

CROSS-DOCKING EM TERMINAIS LOGÍSTICOS DE DISTRIBUIÇÃO URBANA

Antonio G.N. Novaes

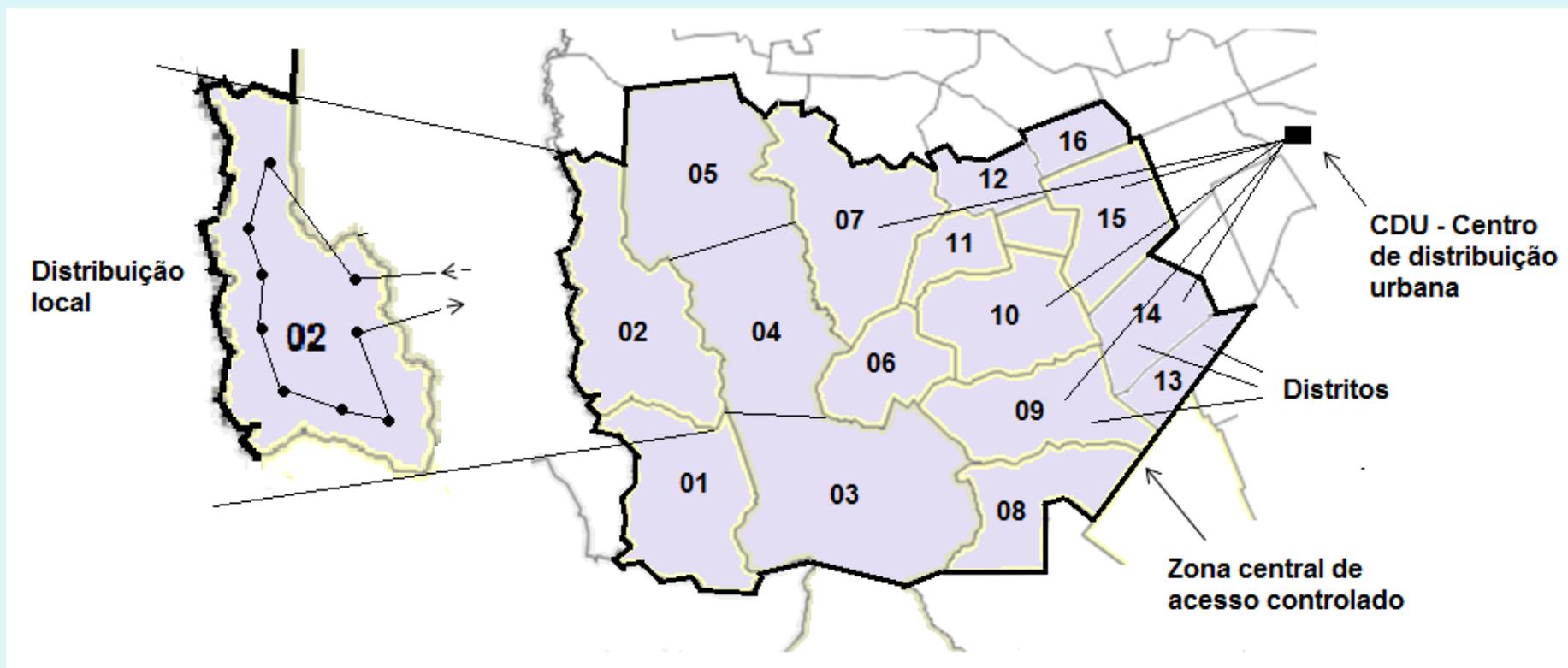
Fabiana Takebayashi

Roberta Briesemeister

Terminal Logístico de Distribuição Urbana (TLDU)

- Um Terminal Logístico de Distribuição Urbana (TLDU), na visão de City Logistics (Taniguchi et al., 1999; Boudouin, 2012), é usualmente instalado perto da região central da cidade, onde os produtos que vêm de fora, ou são coletados e vão para fora da cidade, são transferidos para/ou de veículos menores, apropriados para o tráfego central urbano (Figura 1).
- No projeto de tais TLDUs é muito importante evitar que haja filas excessivas de caminhões à espera de vagas para descarga de produtos ou de seu carregamento, pois isso ocasionaria congestionamento e até mesmo filas de veículos nas ruas próximas. O resultado, caso não haja uma forte racionalização, será uma inevitável explosão da entropia informacional do sistema.
- Nesta aplicação utilizaremos um modelo matemático simplificado de filas, juntamente com simulação.

