

Cross-Docking em centros logísticos de distribuição urbana: considerações sobre operação e modelagem

Antonio G.N. Novaes¹, Fabiana Takebayashi² e Roberta Briesemeister³

Resumo: Centros de Distribuição Urbana (CDUs) são terminais onde bens materiais, que circulam dentro da região central de uma cidade, são transportados por veículos de menor porte e de características sustentáveis. Tais terminais são operados usualmente na forma de *cross-docking*, onde os produtos são transferidos de caminhões maiores para veículos de distribuição local, e vice-versa. Neste artigo são feitas considerações técnicas de como os CDUs poderiam ser dimensionados, não somente considerando as partes internas do terminal, como também as docas de carga/descarga e o estacionamento externo para os veículos de carga. A metodologia proposta envolve modelos de filas de espera não tradicionais, cuja calibração envolve aproximações numéricas.

Palavras-chave: logística urbana, modelo de filas, *cross-docking*, dimensionamento de terminais.

Abstract: Urban Distribution Centres (UDCs) are terminals where goods, that are transported within a city's central core district, are carried by small size vehicles with sustainable characteristics. Such terminals are usually operated in the cross-docking pattern, where the products are transferred from larger trucks to local distribution vehicles, and vice-versa. In this paper, a technical discussion is performed on the way such UDCs could be dimensioned, considering not only their internal parts, but the unloading/loading docks and the outdoor parking lot for trucks as well. The proposed methodology comprises non-traditional queuing models, whose calibration requires numerical approximation methods.

Keywords: urban logistics, queuing models, cross-docking, terminal dimensioning.

1. INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é desenvolver modelos de fila de espera (Page, 1972; Fogliatti e Mattos, 2007) conjugados com modelos de simulação, que permitam analisar e dimensionar Centros de Distribuição Urbana (CDUs) operando na forma de *cross-docking*. Uma instalação desse tipo é uma plataforma onde se efetua a transferência de mercadorias provenientes de fora da região urbana para, em seguida, serem distribuídas na zona central da cidade. Nesse contexto, um importante elemento, interligando o transporte de carga de distâncias mais expressivas com um sistema de distribuição e coleta realizado por veículos que atendem à zona central da cidade, é formado por um ou mais CDUs (Taniguchi *et al.*, 2001; Boudouin, 2012).

Esse tipo de operação de terminais 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 dos modelos de filas tradicionalmente utilizados na análise de problemas logísticos e de transportes. A metodologia adotada no presente trabalho é a de selecionar os modelos probabilísticos mais próximos das formulações reais que

ocorrem nas operações de CDUs, e introduzindo coeficientes corretivos determinados através do processo de Monte Carlo (simulação).

O uso de CDUs está ligado à nova visão de *City Logistics* (Taniguchi *et al.*, 2001; Crainic *et al.*, 2009), englobando uma série de ações e estudos que visam melhorar o desempenho das atividades de distribuição de mercadorias nas cidades, através do aumento da eficiência do transporte urbano de carga, da redução de seus impactos no tráfego urbano, bem como através da melhoria das condições ambientais (redução da liberação de gases na atmosfera, redução de ruídos, melhoria da paisagem urbana, etc.).

Essa nova iniciativa foi provocada pelos crescentes volumes de carga movimentados nos centros urbanos e pelos impactos negativos por eles gerados. A especialização funcional das cidades, a manufatura com características globais, a expansão das atividades de serviço, como também o crescimento dos padrões de consumo, são fatores diretamente correlacionados à maior demanda por transporte rodoviário e de serviços logísticos nos centros urbanos e à maior frequência de entregas em geral (Dablanc, 2009).

2. CENTROS DE DISTRIBUIÇÃO URBANA (CDUS)

A ideia básica por trás da implantação de CDUs é criar uma transição de fluxos de cargas análoga à observada no transporte de passageiros, em que as pessoas chegam à cidade de trem, ônibus ou avião, se deslocam a um terminal urbano de metrô ou ônibus, e dali vão em direção a seus destinos (Dablanc, 2009). No caso do transporte de mercadorias, as empresas (indústrias e grandes varejistas) tradicionalmente localizam suas instalações em pontos diversos da malha urbana, sem quaisquer considerações para os fluxos de carga gerados. A regulamentação do uso do solo urbano reduziu, em parte, esse problema. Outras iniciativas podem também amenizar tais impactos: implantação de rodízios para caminhões (São Paulo e Cidade do México), cobrança

¹ Antonio G.N. Novaes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. (antonio.novaes@ufsc.br)

² Fabiana Takebayashi, Programa de Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. (fabitakebayashi@gmail.com)

³ Roberta Briesemeister, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. (roberta.briesemeister@ifsc.edu.br)

Manuscrito recebido em 26/05/2014 e aprovado para publicação em 18/02/2015.

Este artigo é parte de TRANSPORTES v. 23, n. 1, 2015. ISSN: 2237-1346 (online). DOI: 10.14295/transportes.v23i1.795

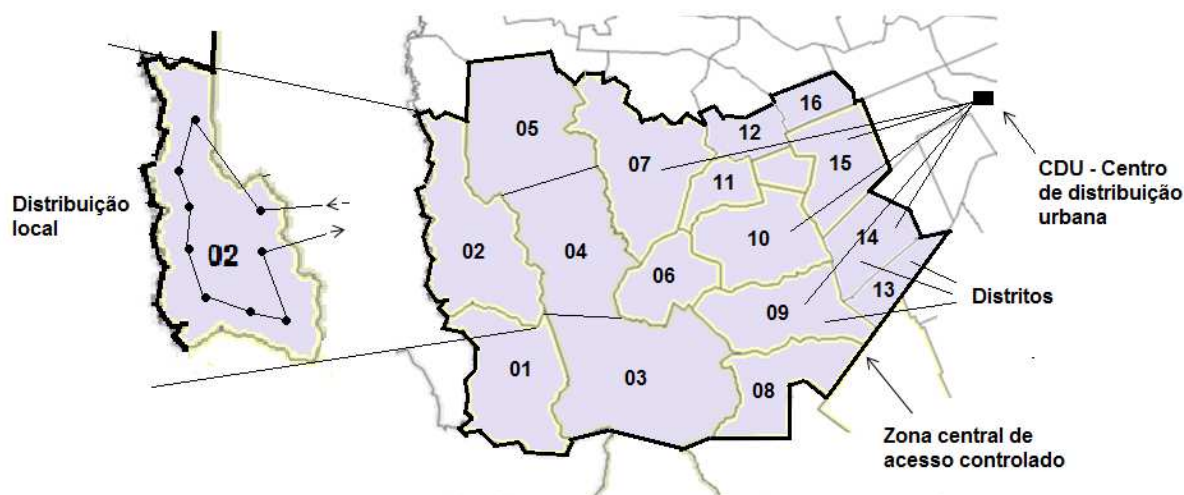


Figura 1. Esquema típico da operação de um CDU – Centro de Distribuição Urbana

Tabela 1. Variação do preço/m² de imóvel em função da distância à Praça da Sé (centro de São Paulo)

Distância à Praça da Sé (m)	Preço/m ² de imóvel relativo ao centro da cidade (%)
0	100,0
5.000	99,6
10.000	75,4
15.000	57,1
20.000	57,8
25.000	52,7

de pedágio em regiões centrais (Londres e Cingapura), entre outras. Mas as grandes cidades sofrem ainda, e de forma crescente, com o problema do tráfego de caminhões nas regiões urbanas, principalmente na área central das cidades (Dablanc, 2009). Como alternativa, a tendência atual, defendida dentro dos conceitos de *City Logistics*, é reagrupar os fluxos de carga de forma que sua distribuição urbana se dê dentro de um esquema operacional que reduza os tempos de deslocamento, diminua o número de caminhões nas ruas, e melhore as condições ambientais em termos de emissões de gases e ruídos (Taniguchi *et al.*, 2001). A adoção da analogia observada no transporte de passageiros, acima mencionada, pode melhorar, de muito, as condições ambientais urbanas. Para isso, as mercadorias que chegam à cidade são direcionadas a um ou mais CDUs, sendo transferidas para veículos menores e menos impactantes em termos de ocupação das vias e geração de poluentes e de ruídos (Taniguchi *et al.*, 2001; Boudouin, 2012).

