

# A SIMULAÇÃO DINÂMICA DO TRÁFEGO EM MEIO URBANO UTILIZANDO O DIAGRAMA MACROSCÓPICO FUNDAMENTAL

Sérgio F. A. Batista<sup>1</sup> e Mónica Menéndez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Division of Engineering, New York University Abu Dhabi, Saadiyat Island PO Box 129188 Abu Dhabi, United Arab Emirates

Email: [sergio.batista@nyu.edu](mailto:sergio.batista@nyu.edu)

<sup>2</sup> Division of Engineering, New York University Abu Dhabi, Saadiyat Island PO Box 129188 Abu Dhabi, United Arab Emirates

Email: [monica.menendez@nyu.edu](mailto:monica.menendez@nyu.edu)

---

## Sumário

Os modelos de tráfego baseados no Diagrama Macroscópico Fundamental permitem modelar dinâmicas de tráfego em grandes áreas metropolitanas com um baixo custo computacional, sendo aplicados em problemas de controlo de perímetro, taxaço do congestionamento, entre outros exemplos. Neste artigo discutiremos a teoria e implementação prática dos modelos agregados de tráfego baseados no Diagrama Macroscópico Fundamental e afetação dinâmica de utilizadores por caminhos alternativos. Iremos também discutir a análise de um exemplo prático de dinâmicas de tráfego agregadas modeladas para a cidade de Innsbruck, Áustria, nomeadamente no que concerne à calibração dos comprimentos de percurso.

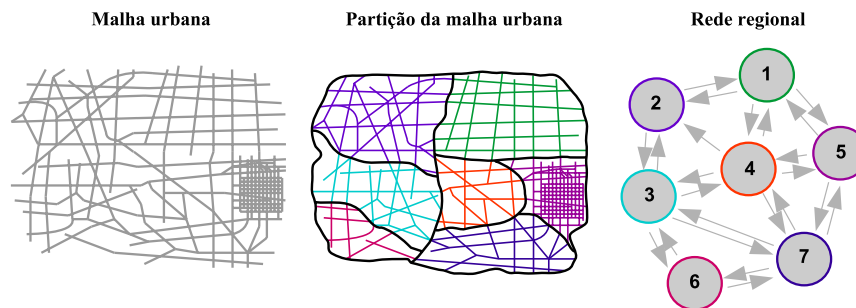
---

**Palavras-chave:** Modelos agregados de tráfego, teoria de tráfego, Diagrama Macroscópico Fundamental, afetação dinâmica de utilizadores, equilíbrios dinâmicos em redes de transporte.

## 1 INTRODUÇÃO

O congestionamento de sistemas de transporte é um problema observado em inúmeras metrópoles nos diversos continentes. A simulação de dinâmicas de tráfego permite investigar a resposta da rede de transportes a diferentes padrões de congestionamento e cenários de procura, e, por conseguinte, desenhar estratégias que permitam aumentar a sua performance. Contudo, os modelos de tráfego existentes [1] requerem elevados tempos computacionais e uma tarefa árdua de preparação dos cenários de simulação, especialmente para grandes áreas metropolitanas como as de Lisboa ou Porto, em Portugal. Os modelos agregados de tráfego baseados no Diagrama Macroscópico Fundamental (DMF) [2-5] apresentam-se como uma boa alternativa que permite modelar dinâmicas de tráfego em grandes áreas metropolitanas [5] e com um baixo custo computacional. A aplicação destes modelos requiere a partição da rede urbana em regiões [6], onde as condições de tráfego sejam aproximadamente homogéneas, isto é, onde todos os veículos circulam aproximadamente à mesma velocidade espacial média. A Figura 1 sumaria as diferentes etapas do processo de partição de uma rede urbana. A malha urbana, composta por um conjunto de segmentos de comprimento fixo, é dividida em regiões (ou grupos de segmentos) onde todos os veículos circulem à mesma velocidade média. As condições de tráfego dentro de cada região são reguladas por um DMF, que é uma característica de cada uma das regiões. O DMF relaciona o fluxo médio de circulação com a acumulação de veículos presentes na região durante um dado intervalo de tempo. O mesmo DMF pode também ser descrito pelas relações entre a produção de viagens ou a velocidade espacial média e a acumulação de veículos dentro da região [ver e.g. 4]. As dinâmicas de tráfego entre regiões adjacentes são representadas por trocas de fluxos. Estes modelos agregados de tráfego baseados no DMF têm sido aplicados com sucesso em diferentes contextos [7], nomeadamente no estudo e desenvolvimento de estratégias de controlo e regulação