Figura 1 - Esquema típico da operação de um TLDU



Modelos de filas: Fernando Pessoa X Newell?

- Muito embora modelos matemáticos mais complexos de filas sejam muitas vezes utilizados na prática (Novaes, 1975; Fogliatti e Mattos, 2007), utilizamos aqui uma aplicação matemática aproximada, e muito engenhosa do Professor de Stanford, Gordon Newell (1971), para resolver o problema em questão.
- Como assinalei no Prefácio do texto de Fogliatti e Mattos alguns anos atrás, e me apoiando num poema de Fernando Pessoa: “*O Binômio de Newton é tão belo como a Vênus de Milo, O que há é pouca gente para dar por isso...*”, agora não estou mais tão interessado em enaltecer a beleza da matemática, principalmente em coisas práticas como esta. E portanto, sem querer reduzir os méritos de Fernando Pessoa, quem aprecio muito, fico agora com Newell.

O papel da Governança na implementação e operação de um TLDU

Uma instalação TLDU é uma plataforma de transferência de mercadorias provenientes de fora da região central urbana (e vice-versa) para, em seguida, serem distribuídas ou coletadas em distritos, na parte central da cidade. Essa forma de operação é um importante meio de interligação do transporte de carga à distâncias mais expressivas, com um sistema de distribuição e coleta realizado por veículos que atendem à zona central da cidade, e formado por um ou mais TLDUs (Taniguchi *et al.*, 2001; Boudouin, 2012).

A organização e a coordenação das chegadas de veículos e das demais atividades nesse tipo de terminal (Governança) 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.

TLDUs e City Logistics

O uso de TLDUs está ligado à 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 regiões centrais das 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.).

Outra visão de TLDUs (Dablanc)

- A ideia básica por trás da implantação de TLDUs é criar uma transição de fluxos de carga 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). Além do crossdocking, outras iniciativas podem também amenizar tais impactos: implantação de rodízios para caminhões (São Paulo e Cidade do México), cobrança 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). Daí a necessidade de TLDUs em muitos casos.

Custo elevado do m² de terreno nas áreas centrais

Mesmo exigindo áreas relativamente não muito expressivas, os custos financeiros e políticos de desapropriação de áreas para os TLDUs são muitas vezes elevados. Por essa razão, dentro dos conceitos modernos de *City Logistics*, um TLDU 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 manuseio, circulação, estacionamento bem menores do que as alternativas de terminais tradicionais (Bartholdi III e Gue, 2004).

