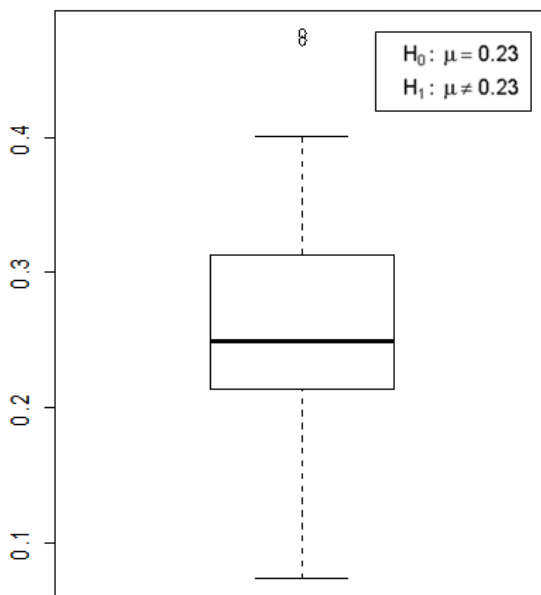
Figura 5.13 - Comparações entre os dois modelos



Posteriormente utilizando o pacote pwr do R (Champely, 2017) foi calculado um tamanho de amostra necessário para detectar uma mudança com um efeito grande na média a partir de um teste t bilateral para uma amostra. Das 50 médias referentes as 50 replicações era preciso extrair um tamanho de amostra coerente estatisticamente que pudesse detectar se os dados comparados são realmente iguais.

Para isso foi considerado um erro tipo I (alfa/ nível de significância) igual a 5% (usado no modelo teórico) e o erro tipo II (beta) igual a 5%. O poder do teste é calculado como 1 menos a probabilidade de erro do tipo II, ou seja,  $1 - \beta$ . Isto significa que o poder do teste t em detectar a mudança desejada será de 95%. Assim o tamanho da amostra para um alfa de 5% e beta de 5% (poder 95%) para detectar uma mudança de efeito grande na média foi de 23 valores (Apêndice B). A amostra aleatória (sem reposição – função sample do R) com 23 valores foi extraída das 50 médias de modo que a média fosse 0,27 (Tabela 5.1). Um teste na amostra constatou uma distribuição normal (necessário para o teste t) usando o teste Shapiro Wilk, considerado com alto poder pela literatura. Não rejeitou a hipótese nula, ou seja, a média não difere de 0,23 (Figura 5.14).

Figura 5.14 - Box plot para as 23 médias



Fonte: O autor

Tabela 5.1 - Tabela do teste-t

| <b><i>Informações</i></b>         |           |
|-----------------------------------|-----------|
| Estatística T                     | 1,8056    |
| Graus de Liberdade                | 22        |
| P-valor                           | 0,08469   |
| Média Amostral                    | 0,2686532 |
| Desvio Padrão Amostral            | 0,1026682 |
| Tamanho da Amostra                | 23        |
| Hipótese Alternativa Diferente de | 0,23      |
| Nível de Confiança                | 95%       |
| Limite Inferior                   | 0,2242561 |
| Limite Superior                   | 0,3130502 |

Fonte: O autor

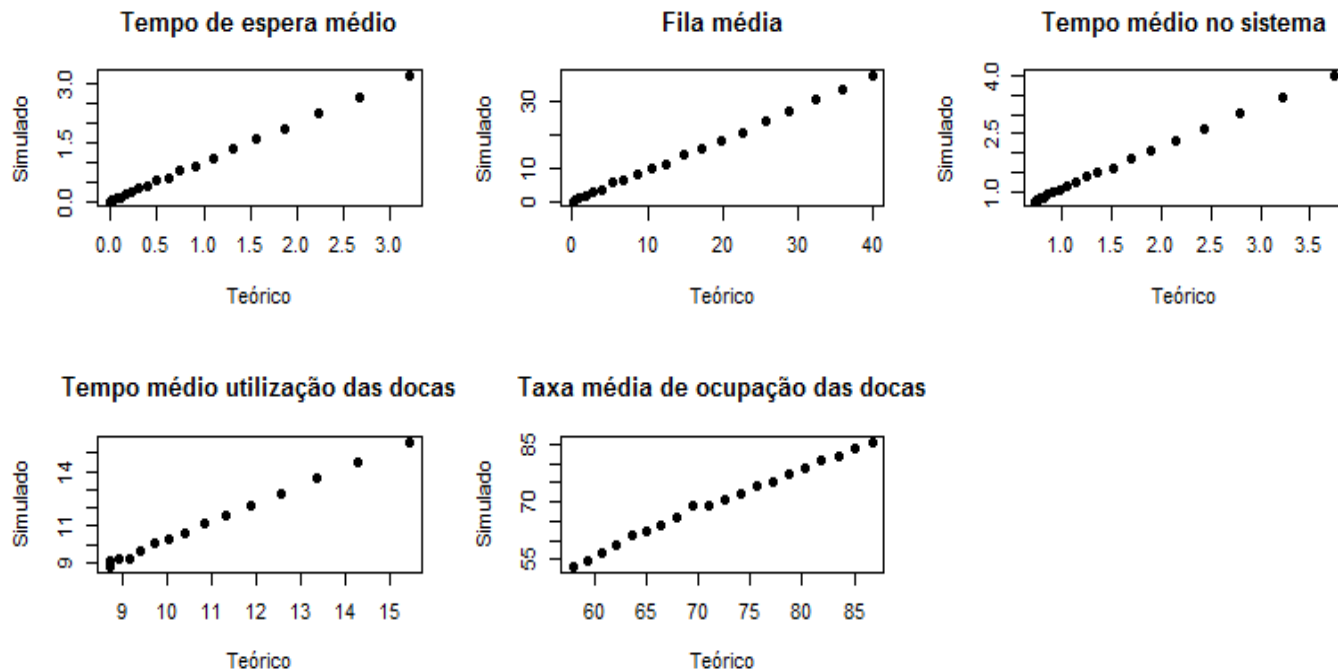
Outros testes aplicados como complemento para o teste da normalidade dos dados encontram-se disponíveis no Apêndice B.

Outras medidas foram utilizadas como complemento para análise da correlação entre as variáveis, como o coeficiente de correlação de Pearson (ver Mousavi, 2014 e Yang, 2017) e algumas medidas de erros largamente utilizadas na engenharia.

O coeficiente de correlação de Pearson é uma medida do grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas. Este coeficiente varia entre os valores -1 e 1. O valor 0 (zero) significa que não há relação linear, o valor 1 indica uma relação linear perfeita e o valor -1 também indica uma relação linear perfeita mas inversa, ou seja quando uma das variáveis aumenta a outra diminui. Quanto mais próximo estiver de 1 ou -1, mais forte é a associação linear entre as duas variáveis. A Figura 5.15 mostra a relação quase linear de todas as variáveis analisadas no modelo.



Figura 5.15 - Gráficos de análise do coeficiente de Pearson



Fonte: O autor

A Tabela 5.2 contém algumas medidas de erros utilizadas. A precisão da previsão refere-se ao quão perto as previsões chegam dos dados reais. Os indicadores são utilizados para verificar medidas de desempenho do nível de precisão que o modelo de previsão possui. Previsões muito próximas dos dados reais significam erros de precisão baixos, logo são mais aceitas. Quando os erros de precisão são maiores é sinal que o modelo de previsão deve ser alterado ou ajustado.

Tabela 5.2 - Medidas de Erros

|          | Fila média<br>(veículos) | Tempo<br>de<br>espera<br>médio<br>(h) | Tempo<br>médio<br>no<br>sistema<br>(h) | Tempo total<br>médio de<br>utilização<br>das docas<br>(h) | Taxa de<br>ocupação<br>média das<br>docas (%) |
|----------|--------------------------|---------------------------------------|--|---|---|
| R        | 0,9996                   | 0,9999                                | 0,9995                                 | 0,9987  | 0,9976  |
| MAE      | 1,0530                   | 0,0275                                | 0,1285                                 | 0,1880  | 2,2350  |
| RMSE     | 1,1317                   | 0,0312                                | 0,1424                                 | 0,2188  | 2,5360  |
| MedianAE | 0,6750                   | 0,0300                                | 0,1200                                 | 0,2200  | 1,9000  |
| R2       | 0,9886                   | 0,9988                                | 0,9735                                 | 0,9735  | 0,9157  |

Fonte: O autor

A Tabela 5.2 mostra um bom ajuste dos dados simulados quando comparados aos dados do modelo teórico. Para os cálculos dos erros foi utilizado o pacote Mlmetrics disponíveis no R (Apêndice B).

### 5.2.5 Análise dos Resultados da Simulação

Para análise dos resultados obtidos com a aplicação do modelo de simulação foi utilizado a mesma variação do número de docas do modelo teórico, de 10 a 29 docas. A Tabela 5.3 apresenta a média dos resultados obtidos com 50 replicações.

Tabela 5.3 --Resultados da aplicação do modelo computacional

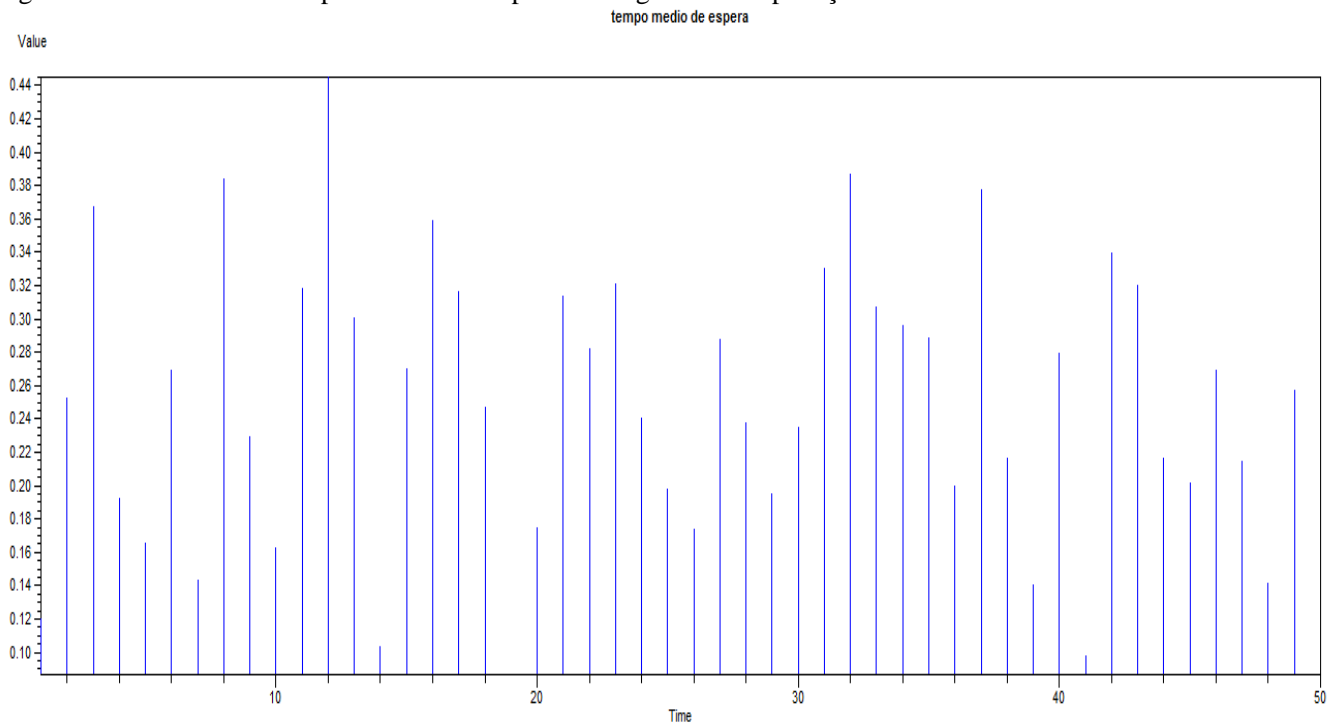
| Número de posições | Fila média (veículos) | Tempo de espera médio (h) | Tempo médio no sistema (h) | Tempo total médio de utilização das docas (h) | Taxa de ocupação média das docas (%) |
|--------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------------|---|--------------------------------------|
| 10                 | 37.4                  | 3.18                      | 3.99                       | 15.63   | 85.7                                 |
| 11                 | 33.6                  | 2.65                      | 3.41                       | 14.47   | 84.1                                 |
| 12                 | 30.4                  | 2.25                      | 3.01                       | 13.60   | 82.1                                 |
| 13                 | 26.9                  | 1.87                      | 2.61                       | 12.78   | 80.6                                 |
| 14                 | 24.1                  | 1.59                      | 2.32                       | 12.17   | 78.7                                 |
| 15                 | 20.6                  | 1.35                      | 2.09                       | 11.57   | 77.2                                 |
| 16                 | 18.2                  | 1.10                      | 1.86                       | 11.10   | 75.4                                 |
| 17                 | 16.0                  | 0.93                      | 1.63                       | 10.63   | 74.1                                 |
| 18                 | 14.1                  | 0.80                      | 1.52                       | 10.32   | 72.1                                 |
| 19                 | 11.5                  | 0.63                      | 1.39                       | 10.01   | 70.4                                 |
| 20                 | 10.2                  | 0.55                      | 1.25                       | 9.68  | 69.2                                 |
| 21                 | 8.30                  | 0.43                      | 1.16                       | 9.24  | 69.0                                 |
| 22                 | 6.80                  | 0.35                      | 1.06                       | 9.24  | 65.9                                 |
| 23                 | 5.80                  | 0.27                      | 1.00                       | 9.10  | 64.0                                 |
| 24                 | 3.40                  | 0.21                      | 0.94                       | 8.95  | 62.4                                 |
| 25                 | 2.98                  | 0.14                      | 0.87                       | 8.77  | 61.1                                 |
| 26                 | 2.23                  | 0.11                      | 0.83                       | 8.77  | 58.7                                 |
| 27                 | 1.55                  | 0.08                      | 0.81                       | 8.75  | 56.7                                 |
| 28                 | 0.90                  | 0.05                      | 0.78                       | 8.73  | 54.8                                 |
| 29                 | 0.30                  | 0.03                      | 0.76                       | 8.73  | 52.9                                 |