De uma forma geral, a localização de um CDU tem as características mostradas na Figura 1. É normalmente instalado fora da região central, mas não muito distante dela, de forma a não aumentar demasiadamente as distâncias percorridas e, conseqüentemente, os tempos de deslocamento e os custos operacionais (Taniguchi *et al.*, 1999; Boudouin, 2012). Por outro lado, as dimensões físicas de um CDU são normalmente limitadas, pois os custos de aquisição de terreno são normalmente elevados. Biderman (2001) analisou a variação do preço/m² médio de imóveis em São Paulo, tomando como base dados levantados pela empresa Embraesp, em função da distância ao centro da cidade, a Praça da Sé (Tabela 1). Observa-se que uma instalação distante 10 km do centro da cidade teria uma redução média significativa no preço de aproximadamente 25%, enquanto uma localização a 5 km do ponto central mostraria

uma redução praticamente nula. Para contornar essas restrições, a solução é projetar os CDUs de forma a operar no esquema de *cross-docking*, o que exige menor área construída e de terreno (Boudouin, 2012).

Os veículos de maior porte, vindos de pontos distantes, ou de indústrias ou depósitos situados na vizinhança, trazem os produtos para o CDU, onde são desembarcados e transferidos para veículos de menor porte, geralmente dotados de características mais apropriadas às operações urbanas, como, por exemplo, tração elétrica ou a gás natural, facilidades de manobra e de carga/descarga, recursos tecnológicos, tais como computador de bordo, Sistema de Posicionamento Global (GPS), Tecnologia da Informação (TI), etc. A Figura 2 mostra, como exemplo, o veículo projetado pela Iveco (Quispel, 2002), para transporte urbano de mercadorias nessas novas condições.

Outro aspecto restritivo é a baixa disponibilidade de áreas de tamanho apropriado na zona urbana, não muito longe da região central. A maioria dos exemplos de projetos de *City Logistics* bem sucedidos no mundo envolve cidades médias. O CDU de Pádua, na Itália, com área de 1.000 m², e executando cerca de 60.000 entregas/coletas por ano, é um dos exemplos mais citados. Um programa de “Espaços Logísticos Urbanos”, lançado pela Agência do Meio Ambiente e da Matriz Energética (ADEME) da União Europeia, estabeleceu uma tipologia funcional desses espaços (Boudouin, 2012), procurando definir critérios para compatibilizar o ambiente urbano com as necessárias funcionais logísticas, inclusive localização, área do terminal, formas de operação, etc. Em especial, foram considerados os CDUs que atendem áreas urbanas mais restritas, basicamente as zonas centrais, envolvendo cidades médias tais como La Rochelle, na França, Mônaco, Pádua e Bristol (Patier e Toilier, 2012)

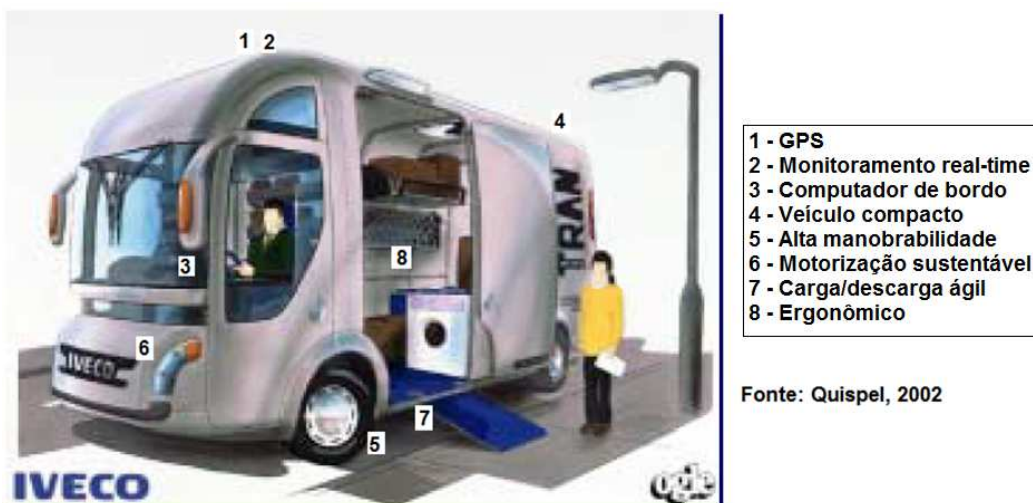


Figura 2. Veículo para distribuição urbana sustentável de produtos (Iveco Ecotran)
Fonte: Biderman (2001)

Mesmo exigindo áreas relativamente não muito expressivas, os custos financeiros e políticos de desapropriação de CDUs são muitas vezes elevados. Por essa razão, dentro dos conceitos modernos de *City Logistics*, um CDU deve adotar os princípios operacionais de *cross-docking* (Boudouin, 2012). Com isso, e em função da maior necessidade de se otimizar o fluxo de materiais no terminal e reduzir os estoques, é possível conseguir soluções logísticas mais econômicas, com áreas de manobra, de estacionamento e espaços construídos bem menores do que as alternativas de terminais tradicionais (Bartholdi III e Gue, 2004).

3. CROSS-DOCKING

3.1. Conceitos gerais

Cross-docking é um tipo de operação de terminal localizado numa rede de distribuição de mercadorias e exclusivamente voltado à transferência de cargas a partir de um tipo de veículo mais pesado para outro tipo de veículo de menor porte, de forma a não produzir estoques intermediários (Van Belle *et al.*, 2012). Em contraste com armazéns tradicionais, as operações de *cross-docking* procuram reduzir ao máximo a formação de estoques no terminal. Quando

um veículo do primeiro tipo chega ao terminal e não há fila de espera, é direcionado a uma posição na doca de recepção, onde é imediatamente descarregado. As peças que formam o lote são verificadas de forma a identificar seus destinos, representados usualmente por zonas ou distritos de entrega. As unidades assim identificadas são triadas e transferidas para os veículos de distribuição local, para serem imediatamente deslocados para os diversos pontos de entrega. A Figura 3 mostra uma representação esquemática de um terminal de *cross-docking* (Boysen e Fliedner, 2010).

Casos de sucesso na aplicação de *cross-docking* incluem redes varejistas como a Walmart, cadeias de supermercados, empresas de correio, *couriers* (remessas expressas) e operadores logísticos de carga fracionada (Boysen e Fliedner, 2010). No caso de cadeias supermercadistas, o sistema funciona da seguinte forma:

- A empresa supermercadista organiza a recepção de lotes de produtos, por parte de grandes fornecedores, em seu depósito central, dentro de horários previamente determinados;
- No horário previamente acertado, chega o caminhão da indústria fornecedora ao armazém central da empresa cliente;

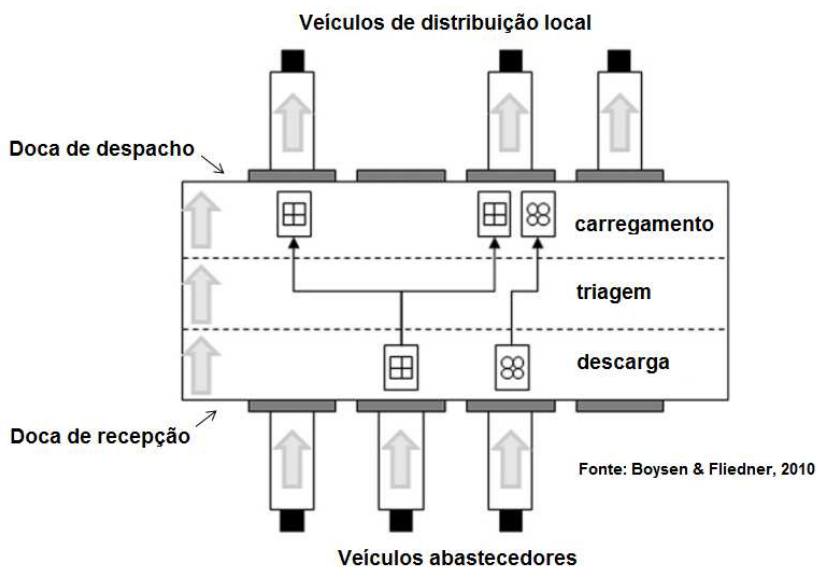


Figura 3. Representação esquemática de um terminal de tipo cross-docking

- 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 (Figura 3) 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.