Variação do preço de terreno no centro da cidade

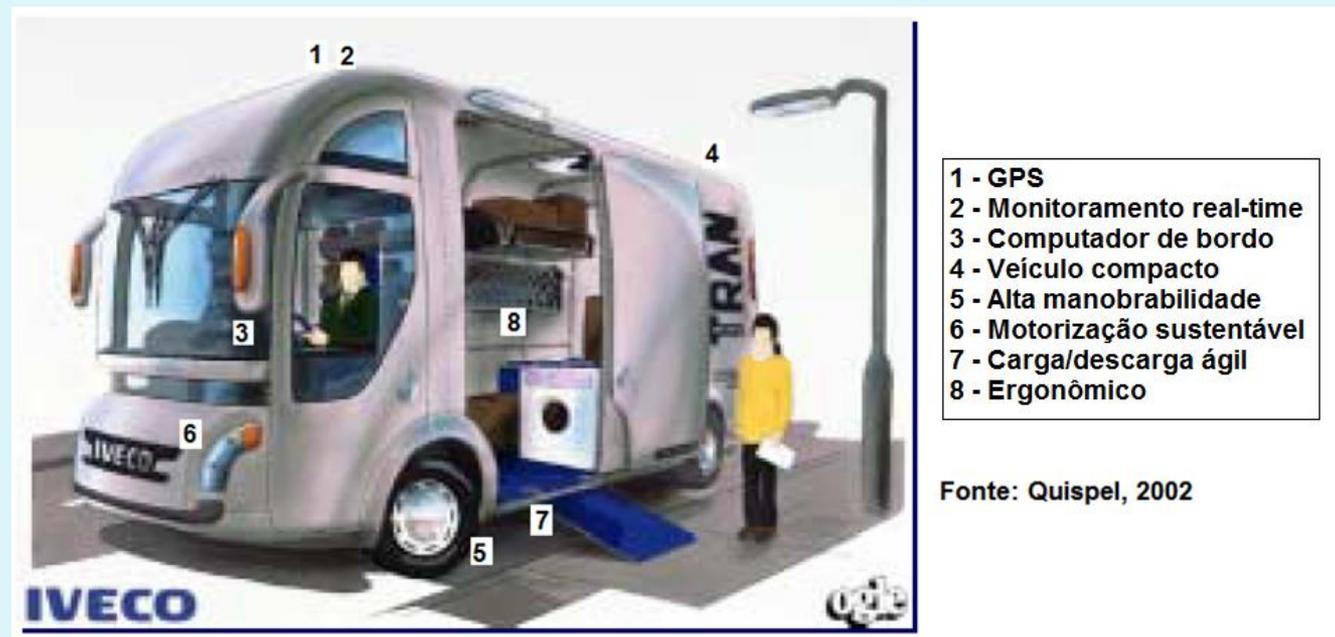
Por outro lado, as dimensões físicas de um CDU são normalmente limitadas, pois os custos de aquisição de terreno são normalmente elevados. Biderman (2001) analisou a variação do preço/m² médio de imóveis em São Paulo, tomando como base dados levantados pela empresa Embraesp, em função da distância ao centro da cidade, a Praça da Sé. 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).

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

Os veículos de menor porte, utilizados na coleta/distribuição de produtos nos distritos centrais da cidade, seriam geralmente dotados de características mais apropriadas às operações urbanas, como, por exemplo, tração elétrica, facilidades de manobra e de carga/descarga, recursos tecnológicos como computador de bordo, GPS, etc. A Figura 2 mostra, como exemplo, o veículo projetado pela Iveco (Quispel, 2002), para transporte urbano de mercadorias dentro dessas novas condições.