de tráfego [8,9], taxaçoão do congestionamento [10], políticas ambientais [11] e na regulaçoão de novos modos de transporte [12].



**Figura 1 – Partiçoão de uma malha urbana num conjunto de regiões que permite definir a rede regional. Fonte: [13].**

Neste trabalho iremos rever e discutir a aplicaçoão dos modelos de tráfego baseados no DMF para a simulaçoão de dinâmicas agregadas, passando pelas diferentes etapas: (i) partiçoão da rede; (ii) identificaçoão e caracterizaçoão de caminhos regionais; (iii) afetaçoão dinâmica de condutores na rede; (iv) calibraçoão dos modelos de tráfego baseados no DMF; e (v) análise das dinâmicas agregadas de tráfego. Iremos discutir a aplicaçoão na cidade de Innsbruck, Áustria, destes modelos agregados de tráfego baseados no DMF e a afetaçoão dinâmica de utilizadores em redes regionais, e analisar as diferentes dinâmicas agregadas de tráfego. Por fim, iremos discutir algumas perspetivas de investigaçoão futuras e potenciais aplicaçoões da modelaçoão de dinâmicas agregadas de tráfego.

Este artigo divide-se em três secçoões. A secçoão “Metodologia” apresenta a descriçoão matemática dos modelos agregados de tráfego baseados no DMF e da afetaçoão dinâmica de utilizadores em redes regionais. A secçoão “Resultados” apresenta um exemplo de aplicaçoão destes modelos na cidade de Innsbruck, Áustria, e discute as diferentes dinâmicas agregadas de tráfego modeladas. A secçoão “Conclusões” sumaria os principais resultados deste artigo e descreve diversas potenciais linhas de investigaçoão futura.

## 2 METODOLOGIA

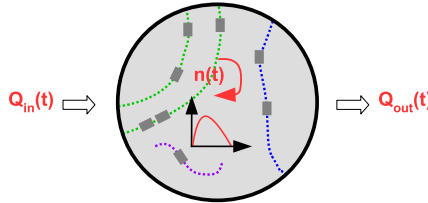
Nesta secçoão descrevemos de forma sucinta: (i) a formulaçoão matemática dos modelos agregados de tráfego; (ii) a afetaçoão dinâmica de utilizadores em redes regionais; e (iii) o cálculo do princípio do equilíbrio utilizador em redes regionais.

### 2.1 Modelos agregados de tráfego baseados no DMF

As dinâmicas de tráfego em cada região são descritas através de uma variável de estado chamada de acumulaçoão,  $n_r(t)$ , que representa o número de veículos que circulam dentro da região durante um determinado curto intervalo de tempo. Para simplicidade referimo-nos a uma região genérica  $r$  da rede regional. A Figura 2 ilustra a dinâmica agregada de tráfego dentro de uma região, que é regulada por um DMF intrínseco da própria região. A evoluçoão temporal das dinâmicas de tráfego depende da evoluçoão da acumulaçoão de veículos dentro da região, que por sua vez depende do balanço entre o fluxo de entrada ( $Q_{in,r}(t)$ ) e de saída ( $Q_{out,r}(t)$ ). Esta dinâmica é descrita através da seguinte equaçoão diferencial:

$$\frac{dn_r}{dt} = Q_{in,r}(t) - Q_{out,r}(t), t > 0 \quad (1)$$

onde  $Q_{in,r}(t)$  e  $Q_{out,r}(t)$  são expressos em unidades de veículos por segundo [veí./s].