Fonte: O autor

Observando ainda a Figura 5.12 fica claro que as curvas são coincidentes em quase todos os pontos. Observam-se nas curvas duas faixas de comportamento, quando  $n \geq 23$  a variação no tempo de espera tende a ser linear, enquanto que para  $n < 23$  a variação é exponencial, como acontece no modelo teórico apresentado. O tempo de espera médio no teórico era de 0,23h (13,8 min), no computacional chega a 0,27h, ou seja, 16,2 minutos. A fila média de 5,4 veículos no teórico, no computacional esse número é praticamente o mesmo de 5.8 veículos.

A Figura 5.16 mostra a variabilidade das 50 médias para o tempo médio de espera, o comportamento desta observação varia ao longo das 50 replicações, tal variabilidade surge devido a aleatoriedade dos dados, podendo ocorrer dias atípicos. Porém a média final considerando as 50 médias ficou muito próxima do modelo teórico.

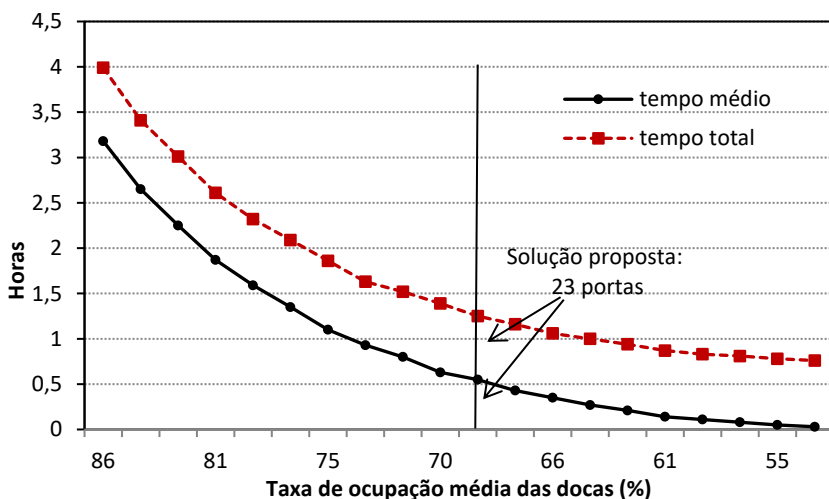
Figura 5.16- Análise dos tempos médios de espera ao longo das 50 replicações



Fonte: o autor

Outro fator importante para análise da solução é a taxa de ocupação média das docas. Na Figura 5.17, a curva do tempo médio e do tempo total no sistema em função da taxa de ocupação média fornecem uma curva que se assemelha muito a Figura do modelo teórico, a curva tem um comportamento exponencial no início tendendo a linearidade a medida que o número de docas aumenta, não fazendo diferença ter mais docas para recebimento de cargas, pois a taxa de ocupação das mesmas chega a quase 50% do total utilizado. O tempo total médio de utilização das docas mostra que após o fechamento da janela de tempo de 8 horas de recebimento dos caminhões abastecedores, o terminal continua em funcionamento por mais 1 hora e 6 minutos atendendo caminhões que ainda precisam ser descarregados.

Figura 5.17 - Análise dos tempos médio e total no sistema em função da taxa de ocupação



Fonte: o autor

Analisando agora os dados das 50 replicações estatisticamente, com 183 caminhões que chegam as docas, em um intervalo de tempo de 8 horas de funcionamento. Para isto foi escolhido um cenário de 23 docas analisando a variável tempo médio de espera.

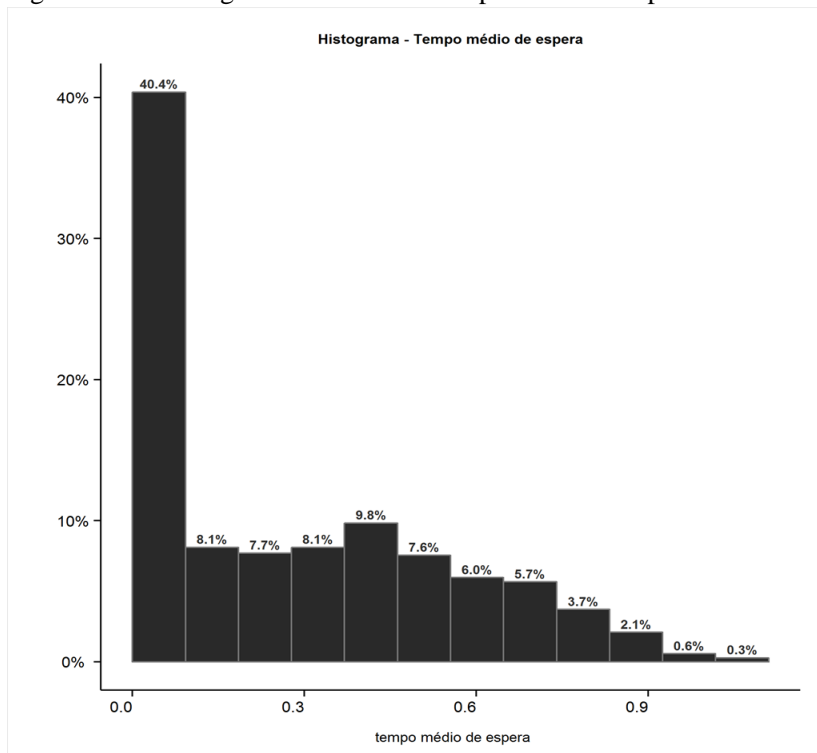
Tabela 5.4 - Tabela de distribuição de frequências

| Classes      | Faixa de tempo de espera (h) | Frequência  | Freq. Perc. (%) | Freq. Acum. (%) |
|--------------|------------------------------|-------------|-----------------|-----------------|
| 1            | [0,000 ; 0,092)              | 3695        | 40,40           | 40,40           |
| 2            | [0,092 ; 0,185)              | 742         | 8,11            | 48,51           |
| 3            | [0,185 ; 0,277)              | 705         | 7,70            | 56,21           |
| 4            | [0,277 ; 0,370)              | 742         | 8,11            | 64,32           |
| 5            | [0,370 ; 0,463)              | 900         | 9,82            | 74,14           |
| 6            | [0,463 ; 0,555)              | 691         | 7,55            | 81,69           |
| 7            | [0,555 ; 0,648)              | 547         | 5,98            | 87,67           |
| 8            | [0,648 ; 0,740)              | 519         | 5,67            | 93,34           |
| 9            | [0,740 ; 0,833)              | 340         | 3,72            | 97,06           |
| 10           | [0,833 ; 0,925)              | 191         | 2,09            | 99,15           |
| 11           | [0,925 ; 1,028)              | 52          | 0,57            | 99,72           |
| 12           | [1,028 ; 1,110)              | 26          | 0,28            | 100             |
| <b>Total</b> |                              | <b>9150</b> | <b>100,00</b>   | -               |

Fonte: O autor

A Tabela 5.4 apresenta a distribuição de frequências com os resultados dos dados de 50 replicações (que representam 50 dias de simulação). A primeira faixa de tempos apresenta a maior frequência da classe e representa 40,4% das observações. Ela representa caminhões que foram prontamente atendidos, ou que esperaram, no máximo, 6 minutos. Se considerarmos as cinco primeiras classes, vemos que elas representam 74,14% de todos os caminhões recebidos, ou seja, quase, três quartos de todos os caminhões são atendidos em, no máximo, 27.8 minutos. A Figura 5.18, a seguir apresenta o histograma referente aos dados analisados. Nele é possível identificar uma distribuição assimétrica negativa, de onde podemos ver as características da distribuição lognormal dos dados.

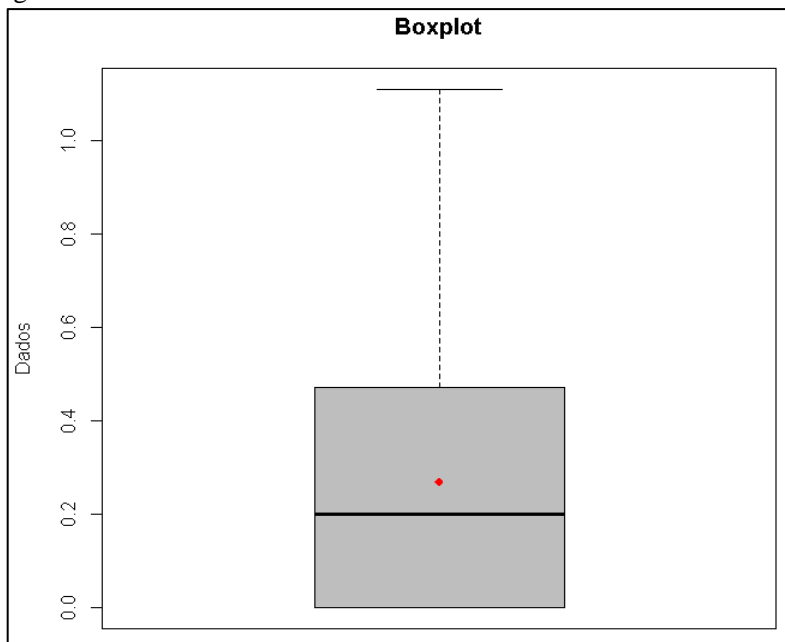
Figura 5.18 - Histograma referente ao tempo médio de espera



Fonte: O autor

A Figura 5.19 apresenta o boxplot dos dados referentes ao modelo simulado. O primeiro quartil foi calculado em 0 (zero), ou seja, 25% dos caminhões, quando considerado os valores das 50 replicações e dos 183 caminhões não esperaram para serem atendidos. Já a mediana ficou em 0,20 horas, ou seja, metade de todos os caminhões não esperou mais que 12 minutos para serem atendidos. O terceiro quartil ficou em 0,47 horas, o que significa que 75% de todos os caminhões não esperaram mais que 28,2 minutos para serem atendidos.