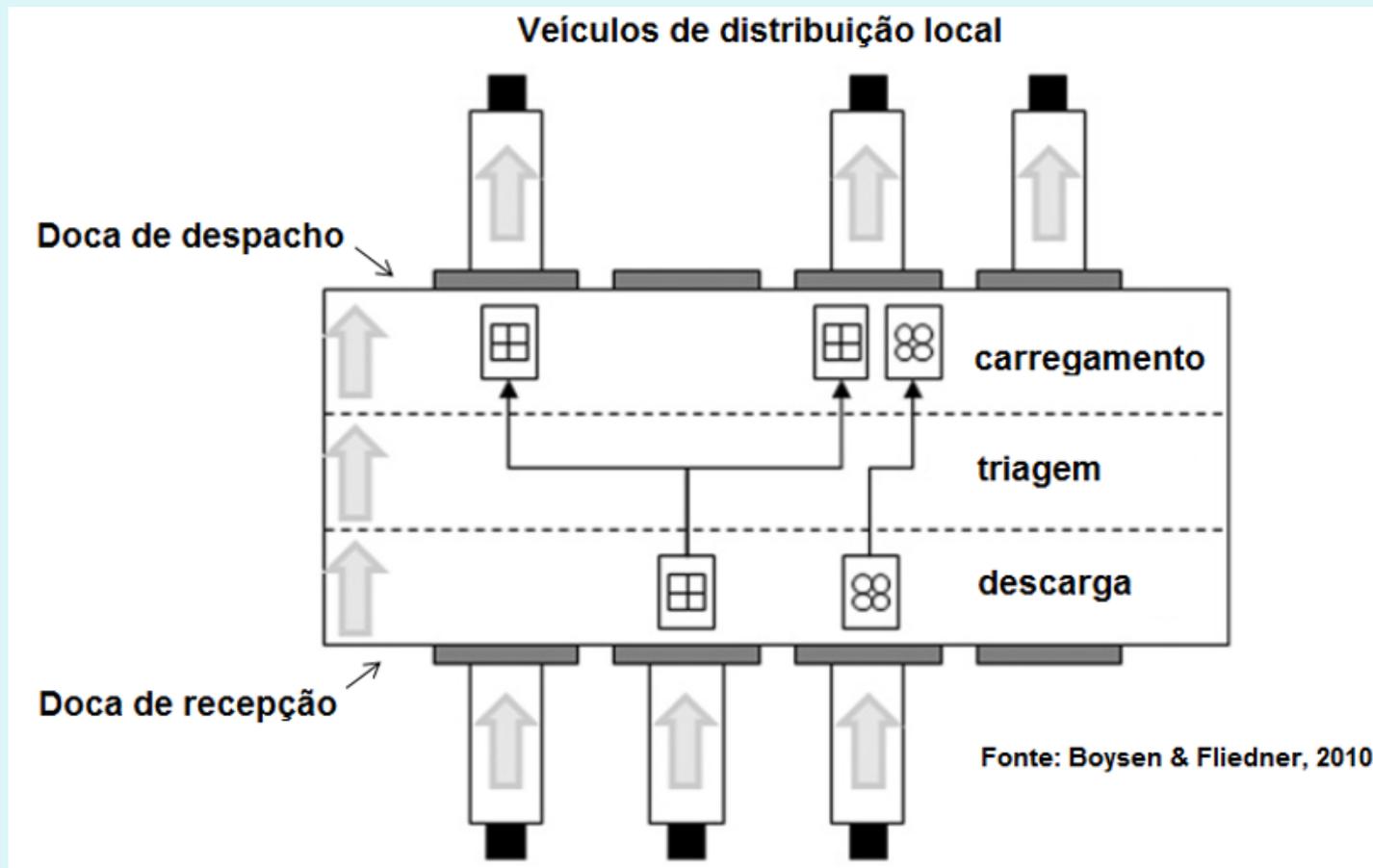
Figura 2 – Veículo para distribuição urbana sustentável de produtos (Iveco Ecotran)



Crossdocking

- Em contraste com armazéns tradicionais, as operações de *cross-docking* procuram reduzir ao máximo a formação de estoques no terminal. Quando um veículo proveniente de um fornecedor 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 têm verificados seus destinos, representados por zonas ou distritos de entrega e o endereço final da entrega. As unidades assim identificadas são triadas e transferidas para os veículos de distribuição local, para serem imediatamente deslocados para os diversos pontos de distribuição. A Figura 3 mostra uma representação esquemática de um terminal de *cross-docking* (Boysen e Fliedner, 2010).