**Figura 2 – Dinâmicas agregadas de tráfego dentro de uma região. Na figura encontram-se representadas as viagens de diversos veículos dentro desta região.**

Para melhor compreendermos as dinâmicas agregadas de tráfego dentro de uma região, recorreremos a uma analogia simples. Consideremos que esta região, ou também muitas vezes denominada na literatura de reservatório, representa uma banheira que podemos encher com água. Sabemos que cada banheira tem uma certa capacidade de vazão para escoar a água. Se abrirmos a torneira de tal forma que o fluxo de entrada seja inferior a essa capacidade de vazão, estamos perante uma situação fluida em que podemos escoar toda a água. Esta situação é equivalente a condições fluidas de tráfego na região, onde o fluxo de entrada de veículos é inferior à capacidade de escoamento (ou vazão) da região. À medida que abrimos mais a torneira, aumentamos o fluxo de entrada de água. A certo ponto, o fluxo de entrada ir-se-á aproximar da capacidade, entrando o sistema num regime crítico onde se começa a acumular alguma água no fundo da banheira. Ou, por outras palavras, de forma equivalente veículos dentro da região. No momento em que o fluxo de água a entrar na banheira é superior à capacidade de vazão, deixa de ser possível escoar todo o fluxo de água que nela entra, começando a encher à medida que o tempo passa. Este cenário é semelhante à propagação do congestionamento dentro da região. Quando o fluxo de entrada de veículos é superior à capacidade de vazão da região, surge o aumento da acumulação de veículos e por conseguinte o aparecimento do congestionamento. Devido a esta analogia, os modelos agregados de tráfego baseados no DMF são também chamados dos “modelos banheira” (*bathtub models*) na literatura.

Na literatura é possível distinguir duas formulações diferentes de modelos agregados de tráfego baseados no DMF, dependendo das suposições feitas sobre: (i) o fluxo de saída,  $Q_{out,r}(t)$  [4]; (ii) a calibração da distância total a percorrer por cada veículo dentro da região [14].

No modelo baseado na acumulação de veículos, ou em inglês *accumulation-based model*, assume-se que o fluxo de saída  $Q_{out,r}(t)$  é proporcional a uma distância média de viagem,  $\bar{L}_r$ , a percorrer por todos os veículos dentro de uma dada região genérica  $r$ :

$$Q_{out,r}(t) \approx \frac{P_r(n_r(t))}{\bar{L}_r} \quad (2)$$

onde  $P_r(n_r(t))$  representa a produção de veículos dentro da região  $r$  [4]. A produção de veículos  $P_r$  representa o fluxo médio de veículos que circula dentro da região  $r$  multiplicado pela distância total que é possível percorrer viajando apenas uma vez através de todos os segmentos que constituem essa mesma região (isto é, a soma de todas as distâncias

de todos os segmentos que constituem a região  $r$ ). A produção de veículos  $P_r$  exprime-se em unidades do sistema internacional em [veí.m/s]. A relação entre a produção de viagens  $P_r$  e a acumulação de veículos  $n_r(t)$  na região genérica  $r$  representa uma das formulações do DMF [2-4]. Esta ferramenta permite-nos determinar o valor da produção para uma dada acumulação de veículos observada na região durante um dado curto intervalo de tempo.

No modelo baseado sobre as viagens individuais, ou em inglês *trip-based model*, assume-se que cada veículo  $v$  possui uma distância de viagem distinta dentro da região  $r$ . Esta calibração de distâncias de percurso  $L_{r,v}$  para cada veículo individual dentro de cada região influencia de forma significativa as dinâmicas de tráfego modeladas dentro de cada região [14].