Figura 5.20 – Box Plot



Fonte: O autor

### 5.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS

Por meio da simulação foi possível avaliar o modelo proposto no Capítulo anterior. O software Arena modelou muito bem o problema proposto, sendo apresentado um primeiro modelo para análise das filas geradas em terminais de transbordo. Através da simulação soluções intuitivas para o problema do dia a dia da empresa, no caso a formação de filas, podem ser modeladas e testadas resultando em avaliações quantitativas; permitiu a experimentação com as interações entre componentes de um sistema complexo e pode prever resultados. Além disso, algumas alterações de processos existentes podem ser testadas sem que se tivesse que alterar a rotina do sistema inicial.

Com a análise dos dados, estatisticamente, verificou-se a consistência dos resultados anteriormente modelados e chegou-se a conclusão que a solução de 23 portas poderia diminuir o tempo de espera dos caminhões na fila.

Com relação aos custos, a simulação teve ainda a capacidade de avaliar alternativas que calculem rapidamente os impactos que uma porta



a mais no CD pode causar nos custos finais, como também a diminuição ou o aumento do número de portas pode causar no tempo da fila de espera, com simples alterações no modelo simulado.

Portanto, a simulação pode substituir uma solução de uma modelagem matemática, que utiliza equações matemáticas mais fechadas e que não possibilitam ao modelador um detalhamento do sistema estudado.



## 6. CONCLUSÃO E PESQUISAS FUTURAS

A motivação básica deste estudo se deu pela necessidade de analisar as filas geradas na descarga de produtos que chegam a um terminal de transbordo, uma metodologia não encontrada até agora na literatura. Na verdade, os veículos devem permanecer o menor tempo possível no terminal, apenas o tempo necessário para ser descarregado, permitindo que sua carga seja internamente transferida para os caminhões que entregarão a carga aos destinos finais.

A alta variação na taxa de chegadas tem um impacto significativo sobre a quantidade de congestionamento na rede de transporte. O excesso de congestionamento resulta no bloqueio e atrasos em outros segmentos ligados a rede de *cross-docking*, exemplo, atrasos nas operações de transferência dentro do CD, impedindo a consolidação das cargas nos caminhões de saída e conseqüentemente em uma demora na entrega da carga para o cliente final.

A este respeito, o emprego da modelagem de simulação no presente trabalho permitiu uma análise mais realista de uma operação de terminal que opera com a logística de *cross-docking*. Especificamente, permitiu definir um número de portas mais compatíveis com a quantidade de caminhões recebidos por dia no terminal, reduzindo assim o congestionamento observado ao descarregar veículos de entrada, conseqüentemente, induzindo a redução dos custos operacionais.

Através do modelo de simulação, estudamos uma aplicação específica da metodologia para um terminal de *cross-docking* de uma cadeia de supermercados. Obtivemos resultados muito semelhantes ao aplicar uma formulação teórica de modelo de enfileiramento, em comparação com os resultados da análise de simulação. A vantagem de empregar uma estrutura teórica é a facilidade de computação através de fórmulas matemáticas explícitas e técnicas de computação numérica. Por outro lado, o uso da simulação abre ao analista uma infinidade de possibilidades de representação, permitindo um nível de abordagem de simulação mais detalhado. Outra vantagem de simulação é que pode detectar possíveis estrangulamentos no sistema e produzir representações gráficas que são úteis na discussão de desvantagens do sistema e possíveis correções.

Continua ser necessária uma investigação mais aprofundada neste setor de problemas de cadeia de abastecimento logístico, nomeadamente design e operação do cruzamento. Um problema associado a ser abordado pelos pesquisadores é o deslocamento interno das unidades de carga das portas de descarga para as áreas alocadas aos caminhões de saída. A

atribuição de caminhões às portas de forma a minimizar os custos internos de transporte pode levar a economias operacionais substanciais.

Outra área a ser estudada refere-se a cargas resfriadas, onde os caminhões precisam manter sua temperatura, a fim de não comprometer a carga transportada. Em visita a alguns CDs na região de Campinas foi relatado que muitos caminhoneiros quando estão em situações que envolvem fila de espera desligam os motores para economizar combustível e com isso as cargas não chegam com a temperatura ideal. Esta é uma área de estudo que está aumentando de importância em todo país e tem um grande impacto econômico.

Finalmente, embora não tenha sido fácil aplicar tais ferramentas de modelagem a casos reais em países em desenvolvimento como o Brasil, devido a abordagens empíricas e restrições proprietárias, a busca de possíveis aplicações práticas será explorada ainda mais. A apresentação de tais possibilidades de metodologia em conferências técnicas e acadêmicas, muitas delas atendidas por profissionais de transporte e logística, é uma alternativa promissora provável.

## BIBLIOGRAFIA

- Alberto, Adami; Tesi di Laurea Magistrale. Cross-docking: analysis of two different strategies in handling and staging freights using simulation. Università Degli Studi Di Padova, 2011.
- Agustina, D.; C.K.M. Lee e R. Piplani. A review: Mathematical Models for Cross-docking Planning. *International Journal of Engineering Business Management*, v. 2 n. 2, p. 47-54, 2010.
- Arenales, M.; Armentano, V.; Morabito, R.; Yanasse, H. Pesquisa operacional para cursos de engenharia. Editora Campus, 2007.
- Arnaut, G.; E. Rodriguez-Velasquez; G. Rabadi e R. Musa. Modeling Cross-Docking Operations Using Discrete Event Simulation. *Proceedings of the 6th International Workshop on Enterprise & Organizational Modeling and Simulation*, p. 113-120, Aachen, Alemanha, 2010.
- Avramidis, A. N., A. Deslauriers, and P. L'Ecuyer. "Modeling Daily Arrivals to a Telephone Call Center". *Management Science* 50 (7): 896–908, 2004.
- Baker, J.F., Evaluation of genotype-environment interactions in beef cattle production systems using a computer simulation model, Texas A & M University, College Station, Tx, 1982.
- Ballou, R. H. Gerenciamento da cadeia de suprimentos: logística empresarial. Porto Alegre; Bookman, 5º ed, 2006.
- Banks, J.; Carsen, J. S. Discret Event System Simulation. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1984.
- Banks, J., Norman, V. Justifying simulation in today's manufacturing environment, IIE Solutions, pp. 16-19, 1995
- Banks, J., Getting started with AUTOMOD, Brooks Automation, S.L. City, 2000.
- Barros, Monica Coutinho de. Warehouse Management System (WMS): Conceitos Teóricos e Implementação em um Centro de Distribuição. Dissertação. Mestrado em Logística – PUC, RJ, 2005.
- Bartholdi III, J. e K.R. Gue. Reducing Labor Costs in an LTL Crossdocking Terminal. *Operations Research*, v. 48, p. 823-832, 2000.

- Bartholdi III JJ, Gue KR. The best shape for a cross dock. *Transportation Science*; 38(2):235–44, 2004.
- Bartholdi III, J.; Gue, K. R. e Kang, K. Staging Protocols for Unit-Load Crossdocking. In: Lahmar, M., Facility Logistics, Auerbach Publications, New York, NY, p. 153-171, 2007.
- Boysen, N., & Fliedner, M. Cross Dock Scheduling: Classification, Literature Review and Research Agenda, *Omega-International Journal of Management Science*, 38(6), 2010.
- Box, G. E. P. e Muller, M. E. “A note on the generation of random normal deviates,” *Annals of Mathematical Statistics*, vol. 29, pp. 610–611, 1958.
- Buijs P, Vis I F, Carlo H J. Synchronization in cross-docking networks: A research classification and framework. *European Journal of Operational Research*, v. 239, n. 3, p. 593 – 608, 2014.
- Çınlar, E. Introduction to Stochastic Processes. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1975.
- Champely S. pwr: Basic Functions for Power Analysis. Rpackage version 1.2-1, 2017.
- Chen P, Guo Y, Lim A, Rodrigues B. Multiple crossdocks with inventory and time Windows. *Computer & Operations Research*, v. 33, n. 1, p. 43-63, 2006.
- Chen, X., Zhou, X., List, G.F. Using time-varying tolls to optimize truck arrivals at ports. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 47, 965–982, 2011.
- Chen, G., K. Govindan, Z.-Z. Yang, T.-M. Choi, L. Jiang. “Terminal Appointment System Design by Nonstationary  $M(t)/E_k/c(t)$  Queueing Model and Genetic Algorithm.” *International Journal of Production Economics* 146 (2): 694–703, 2013.
- Cheng, T.E. Simulation of Flexible Manufacturing Systems. *Simulation*, vol. 6, No. 45, p. 299-302; Dez. 1985.
- Conway, R.W. e Maxwell, W.L. A Queueing Model with State Dependent Service Rates. *Journal of Industrial Engineering*, v. 12, p. 132-136, 1962.

Council of Logistics Management - CLM. Definição de logística dada pelo CLM. Disponível em: <<http://www.clm1.org/index.asp>>. Acessado em: 30 de outubro 2014.

Cox, David A., "Simulation Modeling of Alternative Staffing and Task Prioritization in Manual Post-Distribution Cross Docking Facilities". Industrial Engineering Undergraduate Honors Theses. 53, 2017.

Cross-docking Trend Reports 2011. Disponível em: <http://www.sclogistics.com>. Acesso em: 01 de novembro de 2014.

Devroye, L. Non-Uniform Random Variate Generation, Springer-Verlag, New York, 1986a.

Devroye, L. "Random variate generation in one line of code," in: 1996 Winter Simulation Conference Proceedings, (edited by J. M. Charnes, D. J. Morrice, D. T. Brunner and J. J. Swain), pp. 265–272, ACM, San Diego, CA, 1996.

Drezner, Z., Hamacher, HW. " Facility Location, Applications and Theory". Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2002.

Drury, J. Towards more efficient order picking. IMM Monograph No. 1. The Institute of Materials Management, Cranfield, UK, 1998.

Falconer, P. e P. Drury. Almacenaje Industrial: Proyectos y Construcción para Almacenaje, H. Blume, Madrid, 1978.

Dobrusky, Fernando G. Tese de doutorado: Optimal Location of Cross-docking for a Distribution Network in Argentina, 2003.

Erera, A., Hewitt, M., Savelsbergh, M., Zhang, Y. Creating schedules and computing operating costs for LTL load plans. Computers & Operations Research 40(3), 691-702, 2013.

Enderer, F. Contardo, C. Contreras, I. Integrating Dock-Door Assignment and Vehicle Routing with Cross-Docking, Computers & Operations Research, doi: 10.1016/j.cor.2017.06.018, 2017.

Fanti M.P., G. Stecco e W. Ukovich. "Scheduling Internal Operations in Post-Distribution Cross Docking Systems". IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 13:296-297, 2016.

Fernie, James, Frances Pfab e Clive Marchant, "Retail Grocery Logistics in the UK", International Journal of Logistics Management, Vol. 11, No. 2, pp. 83-90, 2000.