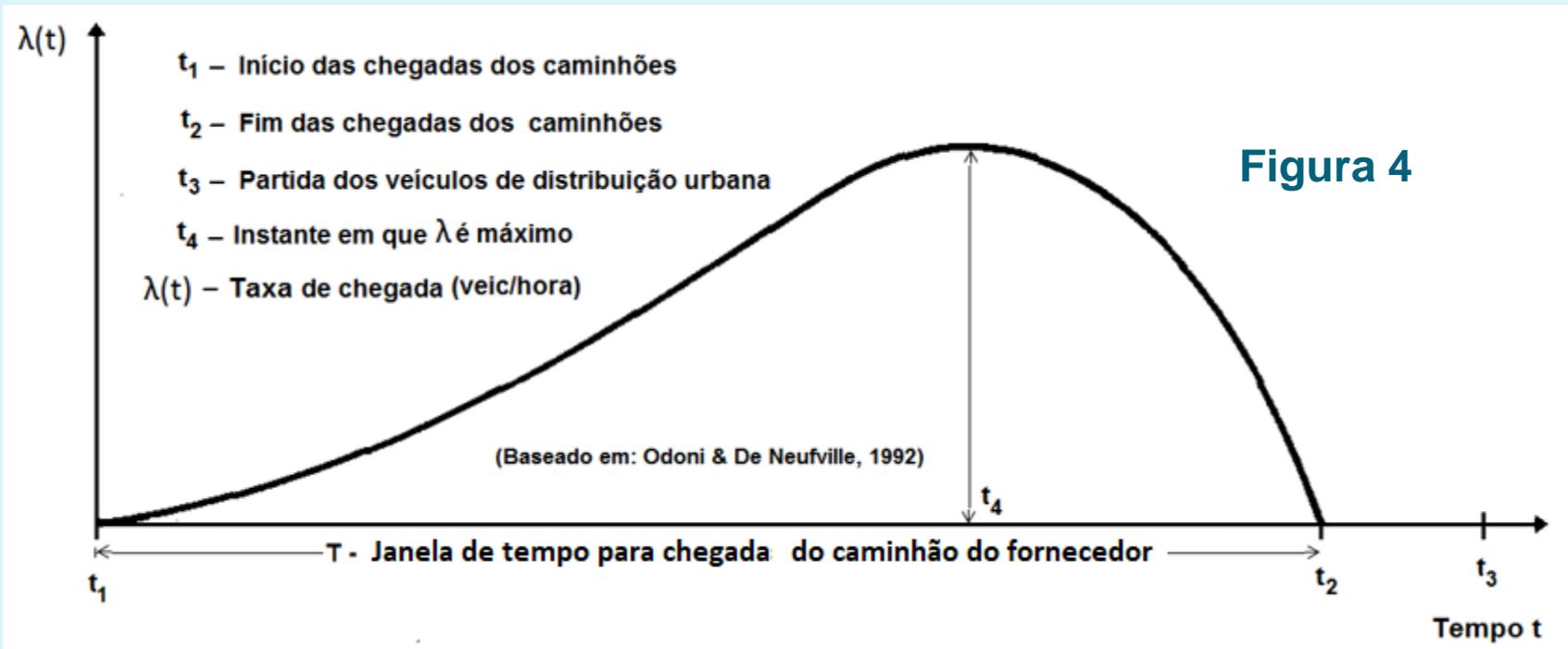
Figura 3 – Representação esquemática de um terminal *crossdocking*



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*, a descarga dos veículos fornecedores deve ser realizada 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).

Processo de chegada dos caminhões fornecedores de produtos

- Um veículo de maior capacidade que chega ao TLDU para descarregamento de produtos de um fornecedor externo deve observar uma janela de tempo rígida (Figura 4).



Processo de chegada dos caminhões fornecedores ao TLDU

- 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 .

Aproximação de Newell (1971)

- 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 (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, usualmente, o comportamento humano apresenta uma assimetria da curva em relação ao ponto t_4 (Figura 4).

Aproximação de Newell (cont.)

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:

$$\lambda(t) = \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3. \quad (1)$$

Aproximações matemáticas

- Suponhamos que, no período $t_1 - t_2$ vão ser atendidos V 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:

- $$\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt = V \quad (2)$$

- Definimos como $A(t) = \int_0^t \lambda(t) dt$, a curva que representa a demanda acumulada ao longo do tempo.

Modelagem aproximada da fila de caminhões fornecedores

- 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 os parâmetros básicos do processo (principalmente o número C de posições na doca de descarga) admite-se linearidade no processo de descarregamento (Newell, 1971). A oferta acumulada de serviço na doca de descarga é dada então pela expressão $D(t) = C \mu t$.