Nesse tipo de operação, o estoque de produtos no terminal é praticamente zero, desde que o recebimento de insumos e os carregamentos nos veículos de distribuição sejam adequadamente sincronizados. Além disso, numa operação bem realizada de *cross-docking*, o abastecimento às lojas consegue também ser realizado em janelas de tempo pré-definidas. 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 tratamento da informação (TI). Esses aspectos, de grande importância nas operações de CDUs, serão tratados em maiores detalhes na Seção 5.

3.2. Tipos de modelagem nas operações de *cross-docking*

A literatura sobre *cross-docking* vem relatando o desenvolvimento e aplicações de diversos tipos de modelo voltados à análise e operações de *cross-docking*. Van Belle *et al.* (2012), apresentam conceitos atualizados sobre *cross-docking* e os fatores de sucesso em implantações desse tipo. Boysen e Flidner (2010) fazem uma revisão da literatura sobre *cross-docking*, como também desenvolvem um sistema de classificação das formas de programação de suas operações, adotando uma formulação semelhante à adotada na programação de máquinas de manufatura. Especificamente sobre uma revisão da aplicação de modelos matemáticos ao planejamento de operações de *cross-docking*, cita-se também o artigo de Agustina *et al.* (2010).

Outros autores (Vahdani e Zandieh, 2010; Soltani e Sadjadi, 2010, Boysen, 2010), por outro lado, procuram minimizar o tempo total de utilização do terminal, para isso organizando as chegadas dos veículos alimentadores e as partidas dos veículos de distribuição. Vahdani e Zandieh (2010), bem como Vis e Roodbergen (2008), admitem armazenagem intermediária de curta duração dentro do terminal, de forma a compatibilizar as operações de recepção e de despacho da carga. Já Soltani e Sadjadi (2010) utilizam dois métodos de solução meta-heurística: *simulated annealing*, de um lado, e uma técnica de *hybrid variable neighborhood search*, de outro.

Outro ferramental de grande utilidade nos estudos de *cross-docking* é a simulação, tendo em vista que os modelos matemáticos clássicos, principalmente os estocásticos, são

muitas vezes de difícil aplicação direta em alguns casos práticos. Os artigos de Gue e Kang (2001) e Arnaut *et al.* (2010) utilizam a técnica de simulação na análise de problemas específicos de *cross-docking*. As operações num terminal de *cross-docking* frequentemente geram filas de caminhões ao chegar, ou de *pallets* e pacotes, esses últimos esperando deslocamento dentro da instalação. Nesses casos podem ser utilizados modelos matemáticos de filas, como, por exemplo, nos artigos de Taniguchi *et al.* (1999), Bartholdi e Gue (2000); Gue e Kang (2001), e Bartholdi *et al.* (2008), ou conjugando-os com modelos de simulação, como é o caso do presente trabalho.

4. APLICAÇÃO DE MODELO DE FILA AO PROCESSO DE DESCARGA

Um veículo que chega ao CDU para descarregamento e encontra uma posição de atendimento não ocupada pode se dirigir diretamente a essa doca para descarregamento. Muitas vezes, no entanto, todas as posições de descarga estão ocupadas e o veículo deve entrar numa fila, recebendo, para isso, uma senha. Para o dimensionamento da área de recepção de carga na respectiva doca é necessário determinar o número de baias necessárias e, de forma concomitante, estimar o número de veículos na fila, para isso adotando-se um nível de serviço adequado, de forma a prever espaço para seu estacionamento. O número de posições de descarga em paralelo na doca de recepção é determinado pela aplicação de um modelo matemático de fila, ou por simulação.

4.1. Modelos clássicos de fila

A literatura sobre modelos clássicos de filas inclui vários livros, destacando-se Saaty (1961), Newell, (1971), Page (1972), Novaes (1975) e Fogliatti & 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. (Fogliatti & Mattos, 2007).

Um elemento importante nos modelos clássicos de filas é a notação de Kendall, que possibilita a classificação das filas de acordo com diversos fatores. Esses 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/C/∞/FIFO, na notação de Kendall, tem as seguintes características:

1. As chegadas dos elementos obedecem a um processo probabilístico de Poisson, que é representado pela letra M;
2. 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;
3. Existem C posições de atendimento operando em paralelo;

4. A capacidade do sistema de filas é infinita (∞), podendo receber um número não restrito de unidades que desejam ser atendidas pelo sistema;
5. A ordem de atendimento da fila é FIFO (First In, First Out), conceito em inglês que significa que o atendimento é realizado na ordem de chegada.

No caso de CDUs, os elementos que chegam ao terminal são os caminhões alimentadores, que trazem os produtos para serem distribuídos na região urbana central. O tipo de distribuição das chegadas pode ser Poisson, ou pode obedecer a outros tipos de distribuição. O atendimento, no caso de um CDU, 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.

Continuando nosso exemplo, na doca de recebimento são alocadas C posições de descarga para os veículos previstos para essa operação. Em seguida, na notação de Kendall acima indicada, não há restrição de espaço para os veículos que esperam na fila (capacidade ∞). De fato, o número de posições de estacionamento 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 é ministrado na ordem de chegada dos caminhões. Há, na literatura, muitas aplicações de modelos de fila, além das obras referenciadas.

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.

Taniguchi *et al.* (1999), analisando terminais urbanos de carga, admitem que os caminhões de abastecimento chegam de acordo com um processo de Poisson e cujos tempos de descarga na doca sejam regidos por uma distribuição de Erlang de ordem k , havendo C posições em paralelo na doca. Admitem também disponibilidade ilimitada de espaço para estacionamento, com hierarquia de recepção do tipo FIFO. Dessa forma, esses autores adotam uma fila do tipo $M/Ek/C/\infty/FIFO$, na anotação de Kendall, para analisar o processo de chegadas e atendimento de caminhões de abastecimento num terminal urbano de cargas. Na verdade, modelos teóricos de filas desse tipo geralmente não se aplicam ao dimensionamento de CDUs, 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 dos modelos clássicos. Três razões principais justificam essa afirmação. Em primeiro lugar, as operações de *cross-docking* são realizadas dentro de períodos de tempo pré-defi-

nidos (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 CDU pode variar significativamente ao longo do período de operação de *cross-docking*, situação esse 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 que haja operação de descarga sem que se observem novas chegadas (Figura 6). Esses aspectos serão discutidos em maiores detalhes nas próximas seções.

4.2. Aproximação contínua

Um elemento muito importante na operação de um CDU com *cross-docking* é a sincronia entre as operações de recebimento de mercadorias na doca de recepção (Figura 3) e o carregamento dos veículos de distribuição. Essa sincronia é necessária para reduzir praticamente a zero o estoque de mercadorias 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 entrega das mercadorias, visto que a carga permanece no terminal o mínimo tempo possível. Como já foi dito, operações não sincronizadas e a desarticulação entre as atividades dos diversos usuários 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 é mostrado um diagrama típico do processo de chegadas dos caminhões abastecedores no terminal, para uma operação de *cross-docking* programada.

O diagrama da Figura 4 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* num aeroporto, o esquema representa bem o comportamento humano quando há claros limites de atendimento em termos temporais (janela de tempo). Em primeiro lugar, há uma restrição limite para chegada ao sistema, não podendo ultrapassar um momento pré-definido (o instante t_2 , na Figura 4). Se fossem permitidas chegadas após o instante t_2 , não haveria tempo suficiente para descarregar, processar e carregar os veículos de distribuição antes do instante de partida t_3 .

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. Após esse instante, a preocupação dos motoristas em não perder o prazo de atendimento cresce, fazendo que a taxa de chegada diminua mais rapidamente, até que se torne zero no ponto t_2 . Pode haver variações do tipo de curva nas aplicações, mas o formato da Figura 4 exprime com razoável fidelidade o comportamento humano em casos semelhantes.