- Ferreira, A. M. Marcos. Tese de doutorado: Métodos para geração de entidades, em modelos de simulação, para processos estocásticos de renovação não estacionários, UFPR, 2009.
- Fogliatti, M.C. e N.M.C Mattos. Teoria de Filas. Editora Interciência, Rio de Janeiro, RJ, 2007
- Freitas Filho, P. J. Introdução à modelagem e simulação de sistemas: com aplicações em Arena. 2. ed. Florianópolis: Visual Books, 2008.
- Gerhardt, Ira; Nelson Barry L. Transforming Renewal Processes for Simulation of Nonstationary Arrival Processes. Journal on Computing. Vol. 21, No. 4, pp. 630-640, 2009.
- Gnedenko, B. V., I. N. Kovalenko. Introduction to Queueing Theory, 2. ed. Birkhäuser, Boston 1989.
- Goddefroy, Nathan & Mellaerts, Alexander, Optimizing the dock door assignment problem in Cross-docking warehouses, Universiteit Gent Faculteit Economie En Bedrijfskunde, 2013.
- Gomes, Carlos Francisco Simões; Ribeiro, Priscilla Cristina Cabral. Gestão da cadeia de suprimentos integrada à tecnologia da informação. São Paulo: Pioneira Thompson Learning, 2004.
- Goodarzi, A.H., Zegordi, S.H., A Location- Routing Problem for Cross-docking Networks: A Biogeography-based Optimization Algorithm, Computers & Industrial Engineering (2016), doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.10.023>
- Gordon, G. System Simulation, Prentice-Hall, NJ, 1978.
- Gorry, G. A. ; Morton, S. Framework for management information systems, Sloan management Review, Knoxville, v. 13, n.1,p. 55-70, 1971.
- Gue K. Freight terminal layout and operations. PhD thesis. Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA; 1995.
- Gue, K.; Kang, K. Staging Queues in Material Handling and Transportation Systems. Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference, p.1104-1108, 2001.
- Gue, Kevin R., "Warehouse without Inventory", Department of Industrial & Systems Engineering, Auburn University, vol. 7, No. 2, pp. 124-132, 2007.



- Jain, R.; Juneja S.; Shimkin N. "The Concert Queueing Game: To Wait or to be Late." *Discrete Event Dynamic Systems* 21 (1): 103–138, 2011.
- Javanmard, S.; Vahdani, B.; Tavakkoli-Moghddam, R. Solving a multi-product distribution planning problem in cross docking networks: An imperialist competitive algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 70, n. 9-12, p. 1709-1720, 2014.
- Harrel, C.R., Bateman, R.E., Gogg, T.J., Mott, J.R.A., System improvement using simulation, Orem: Promodel Corporation, 1995.
- Harrel, C.H.; Tumay, K. *Simulation Made Easy: A Manager's Guide*. Engineering and Norcross: Management Press, 1995.
- Harrod, Steven e Kelton, W. David. Numerical Methods for Realizing Nonstationary Poisson Processes with Piecewise-Constant Instantaneous-Rate Functions. *Simulation* 82: 147. Doi: 10.1177/0037549706065514, 2006.
- He, Beixiang, Liu Yunan, Whitt Ward. Staffing a Service System with Non-Poisson Non-Stationary Arrivals. *Probability in the Engineering and Informational Sciences*, 30, 593–621. doi:10.1017/S026996481600019X, 2016.
- Hildebrand, F.B. *Introduction to Numerical Analysis*, New York: McGraw-Hill, 1974.
- Kaminski, Frank C.; Rumpf David L. Simulation nonstationary Poisson process: a comparison of alternatives including the correct approach, 1977.
- Karamouzian, A., E. Teimoury, and M. Modarres. "A Model for Admission Control of Returned Products in a Remanufacturing Facility Using Queuing Theory." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 54 (1-4): 403–412, 2011.
- Kelton, W. D., Sadowski, R. P. e Sturrock, D. T. *Simulation with Arena*. 3. ed. New York: McGraw- Hill, 2004.
- Kendall, K. E. ; Kendall, J.E. *Analisis y diseño de sistemas*. México. Prentice-Hall. 881p., 1991.
- Kiefer, J. Sequential Minimax Search for a Maximum, *Proceedings of the American Mathematical Society*, V. 4, pp. 502-506, 1953.

Killen, C. P. et al. Cooperative competitive strategies: An Australian Case Study. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, v. 1, n. 1, p. 11-27, 2004.

Kinnear, E., Is There Any Magic in Cross-docking, *Supply Chain Management*, 2, 49-52, 1997.

Kittithreerapronchai, Oran, Design of single hub crossdocking networks, geometric relationships and case study, 2009.

Knessl, C.; Y. P. Yang. “An Exact Solution for an  $M(t)/M(t)/1$  Queue with Time-Dependent Arrivals and Service.” *Queueing Systems* 40 (3): 233–245, 2002.

Jongbloed, G., and G. Koole. “Managing Uncertainty in Call Centers Using Poisson Mixtures”. *Appl. Stochastic Models Bus. Indust.* 17:307–318, 2001.

Lacerda, Leonardo - Armazenagem estratégica: analisando novos conceitos. Centro de Estudos em Logística (CEL), COPPEAD/UFRJ, 2000.

Laudon, K. C., *Sistemas de Informação Gerenciais*. 7.ed ed. São Paulo: Editora Afiliada, Cap.2, 2007.

Law, A. M. & Kelton, W. D. *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw-Hill, Third Edition, 2000.

Levi, David S.; Kaminsky, Philip e Levi, Edith S. “Cadeia de Suprimentos Projeto e Gestão”, 3º ed, 2008.

Lewis, P. A. W., G. S. Shedler. Simulation of nonhomogeneous Poisson processes by thinning. *Naval Res. Logist. Quart.* 26(3) 403–413, 1979.

Li Y, Lim A, Rodrigues B. Cross-docking — JIT scheduling with time windows. *Journal of the Operational Research Society*; 55(12):1342–51, 2004.

Liao, C. J., Lin, Y. M., e Shih, S. C. Vehicle routing with cross-docking in the supply chain. *Expert Systems with Applications*, 37(10), 6868–6873, 2010.

Lima, Maurício Pimenta. Armazenagem: considerações sobre a atividade de picking. Instituto de Logística e Supply Chain (ILOS), 2002. Disponível em:  
<[http://www.ilos.com.br/site/index.php?option=com\\_content&task=view&id=764&Itemid=74](http://www.ilos.com.br/site/index.php?option=com_content&task=view&id=764&Itemid=74)>.

Little, J.D.C. and Graves, S.S. Little's Law, in Chhajed, D. and Lowe, T.J. (eds.) *Building Intuition: Insights from Basic Operations Management Models and Principles*, New York: Springer Science + Business Media, LLC, 2008.

Magableh, G. M., Rossetti, M. D., Mason, S. Modeling and analysis of a generic cross-docking facility. In: *37th Conference on Winter Simulation*, pp. 1613--1620. Orlando, FL, 2005.

Mahomey, J.H.: *Intermodal Freight Transportation*, ENO Foundation for Transportation Inc, Westport, Conn, 1985.

Marin, A., Pelegrin, B. "A Branch And Bound Algorithm for the Transportation Problem with Location of  $p$  Transshipment Points", *Computers & Operations Research*, No. 7, p. 659 – 678, 1997.

Marques, Rita M. P, Tese de doutorado: Análises de Resultados de Simulações Não Estacionárias Aperiódicas e Cíclicas. Universidade dos Açores, Ponta Delgada, 2005.

Martins, S., Amorim, P., Figueira, G., Almada-Lobo, B., An Optimization-Simulation Approach to the Network Redesign Problem of Pharmaceutical Wholesalers, *Computers & Industrial Engineering*, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.01.026>.

Mckinnon, Alan C. *Physical distribution systems*. New York: Routledge, 1989.

McKinnon, Alan ; Campbell, Jim. Quick-response in the Frozen Food Supply Chain: The Manufacturers' Perspective. *Christian Salvesen Logistics Research Paper no. 2*. 2008.

Miller, D. R. Almost sure comparisons of renewal processes and Poisson processes, with application to reliability theory. *Mathematics Operation Research* 4(4) 406–413, 1979.

Moore, S. "Approximating the Behavior of Nonstationary Single-Server Queues." *Operations Research* 23 (5): 1011–1032, 1975.

Moura, R. A. *Manual de logística: Armazenagem e distribuição física*.- vol 2.- São Paulo: IMAM, 1997.

Mousavi SM, Mostafavi ES, Hosseinpour F. Gene expression programming as a basis for new generation of electricity demand prediction models. *Computer & industrial Engineering*. V. 74, pp. 120-128, 2014.

- Mousavi SM, Vahdani B. Cross-docking location selection in distribution systems: a new intuitionistic fuzzy hierarchical decision model. *Int J Comput Intell Syst*, 9 (1), pp. 91–109, 2016.
- Napolitano, Maida, *Making the Move to Cross-docking*, Oak Brook, IL: Warehousing Education and Research Council, 2000.
- Newell, G.F. Queues with Time-Dependent Arrival Rates I – The Transition Through Saturation, *Journal of Applied Probability*, V. 5, pp. 436-451, 1968.
- Newell, G.F. *Applications of Queueing Theory*, London: Chapman and Hall, 1971.
- Newell, G.F. Scheduling, location, transportation, and continuum mechanics: some simple approximations to optimization problems, *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 1973.
- Nikolopoulou, Amalia I.; Repoussis, Panagiotis P.; Tarantilis, Christos D.; Zachariadis, Emmanouil E. Adaptive memory programming for the many-to-many vehicle routing problem with cross-docking, 2016. DOI 10.1007/s12351-016-0278-1.
- Novaes, Antonio G.N.; Takebayashi, F.; Briesemeister, R.; Cross-docking em Centro Logísticos de Distribuição Urbana: Considerações sobre Operação e Modelagem. *Revista Transportes*, v. 23, n. 1, p. 91-111, 2015.
- Odoni, A.R. e R. De Neufville. Passenger Terminal Design. *Transportation Research A*, v. 1, p. 27-35, 1992.
- Page, E. *Queueing Theory in OR*. Butterworths, Londres. Press, W.H.; Teukolski, S.A.; Vetterling, W.T. e Flannery, B.P. *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*, Section 10.2: Golden Section Search in One Dimension. New York: Cambridge University Press, 1972.
- Pender, Jamol; Rand, Richard H.; Wesson, Elizabeth; An asymptotic Analysis of Queues with Delayed Information and Time Varying Arrival Rates, 2017.
- Qiu, Q.; Zang, Z.; Song, X. e Gui, S. Application Research of Cross-docking Logistics in Food Cold – Chain Logistics. *International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*. China, p. 236-240, 2009.

Richardson, Helen L. Cross-docking: Information Flow saves Space. Integrated Warehousing & Distribution, p. 51-54, 1999.

Rohrer, Matthew "Simulation and Cross-docking", Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference", 846-849, 1995.

Rolski, T., R. Szekli. Stochastic ordering and thinning of point processes. Stochastic Processes Their Appl. 37(2) 299–312, 1991.

Saddley Creek Corporation, Cross-docking Trends Report 2011. ([www.saddlecreek.com](http://www.saddlecreek.com)).

Sakurada, Melson; Miyake, Dario I. Aplicação de simuladores de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operações de serviços. Gestão & Produção, v.16, n.1, p.25-43, 2009.

Sandal, S. Saging Approaches to Reduce Overall Cost in a Cross-docking Environment. Thesis presented to the Faculty of the Graduate School, University of Missouri – Columbia, 2005.