Partindo da assunção base do DMF sobre a homogeneidade das condições de tráfego na região  $r$ , isto é onde todos os veículos circulam à mesma velocidade espacial média  $v_r$ , podemos escrever a seguinte relação:

$$L_{r,j} = \int_{t_{entrada}}^{t_{saída}} v_r(n_r(s)) ds \quad (3)$$

onde  $t_{entrada}$  e  $t_{saída}$  representam os instantes temporais de entrada e saída do veículo  $j$  da região  $r$ . Note-se que o tempo de trajeto dentro da região corresponde à diferença entre o instante de saída  $t_{saída}$  e o instante de entrada  $t_{entrada}$ , i.e.  $t_{viagem} = t_{saída} - t_{entrada}$ . O termo  $v_r(n_r(s))$  representa a relação DMF entre a velocidade espacial média na região e a acumulação de veículos presentes na região durante um dado intervalo de tempo. Esta relação é também chamada de DMF em velocidade na literatura, ou em inglês *speed-MFD*. A velocidade espacial média  $v_r$  calcula-se através da divisão entre a produção de viagens  $P_r$  e a acumulação  $n_r$ , i.e.  $v_r = P_r/n_r$ .

Partindo da equação (3), [4] determinou a seguinte relação entre o fluxo de saída  $Q_{out,r}(t)$  e o fluxo de entrada  $Q_{in,r}$ , tempo de viagem  $t_{viagem}$  e a velocidade espacial média  $v_r$ :

$$Q_{out,r}(t) = Q_{in,r}(t - t_{viagem}) \frac{v_r(n_r(t))}{v_r(n_r(t - t_{viagem}))} \quad (4)$$

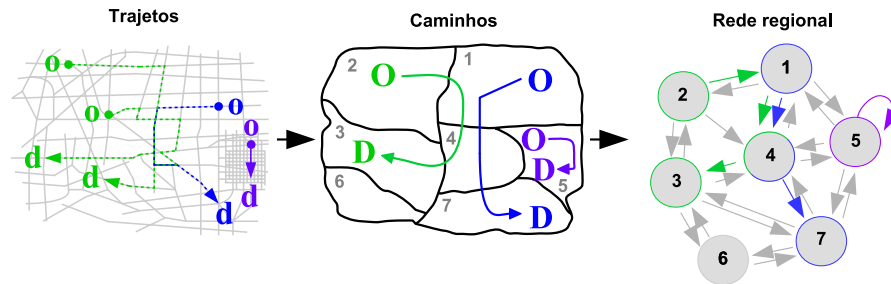
Substituindo equação (4) em (1), obtém-se uma equação diferencial com um retardamento temporal. [4] propõe um esquema numérico para a solução desta equação diferencial e deste modelo DMF baseado sobre as viagens individuais. Por esta razão remetemos o leitor para o artigo [4] para mais detalhes sobre a implementação e resolução numérica deste modelo.

## 2.2. Afetação dinâmica de tráfego

A definição da rede regional (ver Figura 3) para a aplicação dos modelos agregados baseados no DMF acarreta novos desafios científicos no que concerne: (i) a identificação caminhos alternativos onde os condutores viajam e a caracterização das suas distâncias de percurso; e (ii) cálculo dos tempos de trajeto de cada caminho alternativo.

A Figura 3 exemplifica uma metodologia para identificar caminhos alternativos na rede regional. O trajeto de um condutor na rede urbana é representado por uma sequência ordenada de troços ou segmentos de comprimento fixo, desde o seu ponto de origem ao de chegada. No entanto, como a Figura 3 demonstra, os trajetos destacados a verde atravessam a mesma sequência de regiões e que é diferente dos caminhos destacados a azul ou violeta. Isto significa que ambos estes trajetos destacados a verde definem o mesmo caminho regional, que é representado pela sequência ordenada de regiões atravessadas pelos condutores desde a sua região de origem à de destino [13]. Este caminho regional é diferente daquele que é definido pelos trajetos destacados a azul e a violeta. De acordo com [13], podemos

distinguir na Figura 3 entre caminhos regionais tais como os destacados a azul e verde, e caminhos internos tal como o destacado a violeta. Neste seguimento, uma das alternativas para identificar caminhos na rede regional é a partir de informação sobre trajetos na rede urbana [13], que agregamos em função da definição da partição da rede urbana, tal como anteriormente explicado. Esta informação pode ser obtida através de trajetos GPS (*Global Positioning System*). Contudo, poderá ser difícil conseguir obter esta informação, seja, por exemplo, por falta de dados ou por questões de privacidade. Os autores em [14] propõe uma metodologia para determinar bases de trajetos simulados, utilizando informação sobre a topologia da rede urbana e o cálculo de caminhos mais curtos em distância. Esta metodologia baseia-se num algoritmo de aprendizagem ativa assente nos Processos de Gauss.