Observa-se que em situações desse tipo, com regras operacionais suficientemente rígidas, o processo estocástico de formação de filas pode não atingir o equilíbrio esta-

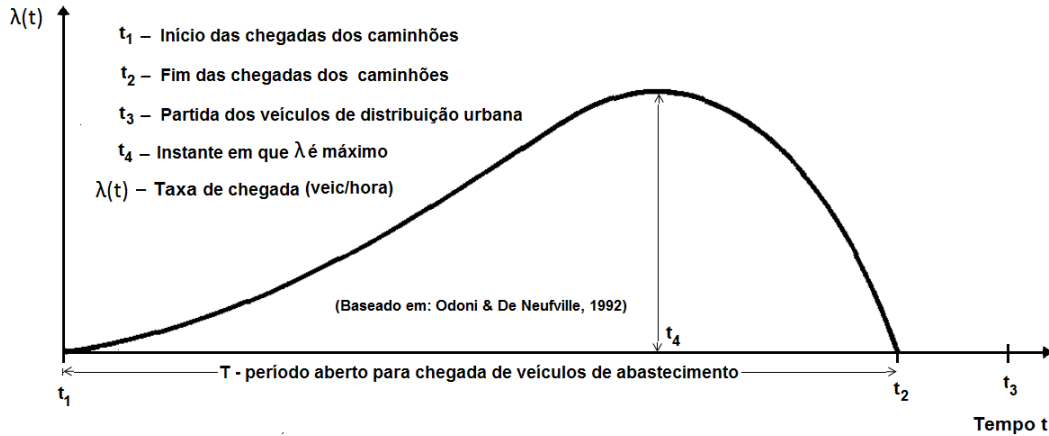


Figura 4. Processo de chegadas dos caminhões abastecedores ao CDU

cionário mencionado anteriormente para os modelos clássicos de fila (vide Seção 4.1). Torna-se então necessário aplicar um tipo de modelagem que não dependa do caráter estacionário do processo. Newell (1971) desenvolveu uma modelagem para esse tipo de problema bastante original e robusta, voltada à solução de problemas com filas em estados transientes ou supersaturados.

Newell (1971) adotou, em sua análise teórica, uma aproximação contínua em t , com uma função de segundo grau utilizada para representar $\lambda(t)$, com curvatura simétrica em relação ao ponto t_4 . Mas, como visto, o comportamento humano típico apresenta uma assimetria da curva em relação ao ponto t_4 (Figura 4). Como não foi encontrada na literatura uma curva como a da Figura 4, específica para chegadas de veículos num terminal de *cross-docking*, adotou-se o formato dessa figura como base para se definir uma representação paramétrica desse processo. Posteriormente, quando houver elementos de campo atualizados, dever-se-á rever o ajuste com vistas aos dados atualizados.

Conforme mencionado, Newell (1971) adotou uma aproximação baseada numa função de segundo grau. A observação mais detalhada da Figura 4 mostrou que um ajuste de uma função paramétrica do terceiro grau à curva da Figura 4 representa melhor o processo de chegadas, levando à seguinte formulação, com ótima aderência:

$$\lambda_0(x) = \alpha_0 x + \beta_0 x^2 + \gamma_0 x^3 \quad (1)$$

onde $\alpha_0 = -0,24667$, $\beta_0 = 0,16357$ e $\gamma_0 = -0,007274$ e com R^2 praticamente igual à unidade. Esse ajuste é paramétrico, com x variando entre zero e 100, e $\gamma_0(t)$ cobrindo a faixa de zero a 10. A correspondência entre x e t é linear, ou seja $t = t_1 + (t_2 - t_1)x/100$, levando à $x = 100x(t - t_1)/(t_2 - t_1)$, e, após substituições em (1), à seguinte expressão:

$$\lambda'(x) = \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3 \quad (2)$$

Suponhamos que, no período $t_1 - t_2$ vão ser atendidos V_C caminhões de abastecimento. Seja $\lambda(t)$ a função de distribuição das chegadas de veículos no terminal para essa situação. Deve-se observar a seguinte relação de equilíbrio:

$$\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt = V_C, \text{ onde} \quad (3)$$

$$\gamma(t) = \delta \gamma'(t) = \delta(\alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3) \quad (4)$$

sendo δ uma constante de proporcionalidade. Integrando $\lambda(t)$ e igualando à V_C , obtemos:

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} \lambda'(t) dt = \delta \left(\frac{\alpha(t_2^2 - t_1^2)}{2} + \frac{\beta(t_2^3 - t_1^3)}{3} + \frac{\gamma(t_2^4 - t_1^4)}{4} \right) = V_C \quad (5)$$

expressão essa que permite determinar o valor da constante para aplicação da expressão (4).

Definimos como $A(t) = \int_0^t \lambda(t) dt$, a curva que representa a demanda acumulada ao longo do tempo. Suponhamos, por outro lado, que a taxa média de descarga, numa posição de atendimento na doca de recepção, seja μ , medida em veículos por hora. Suponhamos também que haja C posições de atendimento na doca, operando em paralelo. Numa primeira aproximação, com o objetivo de estimar, a grosso modo, os parâmetros básicos do processo (principalmente o número C de posições na doca de descarga) admite-se inicialmente linearidade no processo de descarregamento (Newell, 1971). A oferta acumulada de serviço na doca de descarga é dada então pela expressão $D(t) = C\mu t$. A Figura 5 mostra o desenvolvimento, ao longo do tempo, dos fluxos acumulados de chegada e de atendimento dos veículos (Newell, 1971). Os caminhões vão chegando ao terminal aos poucos, a partir do instante t_1 (Figura 5). As C posições de atendimento estão todas disponíveis na doca de descarga desde o instante t_1 , não ocorrendo fila até o instante t_0 . Em t_4 se observa o valor máximo de $\lambda(t)$, caracterizado pela inflexão da curva de $A(t)$, que é a integral de $\lambda(t)$.

A fila de caminhões, expressa em número de veículos, é representada por $Q(t)$. sendo obtida para $t_0 \leq t \leq t_2$ através de

$$Q(t) = A(t) - D(t) = \int_{t_0}^t [\gamma(t) - C\mu] dt \quad (6)$$

Verifica-se matematicamente que o valor máximo de $Q(t)$, denominado Q_{MAX} , pode ser calculado impondo-se $\lambda(t) = C\mu$ (Newell, 1971), ou seja

$$\delta(\alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3) = C\mu \quad (7)$$

A expressão (7) possibilita determinar, em caráter preliminar, o número de posições de descarga na doca, dado por

$$C = \frac{\delta(\alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3)}{\mu}, \quad (8)$$

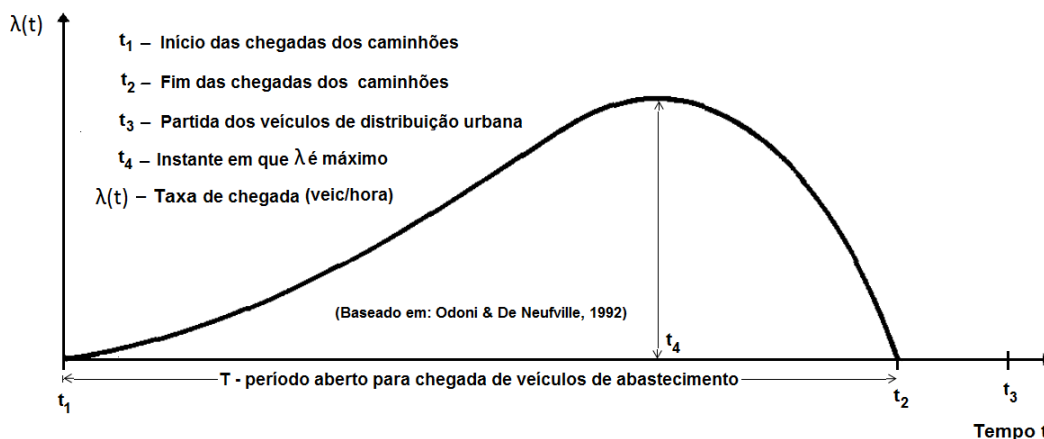


Figura 5. Curvas de fluxos acumulados de chegadas e de atendimento e eventos relevantes

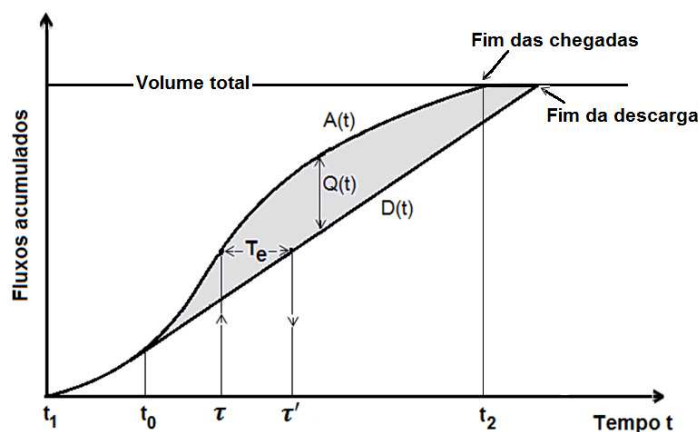


Figura 6. Determinação do tempo de espera na fila (T_e)

valor a ser arredondado para o inteiro imediatamente superior.