Sandanayake et. al. A systematic modelling and simulation approach for JIT performance optimisation. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. Volume 24, pp. 735–743, 2008.

Schaffer, S. Burt. Cross-docking can Increase Efficiency. Automatic ID News. P.34-37, Vol 14, Issue 8, July 1998.

Schimidh, J.W.; Taylor, R.E. Simulation and Analysis of Industrial Systems. Irwin: Homewood, 1970 apud Banks, J; Carson II, J. S. Discrete-Event System Simulation. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1984.

Shakeri, M.; Low, M. Y. H.; Turner, S. J.; Lee, E. W., A robust two-phase heuristic algorithm for the truck scheduling problem in a resource-constrained crossdock. Computers & Operations Research 39, p. 2564–2577, 2012.

Shannon, R.E., Systems Simulation: The art and Science, Prentice-Hall, NJ, 1975.

Sharma, S.; Tipper, D. Approximate Models for the Study of Nonstationary Queues and Their Applications, Proceedings of 1993 IEEE International Conference on ComrrLunicataons, June 1993.

Silva, Rafael Mozart; BRAND, Gustavo. Aplicando o processo de pensamento da TOC (teoria das restrições) através da árvore da

realidade atual (ARA) para extratificar o problema de desorganização em um centro de distribuição.

Revista Ingepro. Disponível

<http://www.ingepro.com.br/index.php/ingepro/article/viewFile/107/98>.

Snyder, Glenn, "Toughened by WalMart," *Progressive Grocer*, Vol. 74, No. 2, pp. 89-93, 1995.

Soltani, R. e S.J. Sadjadi. Scheduling Trucks in Cross-Docking Systems: A Robust Meta-Heuristics Approach. *Transportation Research Part E*, v. 46, p. 650-666, 2010.

Taylor, G. D. e J. S. Noble. Determination of Staging Needs in a Crossdock Environment. *Proceeding of 2004 Industrial Engineering Research Conference*, 2004.

Tiedemann, N. B S. Design und Betrieb von Cross Docks. *Jena Research Papers in Business and Economics - Working and Discussion Papers*, 2009.

Torres, I., Integração de ferramentas computacionais aplicadas ao projeto e desenvolvimento de arranjo físico de instalações industriais, *Dissertação de Mestrado*, PPG-DEP/UFSCar, 2001.

Tsui, T.S. e Chang, C.H. A microcomputer based decision support tool for assignment dock doors in freight yards, *Computers & Industrial Engineering*, 19, 1-4, pp.309-312, 1990.

Tsui, T. S., Chang, C. H. An Optimal Solution to a Dock Door Assignment Problem, *Comput. Indust. Eng.* 23, 283–286, 1992.

Vahdani B, Zandieh M. Scheduling trucks in cross-docking systems: robust meta-heuristics. *Computers & Industrial Engineering*; 58(1):12–24, 2010.

Vahdani B, Soltani R, Zandieh M. Scheduling the truck holdover recurrent dock cross-dock problem using robust meta-heuristics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46 (5–8), pp. 769–783, 2010.

Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zandieh, M., & Razmi, J. Vehicle routing scheduling using an enhanced hybrid optimization approach. *Journal of Intelligent Manufacturing*. *J Intell Manuf* 23:759–774, 2012.

Van Belle, J., Valckenaers, P., & Cattrysse, D. Cross-docking: State of the art. *Omega-International, Journal of Management Science*, 40(6), 827-846. doi: DOI 10.1016/j.omega.2012.01.005, 2012.

Vis, I. F. A. & Roodbergen, K. J., Positioning of Goods in a Cross-docking Environment . *Computers & Industrial Engineering*, v.54, p. 677-689, 2008.

Vis, I. F. A., & Roodbergen, K. J., Layout and control policies for cross-docking operations. *Computers & Industrial Engineering*, v.61, 911-919, 2011.

Wen M, Larsen J, Clausen J, Cordeau JF, Laporte G. Vehicle routing with cross-docking. *Journal of the Operational Research Society*; 60(12):1708–18, 2009.

Whitt, W. “Dynamic Staffing in a Telephone Call Center Aiming to Immediately Answer All Calls”. *Oper. Res. Lett.* 24:205–212, 1999.

Winston, W. L. *Operations research: applications and algorithms*. 3 ed. California: Duxbury Press, 1993.

Yan, Wenying. *Heuristics for Truck Scheduling at Cross Docking Terminals*. A Thesis in the Department of Mechanical and Industrial Engineering. Concordia University. Quebec. Canadá, 2014.

Yang, Long-Hao; Wang Ying-Ming; Chang, Lei-Lei; Fu, Yang-Geng. A disjunctive belief rule-based expert system for bridge risk assessment with dynamic parameter optimization model. *Computer & Industrial Engineering*. V. 113, pp 459-474, 2017.

Yu W, Egbelu PJ. Scheduling of inbound and outbound trucks in cross docking systems with temporary storage. *European Journal of Operational Research*; 184 (1):377–96, 2008.

Zecevic, S., Gojkovic, P. *Logisticki trendovi, Zbornik radova 1*. Conferência Logística 2010, 18-19, Dobo, Saobracajni fakultet - Dobo, str. 1-10, 2010.





## APÊNDICE

## APÊNDICE A -

Procedure, em Pascal, para cálculo de  $t_0$

```

Procedure Busca_t0(n           : Integer;
                   T,phi,f     : Real;
                   var t0      : Real);
Var   gs,s1,s2,t1,t2      : Real;
        delta1,delta2,Lambda1,Lambda2 : Real;
        I                   : Integer;
Begin
  (* Search for t0 such that lambda(t0) = n*mu, Newell, pg 39 *)
  (* Uses Golden Search (Fibonacci) search technique,
   Novaes (1978); Press, Teukolsky, Vetterling, Flannery (2007) *)
  S1:=0.0;
  S2:=phi*T;
  gs:=0.618;
  For I:=1 to 20 do
  Begin
    t1:=S1+(1-gs)*(S2-S1);
    Lambda1:=f*((T-t1)*Sqr(T-t1)-2*T*Sqr(T-t1)+Sqr(T)*(T-t1));
    delta1:=Abs(Lambda1-n*mu);
    t2:=S1+gs*(S2-S1);
    Lambda2:=f*((T-t2)*Sqr(T-t2)-2*T*Sqr(T-t2)+Sqr(T)*(T-t2));
    delta2:=Abs(Lambda2-n*mu);
    If ( delta1 <= delta2 ) then S2:=t2 else S1:=t1;
  End;
  t0:=(t1+t2)/2.0;
End;

```

Resultados da fila M/M/C/∞/FIFO

```

C:\ProgPas\Filas\Win32\Debug\Fila_MMC.exe
DADOS:
Nº de posições de atendimento na plataforma:      22
Lambda (veículos/hora):                          22.9
Mu (veículos/hora):                              1.370

RESULTADOS, Fila M/M/n/FIFO:
Rho:                                              0.760
Probabilidade de zero veículos na fila:          0.000
Número médio de veículos na fila:                0.5
Tempo médio de espera na fila (min):             1.3
Tempo máximo provável de espera na fila (min):   17.2
Nº máximo esperado de veículos na fila,
com 98% certeza:                                6.6

```

Procedure, em Pascal, modelo teórico.

```

Program Newell_1;
(* To analyze the queue as a function of the number of doors in a dock where
incoming trucks are discharged to a cross-docking terminal. Uses stochastic
approximations based on G. F. Newell work *)

{$APPTYPE CONSOLE}
{$R *.res}
uses
  SysUtils;

Var
  n : Integer; (* number of cargo receiving doors *)
  nQ : Integer; (* for n > nQ there is no queue *)
  eps : Real; (* auxiliary variable to measure the degree of accuracy *)
  INT,INFL : Integer;
  mu : Real; (* average truck discharging rate: cartons/hour *)
  u : Real; (* average truck load: cartons *)
  T : Real; (* Time window extension, terminal operation time (hours) *)
  G : Real; (* Total cargo discharged at the terminal per day in cartons *)
  phi,delta : Real; (* point where lambda(t) is maximum, expressed as a % of T
*)
  S : Real; (* vehicle expected unloading time (hours) *)
  SigS : Real; (* Standard deviation of S *)
  SigMu: Real; (* mu standard variation *)
  t0: Real; (* expected time when the queue starts to grow up *)
  tz: Real; (* second crossing time between A(t) e D(t) when t0 >= 2*T/3 *)
  t1: Real; (* expected time when lambda(t) is maximum *)
  t2: Real; (* time when queue is maximum *)
  t4: Real; (* time when lambda is maximum *)
  tQ : Real; (* expected time when the last vehicle starts unloading *)
  LambdaAver,LambdaMax : Real; (* valor médio e valor máximo de Lambda
(veic/hr) *)
  f : Real; (* constant in A(t) formula *)
  beta : Real; (* tangent of the linear D(t) equation *)
  ItQ : Integer;
  Qmax : Real; (* maximum number of trucks in the queue *)
  QAver : Real; (* average number of vehicles in the queue measured in the
interval
  when queueing occurs *)
  WTmax : Real; (* maximum truck waiting time in the queue *)
  xMax : Real; (* time when the queue is maximum *)
  TT : Array[1..600] of Integer;
  WT : Array[1..600] of Real;

```

```

WTaver : Real; (* average truck waiting time in the queue *)
WTsyst : Real; (* average truck time in the system *)
ArqT : Text; (* arquivo texto *)
Lambda : Array[1..500] of Integer; (* taxa de chegada dos caminhões *)
LambdaM : Real; (* valor médio de lambda n fase congestionada *)
CvAT : Array[1..500] of LongInt;
nd : Real; (* expected number of truck discharges per working day *)
Tocup : Real; (* total door occupancy time per day, hours *)
Tsupply : Real; (* total door supply time per day, hours *)
alpha : Real; (* average door occupancy rate(%) *)
dd : Real; (* intervalo genérico *)
gama : Real; (* porcentagem das chegadas que não sofre filas *)
DocaHora : Real; (* nº de docas ocupadas X tempo de uso, por dia *)

```

```

Procedure Arquivo_Texto1(ItQ : Integer);

```

```

Var Nome,SS : String[30];

```

```

I : Integer;

```

```

(* Creates a TEXT file containing queue values minute to minute over tQ *)

```

```

Begin

```

```

Nome:='FILAI.TXT';

```

```

Assign(ArqT, Nome);

```

```

ReWrite(ArqT);

```

```

for I:=1 to ItQ do

```

```

Begin

```

```

STR(TT[I]:10,SS);Write(ArqT,SS);Writeln(ArqT);

```

```

Write(I:5,TT[I]:10,SS);Readln;

```

```

End;

```

```

Close(ArqT);

```

```

End;

```

```

Procedure Arquivo_Texto2(ItT : Integer);

```

```

Var Nome,SS : String[30];

```

```

I : Integer;

```

```

(* Creates a TEXT file containing values of lambda minute to minute over T *)

```

```

Begin

```

```

Write('ItT ',ItT:10);Readln;

```

```

Nome:='C://progpas/filas/LAMBD.TXT';

```

```

Assign(ArqT, Nome);

```

```

ReWrite(ArqT);

```

```

for I:=1 to ItT do

```

```

Begin

```

```

STR(Lambda[I]:10,SS);Write(ArqT,SS);Writeln(ArqT);

```

```

Write(I:10,Lambda[I]:10);Readln;

```

```

End;

```

```

Close(ArqT);