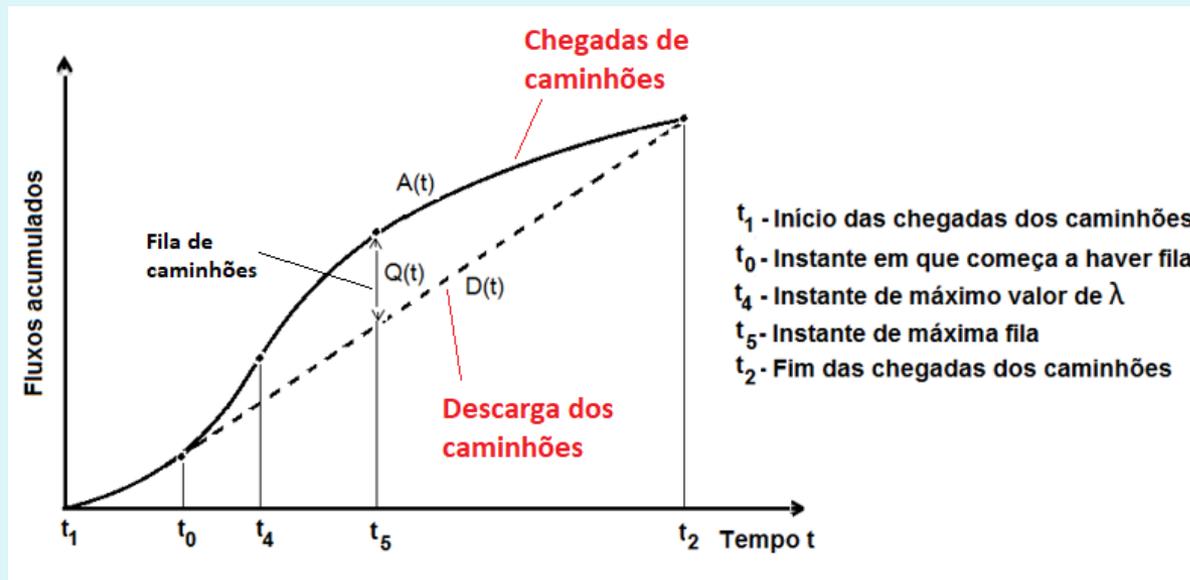


Figura 5

Estimativa do nº de baias de recepção para caminhões fornecedores

• 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

$$\bullet \delta (\alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3) = C \mu \quad (5)$$

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

$$\bullet C = \delta (\alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3) / \mu, \quad (6)$$

• 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. O tempo médio de espera na fila é dado por

$$\bullet E[T_e] = \frac{\int_{t_0}^{t_2} (\tau' - \tau) d\tau}{\int_{t_0}^{t_2} [A(\tau) - D(\tau)] d\tau} \quad (7)$$

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.

Inserindo aleatoriedade no método de Newell

- Na aproximação de Newell a estimativa do nº de baias C , fornecido por (6) só considera os valores médios do processo, não levando em conta a aleatoriedade da variável. 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 (1) em relação a t , e igualando a zero para obter o instante t_4 (Figura 4)

- $$\frac{\partial \lambda(t)}{\partial t} = \delta (\alpha + 2\beta t + 3\gamma t^2) = 0, \quad (8)$$

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

- $$t_4 = \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 3\alpha\gamma}}{3\gamma}. \quad (9)$$

- Entrando com t_4 em (1), obtemos o valor de λ_{MAX}

- $$\lambda_{MAX} = \delta (\alpha t_4 + \beta t_4^2 + \gamma t_4^3) \quad (10)$$

Inserindo aleatoriedade no método de Newell

- Na aproximação de Newell a estimativa do nº de baias C , fornecido por (6) só considera os valores médios do processo, não levando em conta a aleatoriedade da variável. 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 (1) em relação a t , e igualando a zero para obter o instante t_4 (Figura 4)

- $$\frac{\partial \lambda(t)}{\partial t} = \delta (\alpha + 2\beta t + 3\gamma t^2) = 0, \quad (10)$$

- e escolhendo a raiz positiva de (10) como valor de t_4 , compreendida no intervalo $t_1 \leq t_4 \leq t_2$, obtem-se

- $$t_4 = \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 3\alpha\gamma}}{3\gamma}. \quad (11)$$

- Entrando com t_4 em (1), obtemos o valor de λ_{MAX} (8)

- $$\lambda_{MAX} = \delta (\alpha t_4 + \beta t_4^2 + \gamma t_4^3) \quad (12)$$