O tempo de espera dos veículos abastecedores na fila é estimado de acordo com a representação de T_e na Figura 6. Consideram-se os valores de t no intervalo $t_0 \leq t \leq t_2$, em que ocorre fila $Q(t)$. Para um valor genérico τ , determinamos $A(\tau)$ expresso pela integral da equação (4). Igualando essa integral através da expressão $D(t) = C\mu t$, e resolvendo a equação resultante em t , obtemos τ' (vide Figura 6). O tempo médio de espera na fila é dado pela integral de T_e no intervalo $t_0 \leq \tau \leq t_2$, dividido pela área hachurada na Figura 6, ou seja

$$E[T_e] = \frac{\int_{t_0}^{t_2} (\tau' - \tau) d\tau}{\int_{t_0}^{t_2} [A(\tau) - D(\tau)] d\tau} \quad (9)$$

Essa simplificação inicial do processo de formação da fila visa encurtar a aplicação do modelo de simulação a ser conjugado com o modelo de filas, pois, como é sabido, a utilização de simulação no estudo de problemas reais não indica antecipadamente qual a melhor escolha dos parâmetros, o que obriga a replicação das corridas simuladas de forma a cobrir um número grande de cenários. Estimando inicialmente os valores dos parâmetros através da aproximação de Newell (1971), pode-se ajustá-los posteriormente com o auxílio da simulação, através de um menor número de corridas.

Um elemento importante na análise de filas é o *índice de congestionamento do sistema*, que exprime a relação entre a demanda total dentro de um determinado horizonte de

tempo, e a respectiva oferta de serviço. O horizonte de tempo, neste caso, é o intervalo $t_2 - t_1$, como mostrado nas Figuras 5 e 6, correspondendo à duração total do processo de chegadas. A demanda, nesse período, é dada pelo número de veículos atendidos, que é igual a V_C . Cada posição, na doca de recepção, tem capacidade para descarregar μ caminhões por hora; assim, as C posições em paralelo podem descarregar $C\mu$ veículos por hora. A capacidade de descarga, no tempo $t_2 - t_1$, é, portanto, $C\mu(t_2 - t_1)$. Finalmente, o índice de congestionamento ρ é dado pela relação entre a demanda e a oferta, ou seja

$$\rho = \frac{V_C}{C\mu(t_2 - t_1)} \quad (10)$$

Para filas que atingem o estado estacionário, deve-se observar sempre $\rho < 1$, sob pena de o sistema ficar irremediavelmente saturado, sem condições práticas de operação. Para se garantir a restrição $\rho < 1$, é necessário escolher um valor de C adequado. Na prática, índices de congestionamento acima de 0,6 já podem ocasionar, em muitos casos, gargalos excessivos, que geram operações impraticáveis em processos estocásticos como o analisado neste texto (Novaes et al, 2009).

4.3. Estimativa do número máximo provável de caminhões na fila

Para o dimensionamento das posições de estacionamento destinadas aos caminhões de abastecimento, torna-se

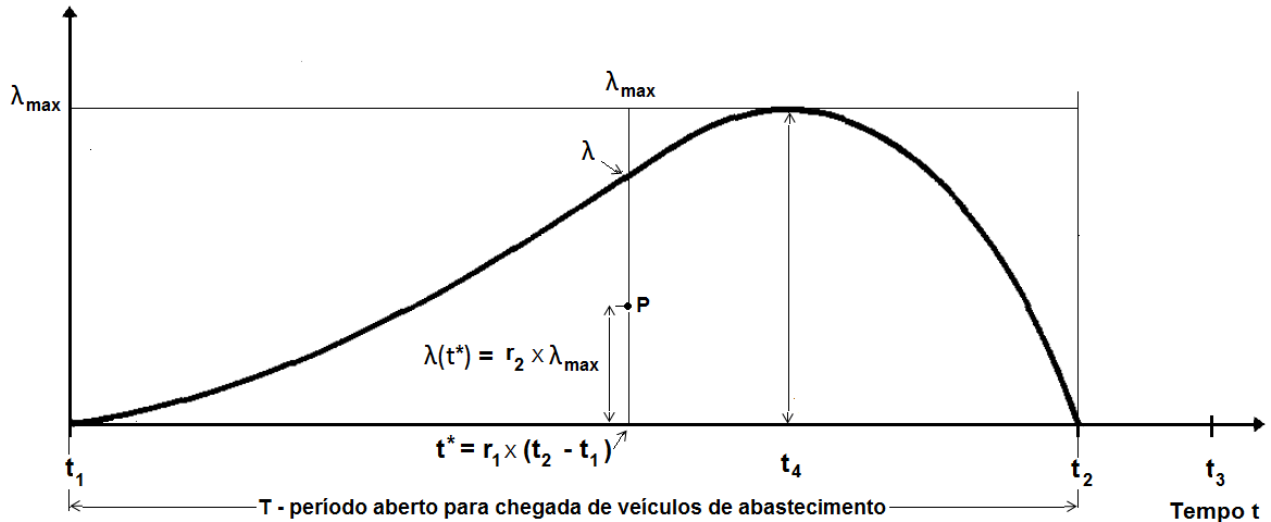


Figura 7. Diagrama referente ao processo de simulação dos instantes de chegadas

necessário estimar a fila de comprimento máximo que se forma no terminal. Como utilizamos uma aproximação não estocástica para determinar Q_{MAX} na Seção 4.2, adotamos outra aproximação para estimar Q'_{MAX} , que representa a fila máxima considerando os efeitos probabilísticos. Admitimos agora que a taxa média de chegada dos caminhões no terminal seja constante, ou seja $\lambda(t) \equiv cte \equiv \lambda$ para $t_1 \leq t \leq t_2$, obedecendo a um processo de Poisson. Ademais, como colocado na Seção 5, a distribuição dos tempos de atendimento na doca de recepção tende a ser uma exponencial negativa, com taxa μ em cada posição de descarregamento. Ou seja, segundo a nomenclatura de Kendall, o modelo de fila é $M/M/C/\infty/FIFO$.

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

$$\bar{W}_q = \frac{r^C \mu}{(C-1)!(C\mu - \lambda)^2} P_0 \quad (11)$$

onde é a probabilidade de haver zero-elementos na fila, dada por

$$P_0 = \left(\sum_{n=0}^{C-1} \frac{r^n}{n!} + \frac{C r^C}{C!(C-r)} \right)^{-1} \quad (12)$$

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, 2007):

$$W_q(t) = 1 - P_0 \frac{r^C}{C!(1-\rho)} \exp[-(C\mu - \lambda)^t] \quad (13)$$

onde $\rho = \lambda c \mu$. Admitindo nível de confiança de 98% (ou outro, dependendo das características específicas do problema e do nível de precisão necessário), faz-se $W_q(t) = 0,98$ na equação (13), que se torna:

$$P_0 \frac{r^C}{C!(1-\rho)} \exp[-(C\mu - \lambda)^t] = 0,02 \quad (14)$$

a qual, resolvida em t , fornece o valor $W_q^{(MAX)}$, o tempo máximo provável na fila. Admitimos, numa primeira aproximação, a seguinte relação:

$$\frac{Q'_{MAX}}{Q} \cong \frac{W_q^{(MAX)}}{W_q} = \varphi_1, \quad (15)$$

ou seja, a relação entre a fila máxima e a fila média é aproximadamente igual à relação entre os respectivos tempos. Ou seja, definimos um coeficiente de correção aproximado φ_1 dado por (15), possibilitando estimar a fila máxima esperada, incluindo os efeitos de aleatoriedade, através de

$$Q'_{MAX} \cong \varphi_1 \bar{W}_q \quad (16)$$

4.4. Uso da simulação para incorporar o efeito da aleatoriedade

A aplicação de ferramentas de simulação à análise de filas clássicas, como as abordadas na Seção 4.1, é relativamente simples. Neste caso específico, a única diferença observada é o processo de chegadas dos caminhões no terminal, que não obedece às formulações probabilísticas clássicas. Na realidade, o valor de C fornecido por (8) só considera os valores esperados do processo, não levando em conta a aleatoriedade das variáveis envolvidas. Newell (1971) se apoia em modelos utilizados em mecânica dos fluidos e aproximações difusas para analisar a aleatoriedade do sistema, mas vamos empregar aqui os recursos de simulação para introduzir tais efeitos em nossa análise. Vejamos então como proceder no que se refere a esse aspecto.