```

```

Write('End ArqT');Readln;
End;

Procedure Arquivo_Texto3(ItT : Integer);
Var Nome,SS : String[30];
    I : Integer;
(* Creates a TEXT file containing values of curve A(t) minute to minute over T
*)
Begin
Write('ItT ',ItT:10);Readln;
Nome:='C://progpas/filas/CURV_AT.TXT';
Assign(ArqT,Nome);
ReWrite(ArqT);
for I:=1 to ItT do
Begin
STR(CvAT[I]:10,SS);Write(ArqT,SS);Writeln(ArqT);
Write(I:10,CvAT[I]:10);Readln;
End;
Close(ArqT);
Write('End ArqT');Readln;
End;

Procedure Busca_t0(n : Integer;
    T,phi,f : Real;
    var t0 : Real);
Var gs,s1,s2,t1,t2 : Real;
    delta1,delta2,Lambda1,Lambda2 : Real;
    I : Integer;
Begin
(* Search for t0 such that lambda(t0) = n*mu, Newell, pg 39 *)
(* Uses Golden Search (Fibonacci) search technique,
Novaes (1978); Press, Teukolsky, Vetterling, Flannery (2007) *)
S1:=0.0;
S2:=phi*T;
gs:=0.618;
For I:=1 to 20 do
Begin
t1:=S1+(1-gs)*(S2-S1);
Lambda1:=f*((T-t1)*Sqr(T-t1)-2*T*Sqr(T-t1)+Sqr(T)*(T-t1));
delta1:=Abs(Lambda1-n*mu);
t2:=S1+gs*(S2-S1);
Lambda2:=f*((T-t2)*Sqr(T-t2)-2*T*Sqr(T-t2)+Sqr(T)*(T-t2));
delta2:=Abs(Lambda2-n*mu);
If ( delta1 <= delta2 ) then S2:=t2 else S1:=t1;
End;
End;

```

```

t0:=(t1+t2)/2.0;
End;

Procedure Busca_tQ(T,t0,Q,f,beta : Real;
    n : Integer;
    var tQ : Real);
(* Search for tQ such that D(t) = Q *)
Var At0 : Real;
Begin
    At0:=Q-f*(Sqr(Sqr(T-t0))/4-2*T*(T-t0)*Sqr(T-t0)/3+Sqr(T)*Sqr(T-t0)/2);
    tQ:=(Q-At0+beta*t0)/beta;
End;

Procedure Busca_tz(n : Integer;
    T,phi,t0,f,G,mu : Real;
    var tz : Real);
Var gs,s1,s2,t1,t2 : Real;
    delta1,delta2,At0,At1,At2 : Double;
    I : Integer;
Begin
    (* Search for tz, time when D(t) crosses A(t) for the second time,
    which occurs when t0 >= 2*T/3 *)
    (* Uses Golden Search (Fibonacci) search technique,
    Novaes (1978); Press, Teukolsky, Vetterling, Flannery (2007) *)
    S1:=(2/3)*T;
    S2:=T;
    At0:=G-f*(Sqr(Sqr(T-t0))/4-2*T*(t-t0)*Sqr(T-t0)/3+Sqr(T)*Sqr(T-t0)/2);
    gs:=0.618;
    For I:=1 to 20 do
    Begin
        t1:=S1+(1-gs)*(S2-S1);
        At1:=G-f*(Sqr(Sqr(T-t1))/4-2*T*(T-t1)*Sqr(T-t1)/3+Sqr(T)*Sqr(T-t1)/2);
        delta1:=Abs(At1-(At0-mu*n*t0+mu*n*t1));
        t2:=S1+gs*(S2-S1);
        At2:=G-f*(Sqr(Sqr(T-t2))/4-2*T*(T-t2)*Sqr(T-t2)/3+Sqr(T)*Sqr(T-t2)/2);
        delta2:=Abs(At2-(At0-mu*n*t0+mu*n*t2));
        If ( delta1 <= delta2 ) then S2:=t2 else S1:=t1;
    End;
    tz:=(t1+t2)/2.0;
End;

Procedure curva_lambda(T,G,f : Real;
    Var LambdaAver,LambdaMax : Real);
Var I,Ift : Integer;
    tt,y,S : Real;

```

```

    eps : Real;
Begin
  ItT:=Trunc(60*T+0.5);
  S:=0.0;LambdaMax:=-10.0E10;
  for I := 0 to ItT do
  Begin
    tt:=I/60;
    tt:=T-tt;
    y:=f*(tt*Sqr(tt)-2*T*Sqr(tt)+Sqr(T)*tt);
    S:=S+y;
    if (y > LambdaMax) then LambdaMax:=y;
    Lambda[I]:=Trunc(y+0.5);
  End;
  LambdaAver:=S/ItT;
  (* Arquivo_Texto2(ItT); *)
End;

Procedure Dados_Similar_Lambda(T,G,f,u : Real);
Var NC : Integer;
Var tt,LambdaMax : Real;
(* generates data to be used to simulate values of lambda when using Arena *)
Begin
  NC:=Trunc(G/u+0.5);
  tt:=(2/3)*T;
  tt:=T-tt;
  LambdaMax:=f*(tt*Sqr(tt)-2*T*Sqr(tt)+Sqr(T)*tt);
  Write('Lambda ',NC:10,LambdaMaX:15:3);ReadLn;
End;

Procedure Queue_StatisticsI(t0,tQ,T,beta,G,f,mu,u,S,SigS,SigMu : Real;
n : Integer;
var gama,QAver,Qmax,WTaver,WTmax : Real);

(* Used when tQ > T , i.e, there is discharging activities later than T *)

Var I,ItQ,IC1,IC2 : Integer;
  LAver,xQmx,QM,VarMu,LQmx : Real;
  Sum1,Sum2 : Double;
  xQu,Qu : Array[1..1000] of Real;
  x,S0,S1,S2,S3,S4,At0,Dt,VarQu,VarQmx,SigQu,SigQmx : Real;
  y1,y2,y3 : Real;
Begin
  (* inicializando variáveis de saída *)
  gama:=0.0;QAver:=0.0;Qmax:=0.0;WTaver:=0.0;WTmax:=0.0;
  (* Cálculo de lambda médio LAver, intervalo t0 < t <= tQ *)

```

```

Sum1:=G;
Sum2:=G-f*(Sqr(Sqr(T-t0))/4-(2*T/3)*(T-t0)*Sqr(T-t0)+Sqr(T)*Sqr(T-t0)/2);
LAver:=G/T; (* explicar ! *)
ItQ:=Trunc(tQ*60+0.5);
IC1:=0;IC2:=0;
Sum1:=0.0;Sum2:=0.0;
For I:=1 to ItQ do
Begin
  x:=I/60;
  if (x <= t0) then
  Begin
    xQu[I]:=x;
    Qu[I]:=0;
    IC1:=IC1+1;
  End;
  if (x > t0) then
  Begin
    if (x <= T) then
    Begin
      S1:=G-f*(Sqr(Sqr(T-x))/4-(2*T/3)*(T-x)*Sqr(T-x)+Sqr(T)*Sqr(T-x)/2);
      At0:=G-f*(Sqr(Sqr(T-t0))/4-2*T*(t-t0)*Sqr(T-t0)/3+Sqr(T)*Sqr(T-t0)/2);
      Dt:=At0-beta*t0+beta*x;
      S2:=Dt;
      S1:=S1-S2;
      if S1 < 0 then S1:=0;
    End;
    if (x > T) then
    Begin
      S3:=G;
      At0:=G-f*(Sqr(Sqr(T-t0))/4-2*T*(t-t0)*Sqr(T-t0)/3+Sqr(T)*Sqr(T-t0)/2);
      Dt:=At0-beta*t0+beta*x;
      S4:=Dt;
    End;
    if (x <= T) then S0:=S1 else S0:=(S3-S4);
    xQu[I]:=x;
    Qu[I]:=S0;
  End;
End;
Qmax:=-Sqr(1000);IC2:=0;
Sum1:=0.0;Sum2:=0.0;
for I := 1 to ItQ do
Begin
  x:=I/60;
  if (x > t0) then
  Begin

```



```

IC2:=IC2+1;
Sum1:=Sum1+Qu[I];
Sum2:=Sum2+xQu[I]*Qu[I];
if (Qmax < Qu[I]) then
Begin
  Qmax:=Qu[I];
  xQmx:=xQu[I];
End;
End;
(* Situação média *)
Qaver:=Sum1/IC2; (* Fila média *)
WTaver:=Qaver/Laver; (* Tempo médio de espera *)
Qaver:=Qaver/u;
(* Situação máxima *)
if (xQmx >= T) then LQmx:=Laver else
Begin
  x:=T-xQmx;
  LQmx:=f*(x*Sqr(x)-2*T*Sqr(x)+Sqr(T)*x);
End;
y1:=LQmx*xQmx;
y3:=-n*(xQmx/S)*Sqr(SigS/S);
VarQmx:=y1+y3;
SigQmx:=Sqr(VarQmx);
Qmax:=Qmax+1.96*SigQmx;
WTmax:=Qmax/LQmx;
Qmax:=Qmax/u;
(* Cálculo de gama *)
At0:=G-f*(Sqr(Sqr(T-t0))/4-2*T*(t-t0)*Sqr(T-t0)/3+Sqr(T)*Sqr(T-t0)/2);
gama:=100*(At0/G);
End;

Procedure Queue_StatisticsII(t0,tQ,tz,T,beta,G,f,mu,u,S,SigS,SigMu : Real;
  n : Integer;
  var gama,QAver,Qmax,WTaver,WTmax : Real);

(* Used when tQ <= T , and t0 < (2/3)* T *)

Var I,ItQ,IC1,IC2 : Integer;
  LAver,XaVER,QM,VarMu : Real;
  Sum1,Sum2 : Double;
  xQu,Qu : Array[1..1000] of Real;
  x,S0,S1,S2,S3,S4,At0,AtZ,Dt,VarQu,SigQu,f95 : Real;
  y1,y2,y3 : Real;
Begin

```

```

(* inicializando variáveis de saída *)
gamma:=0.0;QAver:=0.0;Qmax:=0.0;WTaver:=0.0;WTmax:=0.0;
(* cálculo de lambda médio Laver, intervalo t0 < t <= tz *)
Sum1:=G-f*(Sqr(Sqr(T-tz))/4-(2*T/3)*(T-tz)*Sqr(T-tz)+Sqr(T)*Sqr(T-tz)/2);
Sum2:=G-f*(Sqr(Sqr(T-t0))/4-(2*T/3)*(T-t0)*Sqr(T-t0)+Sqr(T)*Sqr(T-t0)/2);
LAver:=(Sum1-Sum2)/(tz-t0);
ItQ:=Trunc(tQ*60+0.5);
IC1:=0;IC2:=0;
Sum1:=0.0;Sum2:=0.0;
For I:=1 to ItQ do
Begin
  x:=I/60;
  if (x <= t0) then
  Begin
    xQu[I]:=x;
    Qu[I]:=0;
    IC1:=IC1+1;
  End;
  if (x > t0) then
  Begin
    S1:=G-f*(Sqr(Sqr(T-x))/4-(2*T/3)*(T-x)*Sqr(T-x)+Sqr(T)*Sqr(T-x)/2);
    At0:=G-f*(Sqr(Sqr(T-t0))/4-2*T*(t-t0)*Sqr(T-t0)/3+Sqr(T)*Sqr(T-t0)/2);
    Dt:=At0-beta*t0+beta*x;
    S2:=Dt;
    S0:=S1-S2;
    if (S0 < 0) then S0:=0;
    xQu[I]:=x;
    Qu[I]:=S0;
  End;
End;
QMax:=-Sqr(1000);
for I := 1 to ItQ do
Begin
  x:=I/60;
  if (x > t0) then
  Begin
    IC2:=IC2+1;
    Sum1:=Sum1+Qu[I];
    Sum2:=Sum2+xQu[i]*Qu[I];
    if (Qmax < Qu[I]) then Qmax:=Qu[I];
  End;
End;
xAver:=Sum2/Sum1;
QAver:=Sum1/IC2;
AtZ:=G-f*(Sqr(Sqr(T-tZ))/4-2*T*(t-tZ)*Sqr(T-tZ)/3+Sqr(T)*Sqr(T-tZ)/2);