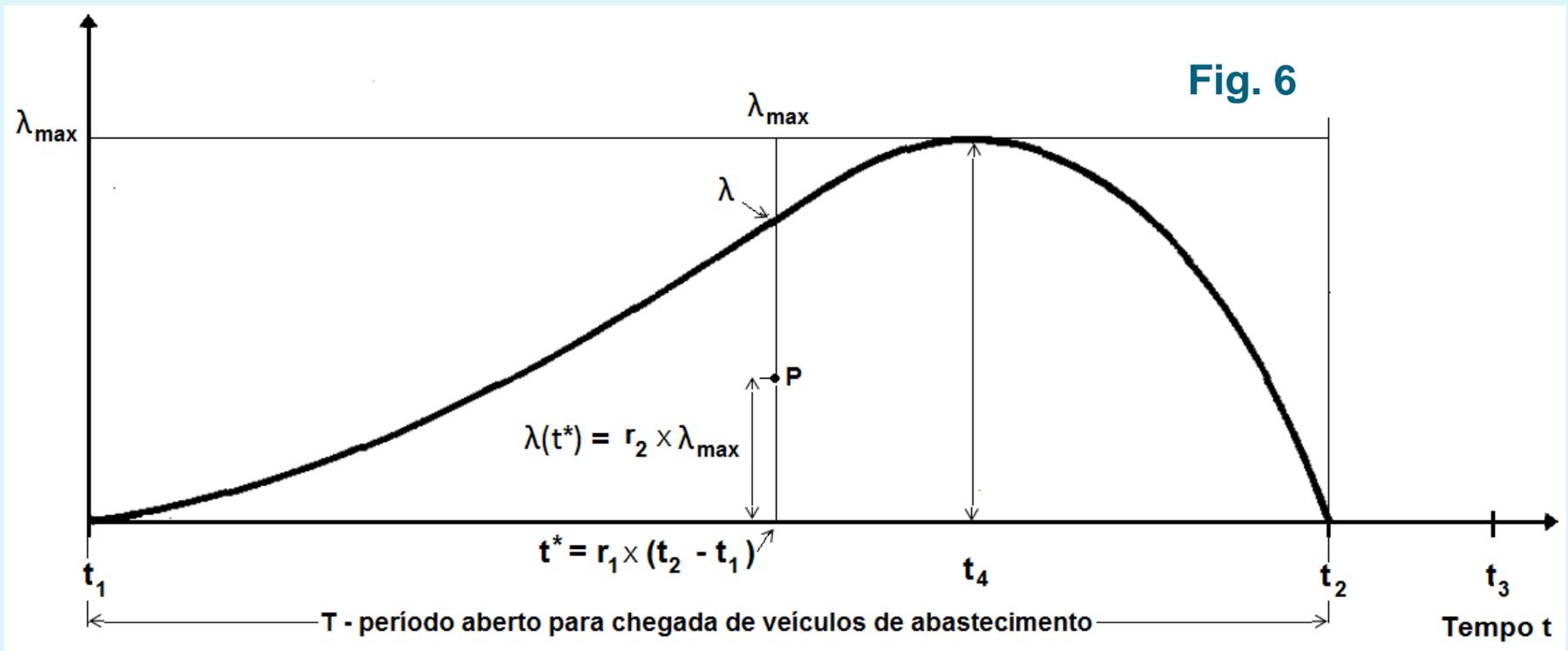
Estimativa do número máximo de caminhões na fila

- $$\frac{Q'_{MAX}}{\bar{Q}} \cong \frac{W_q^{(MAX)}}{\bar{W}_q} = \varphi_1, \quad (8)$$

- 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 (8), possibilitando estimar a fila máxima esperada, incluindo os efeitos de aleatoriedade, através de