O valor máximo de $\lambda(t)$, representado por λ_{MAX} , é determinado derivando-se (4) em relação a t , e igualando a zero para obter o instante t_4 (Figura 4):

$$\frac{\partial \lambda(t)}{\partial t} = \delta(\alpha + 2\beta t + 3\gamma t^2) = 0, \quad (17)$$

e escolhendo a raiz positiva de (17) como valor de t_4 , compreendida no intervalo $t_1 \leq t_4 \leq t_2$, obtém-se

$$t_4 = \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 3\alpha\gamma}}{3\gamma} \quad (18)$$

Entrando com t_4 em (4), obtemos o valor de

$$\lambda_{MAX} = \delta(\alpha t_4 + \beta t_4^2 + \gamma t_4^3) \quad (19)$$

A simulação das chegadas de caminhões de abastecimento ao terminal é realizada, então, conforme a Figura 7, acompanhando a seguinte sequência (Larsen, 2001):

1. Gera-se um número aleatório r_1 , tal que $0 \leq r_1 \leq 1$, e determina-se o instante aleatório de chegada $t^* = r_1(t_2 - t_1)$, como mostrado na Figura 7;
2. A seguir, gera-se outro número aleatório r_2 , com $0 \leq r_2 \leq 1$, e calculamos $\lambda(t^*) = r_2 \lambda_{\text{MAX}}$; obtém-se assim o ponto P mostrado na Figura 7;
3. Se $\lambda(t^*) \leq \lambda$, como mostrado na Figura 7, ou seja, se o ponto P cair abaixo da curva ou sobre a mesma, aceita-se o instante de chegada t^* como válido; em contrapartida, se $\lambda(t^*) > \lambda$, rejeita-se o instante t^* e determina-se outro valor simulado de t^* , voltando então para o estágio (a);
4. O processo de simulação continua até que se tenha obtido um conjunto t_1, t_2, \dots, t_{V_C} de instantes simulados, num total de V_C amostras;
5. Ao fim, se aplica uma rotina de ordenamento (*sort*) das V_C chegadas t_1, t_2, \dots, t_{V_C} , segundo os valores crescentes de t^* . Esses valores são então utilizados na simulação propriamente dita da fila.

Uma vez realizada a simulação, determina-se o número máximo de elementos na fila (Q_{MAX}^*) obtido por meio desse segundo método. Tendo em vista os efeitos de aleatoriedade introduzida na simulação, deve-se observar ($Q_{\text{MAX}}^* > Q_{\text{MAX}}$, onde Q_{MAX} é o número máximo de elementos na fila estimado por meio da aproximação contínua (Seção 4.2). Replicando a simulação um número de vezes com os mesmos parâmetros de entrada, calcula-se uma amostra de valores de Q_{MAX}^* e, a seguir, sua média \bar{Q}_{MAX}^* . Em seguida, estimamos um fator de correção dado por

$$\varphi_2 = \frac{\bar{Q}_{\text{MAX}}^*}{Q_{\text{MAX}}} > 1. \quad (20)$$

Comparam-se os valores de φ_1 (vide seção 4.3) e de φ_2 , mas o coeficiente φ_1 tem a vantagem de ser calculado matematicamente e diretamente pelo computador, enquanto o segundo depende da obtenção de dados a partir de corridas de simulação, sendo de difícil extrapolação para casos diversos. Na prática, seria de bom alvitre adotar o primeiro coeficiente corretivo. Assim, podemos estimar o espaço necessário para estacionamento de caminhões de abastecimento no terminal, multiplicando o valor de Q_{MAX} , obtido pela aplicação da aproximação contínua, pelo fator de correção φ_1 , estimado conforme explicado na Seção 4.3.

5. DIMENSIONAMENTO INTERNO DO TERMINAL

5.1. Processo de descarga dos caminhões de abastecimento

A taxa μ de descarga dos caminhões abastecedores, expressa em veículos por unidade de tempo, depende de uma série de fatores, a saber:

1. Tipo e capacidade do veículo;
2. Quantidade de carga a descarregar, medida em peso, volume, ou unidades no caso de *pallets* ou outro tipo de carga unitizada;
3. Maior ou menor grau de uniformidade da carga. Volumes muito diferentes em termos de forma, tamanho, embalagem, etc., dificultam bastante a operação;
4. Tipo de rótulo nas informações anexadas às embalagens;
5. Equipamento utilizado na operação de descarga;
6. Treinamento do pessoal e número de pessoas alocadas à operação. Um número grande de pessoas designadas para esse tipo de serviço é muitas vezes prejudicial, em razão das interferências improdutivas entre os participantes, principalmente quando trabalhando com equipamentos eletromecânicos;

No caso de CDUs, e no que diz respeito aos itens (1) e (2), não há uniformidade na frota de caminhões de abastecimento que chegam ao terminal. Isso porque são de propriedade de empresas diversas, transportando cargas de tipos diversos, e com quantidades também não uniformes. Como resultado, os tempos de atendimento (isto é, os tempos de descarga dos veículos) são bastante aleatórios, sendo a distribuição probabilística exponencial negativa uma forte concorrente a representá-los estatisticamente, pois é a distribuição com maior coeficiente de variação quando as chegadas apresentam um valor médio constante ao longo do tempo. No entanto, como o valor esperado de λ não é constante no intervalo entre t_1 e t_2 (Figura 4), a distribuição Hyper-Poisson (Conway e Maxwell, 1962) pode ser a mais indicada, dependendo da aderência estatística aos dados.

Por outro lado, a eficiência operacional de um CDU depende muito do sistema de rotulagem das unidades de carga. O método mais eficiente está ligado ao uso de RFID (identificação por radiofrequência) 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.

Aqui, entra um elemento importantíssimo para o sucesso, ou não, de um projeto de logística urbana como o contemplado: é o nível de governança do projeto (Anand *et al.*, 2012; Trentini *et al.*, 2013). Se a organização do sistema não conseguir impor, com sua liderança e convencimento, a observância das diretrizes e regras do empreendimento, o nível de serviço tenderá a se nivelar por baixo, reduzindo de muito a eficiência global do projeto.

Ao fim, e dependendo das soluções conseguidas com a observância dos itens de 1 a 5 indicados acima, se terá, como resultado, um valor consentâneo para o parâmetro μ . E, deve-se lembrar de que, para um determinado volume de demanda, o valor da taxa média de descarga μ terá impacto no número C de posições que operam em paralelo na doca de recepção, bem como no número de posições de estacionamento no pátio externo, voltadas aos caminhões aguardando atendimento na doca. Como já mencionado, a área ocupada por um CDU deve ser a menor possível, em razão da disputa por espaço urbano e dos custos operacionais envolvidos, que devem ser minimizados.