```

```

gama:=100*((At0+(G-AtZ))/G);
y1:=xAver*Laver;
y3:=n*(xAver/S)*Sqr(SigS/S);
VarQu:=y1+y3;
SigQu:=Sqr(VarQu);
Qmax:=f95*Qmax;
WTaver:=Qaver/Laver;
WTmax:=Qmax/Laver;
QAver:=QAver/u;
Qmax:=Qmax/u;
End;

Procedure Queue_StatisticsIII(t0,tQ,tz,T,beta,G,f,mu,u,S,SigS,SigMu : Real;
                             n : Integer;
                             var gama,QAver,Qmax,WTaver,WTmax : Real);

(* Used when tQ <= T , and t0 >= (2/3)* T *)

Var I,ItT,IC1,IC2 : Integer;
    xAver,LAver,QM,VarMu : Real;
    Sum1 : Double;
    xQu,Qu : Array[1..1000] of Real;
    x,S0,S1,S2,S3,S4,At0,Dt,VarQu,SigQu : Real;
    y1,y2,y3 : Real;
Begin
(* inicializando variáveis de saída *)
gama:=0.0;QAver:=0.0;Qmax:=0.0;WTaver:=0.0;WTmax:=0.0;
(* cálculo de lambda médio Laver, intervalo t0 < t <= T *)
Sum1:=f*(Sqr(Sqr(T-t0))/4-(2*T/3)*(T-t0)*Sqr(T-t0)+Sqr(T)*Sqr(T-t0)/2);
LAver:=Sum1/(T-t0);
ItT:=Trunc(T*60+0.5);
IC1:=0;IC2:=0;
For I:=1 to ItT do
Begin
x:=I/60;
if (x <= t0) then
Begin
xQu[I]:=x;
Qu[I]:=0;
IC1:=IC1+1;
End;
if (x > t0) then
Begin
xQu[I]:=x;
Qu[I]:=0.0;

```

```

End;
End;
Qaver:=0.0;
gama:=100;
xAver:=(tQ-t0)/2;
y1:=xAver*Laver;
y3:=n*(xAver/S)*Sqr(SigS/S);
VarQu:=y1+y3;
SigQu:=Sqr(VarQu);
Qmax:=1.96*SigQu;
WTaver:=0.0;
WTmax:=Qmax/Laver;
End;

Procedure curva_At(T,G,f : Real);
Var I,IfT : Integer;
    tt,y,S : Real;
Begin
IfT:=Trunc(60*T+0.5);
for I := 0 to IfT do
Begin
    tt:=I/60;
    tt:=T-tt;
    y:=G-f*(Sqr(Sqr(tt))/4-2*T*tt*Sqr(tt)/3+Sqr(T)*Sqr(tt)/2); (* A(t) *)
    CvAT[I]:=Trunc(y*10+0.5);
End;
(* Arquivo_Texto3(IfT); *)
End;

Procedure Busca_nQ(Var nQ : Integer);
Var eps,Difer : Real;
    y1,y2 : Real;
    n : Integer;
Begin
(* Determinação de nQ: para n >= nQ não há formação de filas, somente a
parcela devida às variações probabilística no entorno da média.
Isso ocorre quando t0 atinge o valor igual a 2*T/3 de T, e quando isso
acontece, a reta D(t) tangencia A(t) pelo lado superior de A(t), e assim não
ocorre cruzamento das curvas D(t) e A(t) *)
eps:=0.001;
for n := 1 to 100 do
Begin
Busca_t0(n,T,phi,f,t0);
y1:=t0;
y2:=2*T/3;

```

```

if(Abs(y1-y2) < eps) then
  Begin
    nQ:=n-1;
    Exit;
  End;
End;
End;
End;

Begin
  T:=8; (* Intervalo de tempo (horas) aberto para chegada de veículos de
abastecimento nas docas *)
  INT:= Trunc(T*60+0.5); (* Idem, expressed in minutes *)
  mu:= 642; (* average truck discharging rate: cartons/hour/truck *)
  SigMu:=191.24; (* desvio padrão de mu: cartons/hour/truck *)
  u:= 464.48; (* average truck load: number of cartons *)
  phi:=2/3; (* point where lambda(t) is maximum expressed as a fraction of T *)
  t4:=phi*T; (* time when lambda is maximum *)
  S:=43.8/60; (* vehicle expected unloading time (hours) *)
  SigS:=12.8/60; (* standard deviation of S (hours) *)
  G:=85000; (* total cargo handled per day at the terminal, expressed in cartons
*)
  f:=12*G/(Sqr(T)*Sqr(T));
  curva_lambda(T,G,f,LambdaM,LambdaMax);
  (* Dados_Similar_Lambda(T,G,f,u); *)
  (* curva_At(T,G,f); *)
  Busca_nQ(nQ);

  (* Analysis of different n settings, with 10 <= n <= nQ *)
  for n := 10 to nQ do
    Begin
      beta:=n*mu;
      Busca_t0(n,T,phi,f,t0);
      Busca_tQ(T,t0,G,f,beta,n,tQ);
      tZ:=T;
      if ((tQ <= T) and (t0 >= (2/3)*T)) then
        Begin
          Busca_tz(n,T,phi,t0,f,G,mu,tz);
        End;
      eps:=0.001;
      dd:=Abs(t0-(2/3)*T);
      if (tQ > T) then
        Queue_StatisticsI(t0,tQ,T,beta,G,f,mu,u,S,SigS,SigMu,n,gama,Qaver,Qmax,W
Taver,WTmax);
      if ((tQ <= T) and (dd > eps)) then

```

```

Queue_StatisticsII(t0,tQ,tz,T,beta,G,f,mu,u,S,SigS,SigMu,n,gama,Qaver,Qmax,
WTaver,WTmax);
  if ((tQ <= T) and (dd < eps))then
Queue_StatisticsIII(t0,tQ,tz,T,beta,G,f,mu,u,S,SigS,SigMu,n,gama,Qaver,Qmax
,WTaver,WTmax);
  (* Average door occupancy factor *)
  nd:=G/u; (*average number of discharges per day *)
  Tocup:=nd*S; (* total door occupancy time per day, hours *)
  Tsupply:=tQ*n; (* total door supply time per day, hours *)
  alpha:=100*Tocup/Tsupply; (* average door occupancy rate % *)
  (* Dock occupancy per day *)
  DocaHora:=tQ+S;
  If (DocaHora < T) then DocaHora:=T;
  DocaHora:=n*DocaHora;
  (* average time in the system *)
  WTsyst:=(WTaver+S)*(1-0.01*gama)+0.01*gama*S;
  Writeln; Writeln; Writeln;
  Writeln(' :35,' RESULTS ');Writeln;
  Writeln(' :5,'Number of discharging doors:                ',n:10);
  Writeln(' :5,'Average quantity of products discharged per day (cartons)
',G:10:0);
  Writeln;
  Writeln(' :5,'Average value of lambda (cartons/hour):
',LambdaM:10:2);
  Writeln(' :5,'Maximum value of lambda (cartons/hour):
',LambdaMax:10:2);
  Writeln(' :5,'Time span discharging dock operates (hr):                ',T:10:2);
  Writeln(' :5,'Instant when queue starts to grow (hr):                ',t0:10:2);
  Writeln(' :5,'Instant when the last truck starts to be discharged (hr): ',tQ:10:2);
  Writeln(' :5,'Average dock occupancy factor (%):                ',alpha:10:2);
  Writeln(' :5,'Percentage of trucks that do not enter the queue
',gama:10:2);
  Writeln(' :5,'Overall average n° of trucks in queue:                ',Qaver:10:2);
  writeln(' :5,'Maximum n° of trucks in the queue:                ',Qmax:10:2);
  Writeln(' :5,'Average truck waiting time (hr):                ',WTaver:10:2);
  Writeln(' :5,'Maximum truck waiting time (hr):                ',WTmax:10:2);
  Writeln(' :5,'Average truck time in the system(hr):                ',WTsyst:10:2);
  Readln;
End;
End.

```

## APÊNDICE B -

## Procedure utilizado na chegada dos caminhões na simulação

```

{$APPTYPE CONSOLE}
{$R *.res}

uses
  System.SysUtils;
const
  left = 1;
  right = 183; (* right = n° de caminhões que chegam durante período T *)
  T = 8.0;
  LambdaMax = 18666.66667;
  f = 246.09375;

type
  vetor = array [left .. right] of Real;

Var
  ArqT : Text;

procedure Sort(var vet: vetor; left: integer; right: integer);
(* Routine que determina uma sequência de instantes de chegadas, em ordem
   crescente, de acordo com a distribuição desenvolvida
   var vet: vetor -> Vetor do tipo Integer:
   left: integer -> posicao inicial do vetor
   right: integer -> posicao final do vetor *)
var
  i, j, k: Integer;
  meio, aux: real; {----**----}
begin
  i := left;
  j := right;
  k := (left + right) div 2;
  meio := vet[k];
  while (i < j) do
  begin
    while (vet[i] < meio) do
    begin
      i := i + 1;
    end;
    while (vet[j] > meio) do
    begin

```

```

    j := j - 1;
end;
if (i <= j) then
begin
    aux := vet[i];
    vet[i] := vet[j];
    vet[j] := aux;
    i := i + 1;
    j := j - 1;
end;
end;
if (j > left) then
    Sort(vet, left, j);
if (i < right) then
    Sort(vet, i, right);
end;

```

Procedure Arquivo\_Texto(vet: vetor; left: integer; right: integer);

Var Nome,SS : String[30];

I,Z : Integer;

(\* Creates a TEXT file containing Lambda values \*)

Begin

Nome:='LAMBDX.TXT';

Assign(ArqT, Nome);

ReWrite(ArqT);

for I:=Left to Right do

Begin

Z:=Trunc(vet[I]\*1000+0.5);

STR(Z:10,SS);

Write(ArqT,SS);

Writeln(ArqT);

Write(I:5,vet[I]:10:3,SS);

{Readln;}

End;

Close(ArqT);

End;

var

vet: vetor;

i: integer;

r,t1,t2,LamB,eps: Real;

Ok : Boolean;

begin

Randomize;



```

for I := left to Right do
Begin
  Ok:=False;
  while not Ok do
  Begin
    r:=Random;
    t1:=r*T;
    t2:=T-t1;
    Lamb:=f*(t2*Sqr(t2)-2*T*Sqr(t2)+Sqr(T)*t2);
    eps:=Lamb/LambdaMax;
    r:=Random;
    if (r <= eps) then
    Begin
      vet[I]:=t1;
      Ok:=True;
    End;
  End;
End;
Sort(vet, left, right);
for i := Left to Right do
begin
  { write(I:5,vet[i]:15,FormatFloat('0.0000', vet[i]):30);READLN; }
end;
(* É criado arquivo texto LAMBDX.TXT *)
(* para cada dia simulado, esta procedure é chamada e gera uma sequência
  de tempos de chegada em número igual à "right" *)
Arquivo_Texto(vet,left,right);
{Readln;}
end.