- $$Q'_{MAX} \cong \varphi_1 \bar{W}_q \quad (9)$$

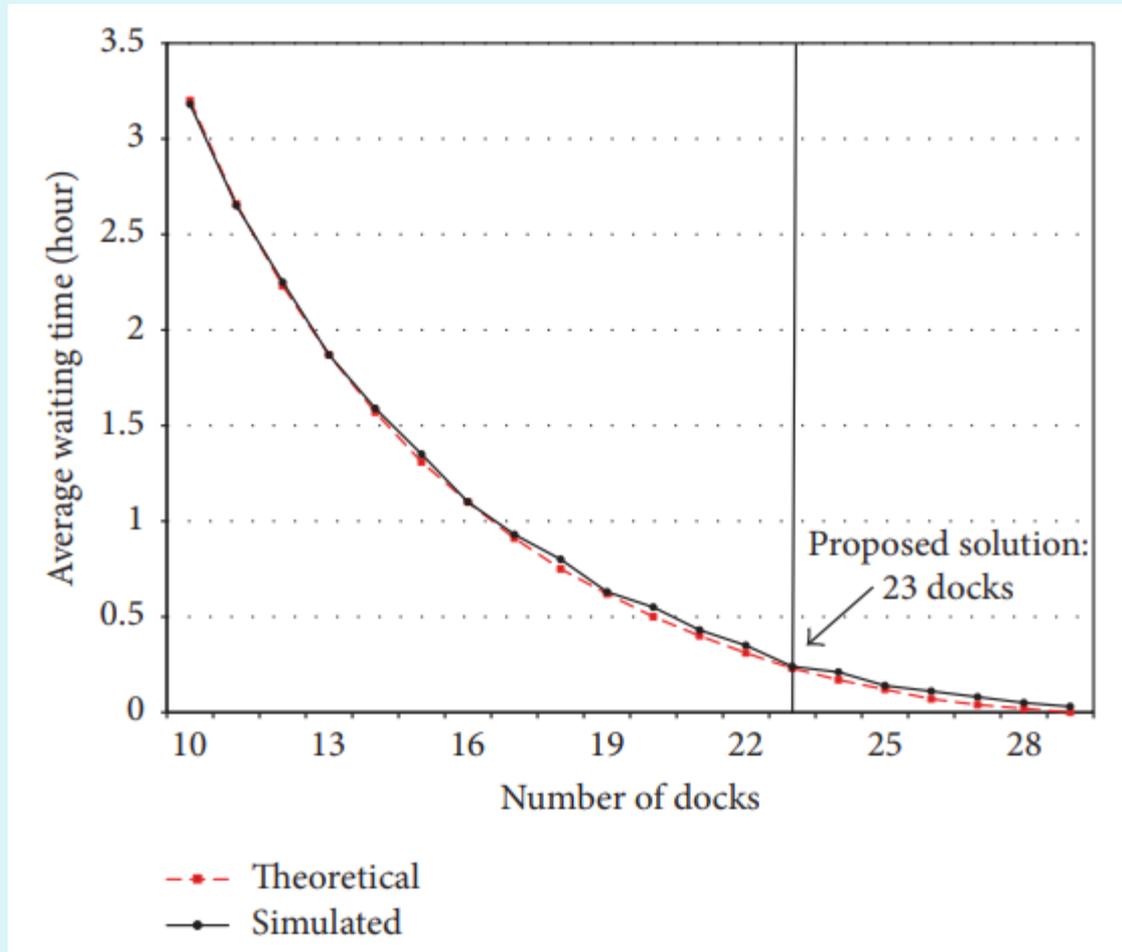
A simulação das chegadas de caminhões de abastecimento no terminal é realizada conforme a Figura 6:



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) Tipos de rótulo nas informações anexadas às embalagens, principalmente endereço do local de entrega ou coleta;
 - 5) Equipamento utilizado na operação de descarga;
 - 6) Pessoal pessoas alocado à operação.

Solução: 23 posições de descarga na doca (Newel + simulação)



Conclusão 1

- Pela inexistência de TLDUs implantados no Brasil, 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, (ou mesmo somente realistas), e voltadas a esse tipo de empreendimento. Os fatores que refletem os níveis de desempenho de um terminal do tipo TLDUs são diversos, e dependem principalmente das condições políticas e de governança, como também da cooperação intensa entre os agentes participantes.

Conclusão 2 – com a ajuda de Dilma Rousseff

- O último caso de TLDU no Brasil de que me lembro, foi em Curitiba, no IPPUC – Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba, onde participei de reunião com a direção e com o pessoal técnico do Instituto, na qualidade de Engenheiro Consultor da Logit Engenharia, onde insisti na necessidade de implantar um terminal crossdocking num TLDU previsto para atender o centro urbano de Curitiba. Na reunião, somente o Engenheiro representante da Logit e Selma Isa, Consultora do Banco Interamericano de Desenvolvimento (hoje também no LALT), concordaram e entenderam minha proposição. Os demais não entenderam o conceito de crossdocking, de forma igual ou pior do que Dilma Rousseff, que não entendia a diferença de uma nuvem no céu, quando comparada à que lhe falavam sobre o uso de nuvem na computação moderna.