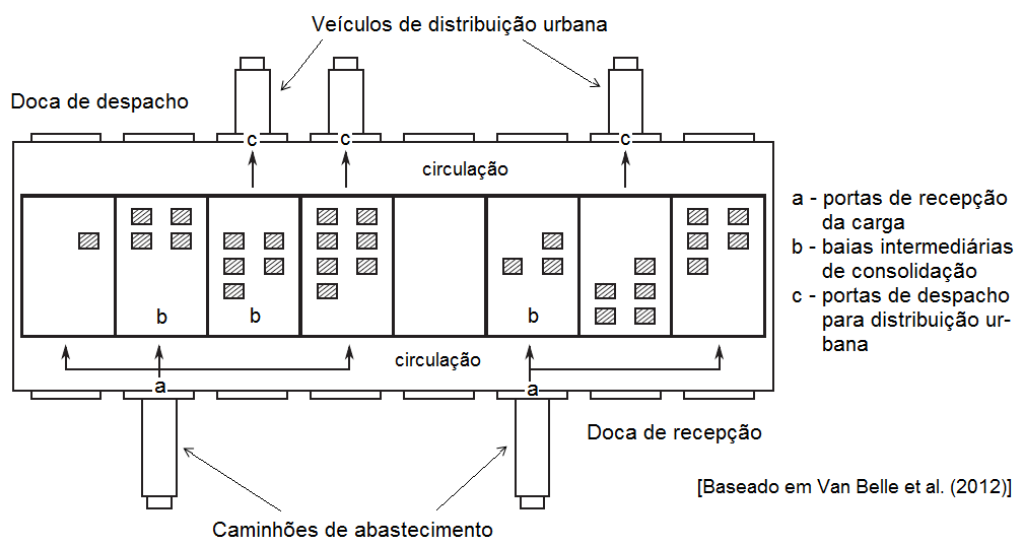


Figura 8. Cross-docking de um estágio

5.2. Número de estágios nas operações internas do terminal

Na Seção 3.1 foram descritos os conceitos gerais e as operações básicas num terminal em que se opera a modalidade de *cross-docking*. Um aspecto importante, que depende das características da carga e das formas de tratamento da informação, é o número de estágios operacionais que se observam desde o descarregamento dos caminhões abastecedores, até o carregamento final dos veículos de distribuição local (Mulcahy, 1994).

O *cross-docking* de um estágio (Van Belle *et al.*, 2012) corresponde à situação potencialmente mais eficiente, pois o tempo de permanência da carga no terminal e a área necessária para as operações tendem a ser menores. Os produtos são descarregados na doca de recepção e encaminhados diretamente para uma baía reservada, perto da doca de despacho voltada à distribuição urbana (Figura 8). Esse tipo de *cross-docking* é muito usado por cadeias de supermercado e grandes varejistas. Sua característica básica é a relativa uniformidade dos produtos recebidos em cada caminhão de abastecimento. Suponhamos, no exemplo do caso 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 *a* da doca de recepção (Figura 8), são conduzidos a uma baía *b*. Não existe uma identificação de destino individualizada pacote por pacote, pois os produtos de cada tipo são homogêneos dentro de cada categoria específica.

As lojas de destino são alocadas aos diversos roteiros, cada um deles realizados por um veículo de distribuição. O funcionário recebe o borderô referente ao carregamento de um determinado veículo, verifica quantas caixas, digamos, de leite em pó, serão carregadas, vai à baía 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 *pallets*, pois então se empregam equipamentos de melhor produtividade.

Mas, para isso, os volumes operados devem ser maiores, pois seria inadequado desfazer os carregamentos de *pallets* no terminal para separar produtos em pequenas quantidades, de forma a suprir destinos com menor demanda. O sistema operacional se torna ainda mais eficiente quando o fornecedor (a indústria, neste caso) envia antecipadamente, por meio da Internet ou por outro sistema de Tecnologia da Informação, todas as informações ao terminal. Assim, todos os borderôs estarão prontos quando a operação de descarga, na doca de recepção, se inicia, permitindo o imediato embarque nos veículos de distribuição, e assim reduzindo a ciclo operacional no terminal.

No *cross-docking* de dois estágios (Van Belle *et al.*, 2012), os produtos são descarregados na doca de recepção, onde as unidades são muitas vezes rotuladas com código de barras, e encaminhadas a uma baía de primeiro estágio b_1 (Figura 9), situada perto da doca de recepção. Na baía b_1 é feita a triagem dos produtos segundo o destino, sendo identificado, para cada unidade de carga, o veículo de distribuição correspondente. Em seguida, a unidade de carga é transferida para uma baía de segundo estágio b_2 , situada perto do veículo de distribuição, onde será posteriormente carregada (Figura 9).

Neste caso, as embalagens da carga não são diretamente carregadas no veículo a partir da baía b_1 , pois as unidades precisam ser selecionadas na ordem inversa de entrega, de forma a permitir ao motorista e ao ajudante a identificação imediata do produto ao abrir a porta da carroceria em cada destino. Assim, as unidades de carga aguardam, na baía b_2 a transferência de todos os produtos vindos da baía b_1 , para depois serem carregadas no veículo de distribuição a elas alocado, na ordem inversa de entrega. Essa situação ocorre quando a carga possui identificação específica segundo seu destino. O exemplo de carga courier é típica, quando cada pacote é identificado segundo um destino diferente. Mas ocorre também em transferências não homogêneas, quando as unidades de carga já vêm classificadas a partir de sua origem, indicando seu destino de forma individualizada.

Pode-se deduzir que um CDU, do tipo considerado nesta análise, terá provavelmente que adotar a solução de dois estágios. Isso porque as empresas abastecedoras do terminal serão necessariamente heterogêneas, com quantidades de carga bastante variáveis, o que obriga à rotulagem

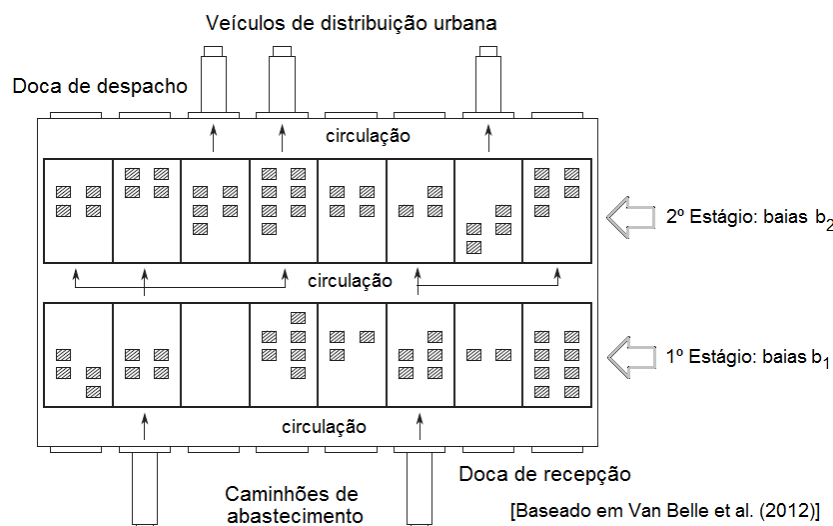


Figura 9. Cross-docking de dois estágios

individualizada das unidades de carga e ao carregamento não homogêneo dos veículos de distribuição.

5.3. Dimensionamento das baias

As dimensões das baias vão depender da quantidade de volumes operados, do seu volume, das dimensões e do tipo de manuseio da carga. Quando são utilizados equipamentos para deslocar a carga, tais como carrinhos, empilhadeiras, etc., é necessário prover maior espaço nas baias para permitir o tráfego desses aparelhos. Para situações operacionais clássicas, o livro de Falconer & Drury (1978) é bastante abrangente, não somente no que se refere ao dimensionamento das baias, como também no que diz respeito à circulação interna e externa, dimensionamento das docas, áreas de estacionamento, etc.

Para o caso de cargas unitizadas, principalmente quando acomodadas em *pallets*, é relatado na literatura um tipo especial de modelo de filas, denominado “*staging queues*”, ou filas em estágios (Bartholdi *et al.*, 2008; Gue & Kang, 2001). Nas filas usuais, formadas por seres humanos ou veículos, os elementos em espera caminham para a frente quando os elementos anteriores são atendidos (supondo disciplina FIFO de atendimento), desocupando espaços na fila. No caso de *pallets*, por outro lado, quando uma empilhadeira apanha uma unidade num certo ponto da baia, permanece o espaço anteriormente ocupado por ela, uma vez que os *pallets* não se movem sozinhos. Esse espaço pode ser ocupado posteriormente por outro *pallet*, mas num instante aleatório qualquer, olhando-se a baia, vai se observar um número apreciável de espaços vazios, os quais, ao fim, vão requerer uma área de projeto maior.

Uma prática bastante usada em tais situações é alocar uma empilhadeira, de tempos em tempos, para aglutinar os *pallets* restantes na baia, de forma a homogeneizar sua distribuição espacial no terminal. Pode-se utilizar também *flow racks* ou plataformas com roletes, quando se opera o terminal com *pallets*. No entanto, a utilização exclusiva de *pallets* em CDUs a serem implantados no Brasil não parece ser provável nas fases iniciais de operação, em razão da heterogeneidade das empresas e das mercadorias que farão uso do terminal.