```

### Cálculo do tamanho da amostra

```
> pwr.t.test(d=0.8,power=0.95,type="one.sample")
One-sample t test power calculation
```

```

      n = 22.32455
      d = 0.8
sig.level = 0.05
  power = 0.95
alternative = two.sided

```

```
> amostra
```

```

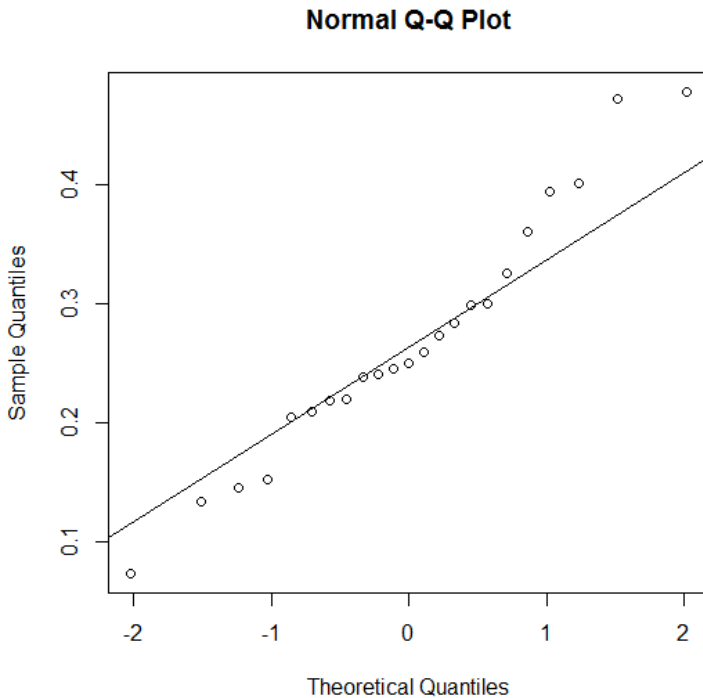
0.20517217 0.23844998 0.07385514 0.39388568 0.47764051 0.24133844
0.32588714 0.28427463 0.40133219 0.21946082 0.29898937 0.24517017
0.14600378 0.47147738 0.29978253 0.24956903 0.21862516 0.25978589

```

```
0.36006113 0.27372845 0.13364338 0.20893096 0.15195899
```

```
>
```

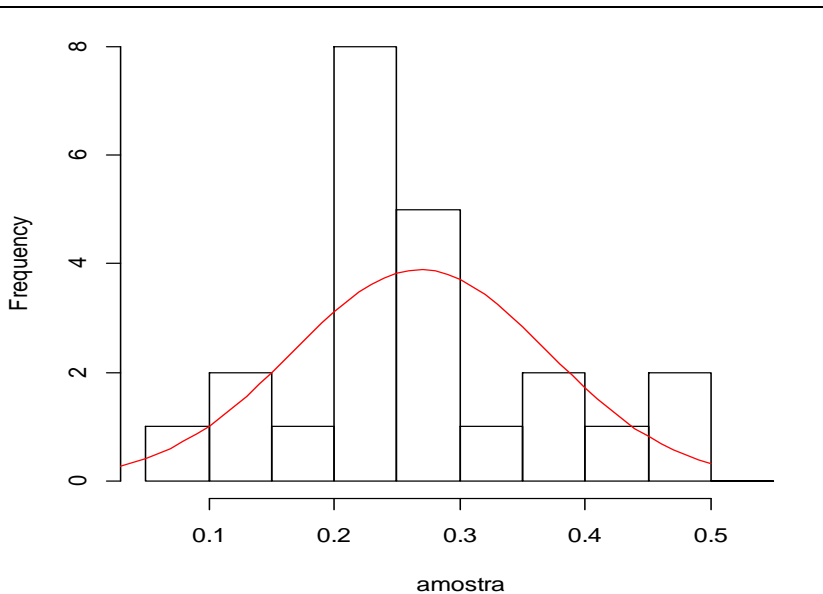
### Teste de normalidades do item 6.8.4



```
> stem(amostra,scale=2)
```

The decimal point is 1 digit(s) to the left of the |

```
0 | 7
1 | 3
1 | 55
2 | 112244
2 | 55678
3 | 003
3 | 69
4 | 0
4 | 78
```



```
> library(nortest)
> lillie.test(amostra)
```

### **Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) teste de normalidade**

```
data: amostra
D = 0.12, p-value = 0.5293
> ad.test(amostra)
```

### **Anderson-Darling teste de normalidade**

```
data: amostra
A = 0.33207, p-value = 0.4871
```

```
> cvm.test(amostra)
```

### **Cramer-von Mises teste de normalidade**

```
data: amostra
W = 0.055814, p-value = 0.414
```

**Cálculo do coeficiente correlação**

```

cor.test(tabelas$`Tempo de espera médio (h)___1`,tabelas$`Tempo de espera
médio (h)`
##
## Pearson's product-moment correlation
##
## data: tabelas$`Tempo de espera médio (h)___1` and tabelas$`Tempo de espera
médio (h)`
## t = 304.12, df = 18, p-value < 2.2e-16
## alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## 0.9997483 0.9999624
## sample estimates:
## cor
## 0.9999027
cor.test(tabelas$`Fila média (veículos)___1`,tabelas$`Fila média (veículos)`

```

Pearson's product-moment correlation

```

## data: tabelas$`Fila média (veículos)___1` and tabelas$`Fila média (veículos)`
## t = 155.25, df = 18, p-value < 2.2e-16
## alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## 0.9990346 0.9998558
## sample estimates:
## cor
## 0.9996268
cor.test(tabelas$`Tempo médio no sistema (h)___1`,tabelas$`Tempo médio no
sistema (h)`

```

Pearson's product-moment correlation

```

## data:tabelas$`Tempo médio no sistema (h)___1` and tabelas$`Tempo médio no
sistema (h)`
## t = 137.12, df = 18, p-value < 2.2e-16
## alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## 0.9987627 0.9998151
## sample estimates:
## cor
## 0.9995216
cor.test(tabelas$`Tempo total médio de utilização das docas
(h)___1`,tabelas$`Tempo total médio de utilização das docas (h)`

```

Pearson's product-moment correlation

```
## data: tabelas$`Tempo total médio de utilização das docas (h)`__1` and
tabelas$`Tempo total médio de utilização das docas (h)`
## t = 81.688, df = 18, p-value < 2.2e-16
## alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## 0.9965208 0.9994796
## sample estimates:
## cor
## 0.998654
cor.test(tabelas$`Taxa de ocupação média das docas (%)`__1`,tabelas$`Taxa de
ocupação média das docas (%)`)
```

Pearson's product-moment correlation

```
## data:tabelas$`Taxa de ocupação média das docas (%)`__1` and tabelas$`Taxa
de ocupação média das docas (%)`
## t = 61.289, df = 18, p-value < 2.2e-16
## alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## 0.9938341 0.9990767
## sample estimates:
## cor
## 0.9976126
```

### Medidas de Erros

```
library(MLmetrics)
## Attaching package: 'MLmetrics'
## The following object is masked from 'package:base':
##
## Recall
```

### Mean Absolute Error

```
MAE(tabelas$`Tempo de espera médio (h)`__1`,tabelas$`Tempo de espera médio
(h)`__1`)
## [1] 0.0275
MAE(tabelas$`Fila média (veículos)`__1`,tabelas$`Fila média (veículos)`__1`)
## [1] 1.053
MAE(tabelas$`Tempo médio no sistema (h)`__1`,tabelas$`Tempo médio no sistema
(h)`__1`)
## [1] 0.1285
```

MAE(tabelas\$`Tempo total médio de utilização das docas (h)` ,tabelas\$`Tempo total médio de utilização das docas (h)\_\_1`)

## [1] 0.188

MAE(tabelas\$`Taxa de ocupação média das docas (%)` ,tabelas\$`Taxa de ocupação média das docas (%)\_\_1`)

## [1] 2.235

### **Mean Absolute Percentage Error**

MAPE(tabelas\$`Tempo de espera médio (h)` ,tabelas\$`Tempo de espera médio (h)\_\_1`)

## [1] Inf

MAPE(tabelas\$`Fila média (veículos)` ,tabelas\$`Fila média (veículos)\_\_1`)

## [1] 0.2686367

MAPE(tabelas\$`Tempo médio no sistema (h)` ,tabelas\$`Tempo médio no sistema (h)\_\_1`)

## [1] 0.08646126

MAPE(tabelas\$`Tempo total médio de utilização das docas (h)` ,tabelas\$`Tempo total médio de utilização das docas (h)\_\_1`)

## [1] 0.01794599

MAPE(tabelas\$`Taxa de ocupação média das docas (%)` ,tabelas\$`Taxa de ocupação média das docas (%)\_\_1`)

## [1] 0.03330748

### **MeDIAN Absolute Error**

MedianAE(tabelas\$`Tempo de espera médio (h)` ,tabelas\$`Tempo de espera médio (h)\_\_1`)

## [1] 0.03

MedianAE(tabelas\$`Fila média (veículos)` ,tabelas\$`Fila média (veículos)\_\_1`)

## [1] 0.675

MedianAE(tabelas\$`Tempo médio no sistema (h)` ,tabelas\$`Tempo médio no sistema (h)\_\_1`)

## [1] 0.12

MedianAE(tabelas\$`Tempo total médio de utilização das docas (h)` ,tabelas\$`Tempo total médio de utilização das docas (h)\_\_1`)

## [1] 0.22

MedianAE(tabelas\$`Taxa de ocupação média das docas (%)` ,tabelas\$`Taxa de ocupação média das docas (%)\_\_1`)

## [1] 1.9

### **MeDIAN Absolute PERCENTAGE Error**

MedianAPE(tabelas\$`Tempo de espera médio (h)` ,tabelas\$`Tempo de espera médio (h)\_\_1`)

## [1] 0.07083333

```

MedianAPE(tabelas$`Fila média (veículos)`,tabelas$`Fila média
(veículos)__1`)## [1] 0.07192076
MedianAPE(tabelas$`Tempo médio no sistema (h)`,tabelas$`Tempo médio no
sistema (h)__1`)
## [1] 0.08205607
MedianAPE(tabelas$`Tempo total médio de utilização das docas
(h)`,tabelas$`Tempo total médio de utilização das docas (h)__1`)
## [1] 0.01993006
MedianAPE(tabelas$`Taxa de ocupação média das docas (%)`,tabelas$`Taxa de
ocupação média das docas (%)__1`)
## [1] 0.02617133

```

### Root Mean Square Error Loss

```

RMSE(tabelas$`Tempo de espera médio (h)`,tabelas$`Tempo de espera médio
(h)__1`)
## [1] 0.03122499
RMSE(tabelas$`Fila média (veículos)`,tabelas$`Fila média (veículos)__1`)
## [1] 1.316849
RMSE(tabelas$`Tempo médio no sistema (h)`,tabelas$`Tempo médio no sistema
(h)__1`)
## [1] 0.1423903
RMSE(tabelas$`Tempo total médio de utilização das docas (h)`,tabelas$`Tempo
total médio de utilização das docas (h)__1`)
## [1] 0.2188607
RMSE(tabelas$`Taxa de ocupação média das docas (%)`,tabelas$`Taxa de
ocupação média das docas (%)__1`)
## [1] 2.535646
##R2
R2_Score(tabelas$`Tempo de espera médio (h)`,tabelas$`Tempo de espera médio
(h)__1`)
## [1] 0.9988674
R2_Score(tabelas$`Fila média (veículos)`,tabelas$`Fila média (veículos)__1`)
## [1] 0.9886878
R2_Score(tabelas$`Tempo médio no sistema (h)`,tabelas$`Tempo médio no
sistema (h)__1`)
## [1] 0.9735804
R2_Score(tabelas$`Tempo total médio de utilização das docas
(h)`,tabelas$`Tempo total médio de utilização das docas (h)__1`)
## [1] 0.98828
R2_Score(tabelas$`Taxa de ocupação média das docas (%)`,tabelas$`Taxa de
ocupação média das docas (%)__1`)
## [1] 0.9157151

```