6. CONCLUSÃO

Pela existência pouco expressiva de CDUs implantados no Brasil na data de hoje, pela diversidade das formas de operação desses terminais no mundo desenvolvido, e pela falta de dados operacionais mais específicos na literatura, torna-se muito difícil desenvolver aplicações reais detalhadas e voltadas a esse tipo de empreendimento. Os fatores que refletem os níveis de desempenho de um terminal do tipo CDU são diversos, e dependem de características técnicas, de um lado, das condições de governança e de cooperação entre os agentes participantes, de outro, bem como da existência de um ambiente político favorável.

Por envolver condições de operação especiais, como heterogeneidade nos tipos de carga, formas diversas no tratamento da informação e restrições espaciais para abrigar o terminal, entre outras, o analista se vê obrigado a dar uma atenção muito especial aos métodos de análise operacional e de projeto. Assim, a discussão metodológica desenvolvida neste artigo é uma primeira iniciativa voltada a definir um ferramental analítico mais abrangente, que possa nortear estudos sobre logística urbana no Brasil.

REFERÊNCIAS

- Agustina, D.; C.K.M. Lee e R. Piplani (2010). *A review: Mathematical Models for Cross Docking Planning*. International Journal of Engineering Business Management, v. 2 n. 2, p. 47-54. DOI: 10.5772/9717
- Anand, N.; Yang, M.; van Duin, J.H. e L. Tavasszy (2012). *GenCLOn: An Ontology of City Logistics*. Expert Systems with Applications, v. 39, p. 11944-11960. DOI: 10.1016/j.eswa.2012.03.068
- Antún, J.P. (2013). *Distribución Urbana de Mercancías: Estrategias con Centros Logísticos*. Nota Técnica # IDB-TN-167, BID – Banco Interamericano de Desarrollo.
- Arnaout, G.; E. Rodriguez-Velasquez; G. Rabadi e R. Musa (2010). *Modeling Cross-Docking Operations Using Discrete Event Simulation*. EOMAS'10 Proceedings of the 6th International Workshop on Enterprise & Organizational Modeling and Simulation, p. 113-120, Aachen, Alemanha.

- Bartholdi III, J. e K.R. Gue (2000). *Reducing Labor Costs in an LTL Crossdocking Terminal*. *Operations Research*, v. 48, p. 823-832. DOI: 10.1287/opre.48.6.823.12397
- Bartholdi III, e K.R. Gue (2004). *The Best Shape for a Crossdock*. *Transportation Science*, v. 38, n. 2, p. 235-244. DOI: 10.1287/trsc.1030.0077
- Bartholdi III, J.; K.R. Gue e K. Kang (2008). *Staging Protocols for Unit-Load Crossdocking*. In: Lahmar, M., *Facility Logistics*, Auerbach Publications, New York, NY, p. 153-171.
- Biderman, C. (2001). *Forças de Atração e Expulsão na Grande São Paulo*, Tese de Doutorado, EAESP, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, SP.
- Boudouin, D. (2012). *Methodological Guide: Urban Logistics Spaces*, CRET-LOG, Aix-Marseille, France.
- Boysen, N. (2010). *Truck scheduling at zero-inventory cross docking terminals*. *Computers & Operations Research*, V. 37, pp. 32-41. DOI: 10.1016/j.cor.2009.03.010
- Boysen, N. e M. Flidner (2010). *Cross Dock Scheduling: Literature Review and Research Agenda*. *Omega*, v. 38, p. 413-422. DOI: 10.1016/j.omega.2009.10.008
- Conway, R.W. e W.L. Maxwell (1962). *A Queuing Model with State Dependent Service Rates*. *Journal of Industrial Engineering*, v. 12, p. 132-136.
- Crainic, T.G.; N. Ricciardi e G. Storchi (2009). *Models for Evaluating and Planning City Logistics Systems*. Publication n° 2009-11, CIRRELT, Montreal, Canadá.
- Dablanc, L. (2009). *Freight Transport: A Key for the New Urban Economy*. The World Bank, *Freight Transport for Development: A Policy Toolkit*, July, 52 pgs.
- Falconer, P. e P. Drury (1978). *Almacenaje Industrial: Proyectos y Construcción para Almacenaje*, H. Blume, Madrid.
- Fogliatti, M.C. e N.M.C Mattos (2007). *Teoria de Filas*. Editora Interciência, Rio de Janeiro, RJ.
- Gue, K.R. e K. Kang (2001). *Staging Queues in Material Handling and Transportation Systems*. *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, Arlington, VA, EUA.
- Larsen, A., 2001. *The Dynamic Vehicle Routing Problem*. PhD Dissertation, Technical University of Denmark. Lyngby, Denmark. DOI: 10.1109/WSC.2001.977421
- Mulcahy, D. (1994). *Warehouse Distribution & Operations Handbook*. McGraw-Hill, New York, NY.
- Newell, G.F. (1971). *Applications of Queueing Theory*, Chapman and Hall, London, UK.
- Novaes, A.G. (1975). *Pesquisa Operacional e Transportes: Modelos Probabilísticos*. Editora McGraw-Hill do Brasil, São Paulo.
- Novaes, A.G.; Silva, V.M.D. e H. Rosa (2009). *Utilização de Modelos de Filas e de Simulação no Planejamento de Terminais Marítimos de Contêineres*, Anais do XXIII Anpet - Congresso Nacional de Ensino e Pesquisa em Transportes, Vitória, ES, Novembro 2009.
- Odoni, A.R. e R. De Neufville (1992). *Passenger Terminal Design*. *Transportation Research A*, v. 1, p. 27-35. DOI: 10.1016/0965-8564(92)90042-6
- Page, E. (1972). *Queueing Theory in OR*. Butterworths, Londres.
- Patier, D. e F. Toilier (2012). *Logistique Urbaine: Etat de l'Art en France et en Europe*, Laboratoire d'Economie des Transports, <[http://tmv.let.fr/documents/rapports/ Berlin2012.pdf](http://tmv.let.fr/documents/rapports/Berlin2012.pdf)>.
- Quispel, M. (2002). *Active Partnerships: The Key to Sustainable Urban Freight Transport*. *European Conference on Mobility Management*, Gent, Bélgica, 15 a 17 Maio.
- Saaty, T.L. (1961). *Elements of Queueing Theory, With Applications*. McGraw-Hill, New York, NY.
- Soltani, R. e S.J. Sadjadi (2010). *Scheduling Trucks in Cross-Docking Systems: A Robust Meta-Heuristics Approach*. *Transportation Research Part E*, v. 46, p. 650-666. DOI: 10.1016/j.tre.2009.12.011
- Taniguchi, E.; M. Noritake; T. Yamada e T. Izumitani (1999). *Optimal Size and Location Planning of Public Logistics Terminals*. *Transportation Research Part E*, v. 35, p. 207-222. DOI: 10.1016/S1366-5545(99)00009-5
- Taniguchi, E.; R.G. Thompson; T. Yamada e R. van Duin (2001). *City Logistics: Network Modelling and Intelligent Transport Systems*, Elsevier Science, Oxford, UK.
- Trentini, A.; Feliu, J.G. e N. Malhéné (2013). *Développement des Espaces Logistiques Urbains: CDU et ELP dans l'Europe du Sud-Ouest*, <www.rechercheisidore.fr/search/resource/?uri=10670/1.xr5kk2>.
- Vahdani, B. e M. Zandieh (2010) *Scheduling Trucks in Cross-Docking Systems: Robust Meta-Heuristics*. *Computers & Industrial Engineering*, v. 58, p. 12-24. DOI: 10.1016/j.cie.2009.06.006
- Van Belle, J.; P. Valckenaers e D. Cattrysse (2012). *Cross-Docking: State of the Art*. *Omega*, v. 40, p. 827-846. DOI: 10.1016/j.omega.2012.01.005
- Vis, I.F.A. e K.J. Roodbergen (2008). *Positioning of Goods in a Cross-Docking Environment*. *Computers & Industrial Engineering*, v.54, p. 677-689. DOI: 10.1016/j.cie.2007.10.004