**Figura 3 – Partição de uma malha urbana num conjunto de regiões que permite definir a rede regional. Esta figura demonstra também a agregação de trajetos na malha urbana a caminhos na rede regional. Fonte: [13].**

Através da Figura 3, é também possível observar que ambos os trajetos destacados a verde possuem diferentes distâncias percorridas dentro de cada região, o que significa que um caminho regional é caracterizado por uma distribuição explícita de distâncias de percurso em cada região [15]. Os autores em [15] propuseram uma metodologia para determinar estas distribuições explícitas de distâncias de percurso, que considera diferentes níveis de informação relativamente à sequência de regiões atravessadas pelos trajetos tendo em consideração a partição da rede urbana. Para cada região, estes níveis de informação variam desde considerar todos os trajetos que atravessam uma região, i.e. uma distribuição de distâncias de percurso única independentemente do caminho regional, ao cálculo de distribuição de distâncias de percurso por região e por caminho regional, i.e. todos os caminhos regionais que atravessam uma mesma região possuem uma distribuição de distâncias de percurso distinta. Neste artigo consideramos o cálculo das distribuições de distâncias de percurso por caminho regional e por região, que denotamos por  $L_{rp}$ .

As distribuições de distâncias de percurso características de cada caminho regional induzem um novo desafio na caracterização dos tempos de viagem dos condutores na rede regional [16]. O tempo de viagem  $TT_p^{OD}$  do caminho regional  $p$  que conecta o par de regiões de Origem (O) e de Destino (D) é:

$$TT_p^{OD} = \sum_{r \in X} \left( \frac{L_{rp}}{v_r(n_r)} \right) \delta_{rp}, \forall p \in \Omega^{OD} \wedge (O, D) \in W \quad (5)$$

onde  $X$  representa o conjunto de todas as regiões que definem a rede regional;  $\delta_{rp}$  é uma variável binária que toma o valor de 1 se o caminho regional  $p$  atravessar a região  $r$ , ou 0 caso contrário;  $\Omega^{OD}$  é o conjunto de caminhos regionais alternativos que conectam o par de regiões de origem e destino; e  $W$  representa o conjunto de todos os pares origem-destino considerados na rede regional.

### 2.3 Equilíbrio da rede regional

Neste artigo pretendemos determinar as condições de equilíbrio dinâmico da rede baseado no Equilíbrio do Utilizador, ou em inglês *User Equilibrium*, onde cada condutor/a pretende minimizar o seu tempo de viagem. Neste contexto, distinguimos entre o Equilíbrio de Utilizador Determinístico e Estocástico. No caso do Equilíbrio de Utilizador Determinístico assume-se que os condutores têm um conhecimento perfeito sobre todos os caminhos possíveis e também sobre as condições de tráfego na cidade. No caso do Equilíbrio de Utilizador Estocástico, os condutores não percebem esta informação de uma forma perfeita. Neste artigo apenas iremos considerar os tempos de trajeto  $TT_p^{OD}$  como fator de decisão da parte dos condutores para determinar estes equilíbrios dinâmicos da rede.

Para o cálculo de cada um destes equilíbrios dinâmicos da rede, necessitamos de determinar os tempos de viagem [16]. Contudo, tal como discutido anteriormente na equação (5), o tempo de viagem de um condutor num caminho regional depende do quociente entre uma distribuição explícita de distâncias de percurso  $L_{rp}$  e da dinâmica da velocidade espacial média  $v_r(n_r)$  em cada região e que é regulada por um DMF. [16] propõe determinar a aproximação de primeira ordem da série de Taylor da equação (5) em torno dos valores médios de ambos os termos. Isto permite-nos obter as seguintes aproximações para o cálculo dos tempos de trajeto para determinar as condições de Equilíbrio de Utilizador Determinístico e Estocástico, respetivamente:

$$U_p^{OD,DUE} = \sum_{r \in X} \left( \frac{\bar{L}_{rp}}{\bar{v}_r(n_r)} \right) \delta_{rp}, \forall p \in \Omega^{OD} \wedge (O, D) \in W \quad (6)$$

$$U_p^{OD,SUE} = \sum_{r \in X} \left( \frac{\bar{L}_{rp}}{\bar{v}_r(n_r)} + \frac{L_{rp}}{\bar{v}_r(n_r)} - \frac{\bar{L}_{rp} v_r(n_r)}{\bar{v}_r^2(n_r)} \right) \delta_{rp}, \forall p \in \Omega^{OD} \wedge (O, D) \in W \quad (7)$$

Note-se que neste artigo apenas consideramos que a estocacidade advém da variância da distribuição dos tempos de trajeto, i.e. não consideramos diferentes percepções sobre os tempos de trajetos por parte de cada condutor individual.

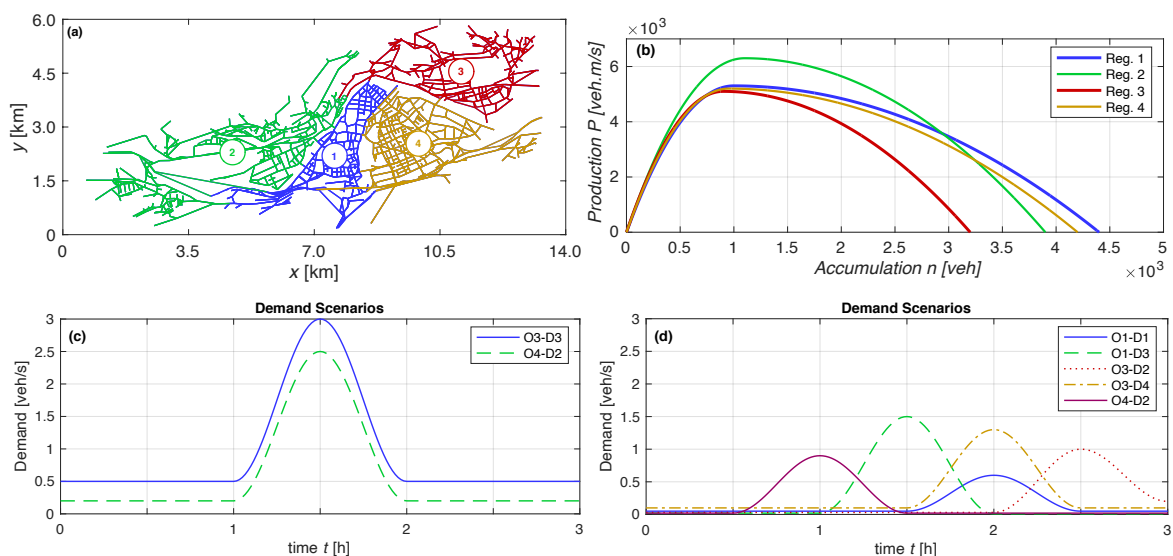
Para o cálculo das condições de equilíbrio dinâmico da rede consideramos a formulação do ponto fixo introduzida por [17], e para o qual utilizamos o Método das Médias Sucessivas para determinar a sua solução. Este método baseia-se num processo iterativo com um passo de descida. Como critério de convergência, consideramos a função *Gap* [16], que relaciona os tempos de viagem em cada iteração com o tempo de trajeto mínimo que conecta o par de regiões de origem-destino. No Equilíbrio de Utilizador Determinístico, o *Gap* = 0 indicando que todos os condutores escolheram um trajeto que minimiza o seu próprio tempo de viagem. No caso do Equilíbrio de Utilizador Estocástico, *Gap*  $\approx$  0 devido à estocaticidade que advém da variância associada à distribuição dos tempos de trajeto. No cálculo das condições de equilíbrio dinâmico consideramos uma aproximação quasi-dinâmica, onde dividimos o tempo total de simulação  $T$  em pequenos períodos de tempo  $\delta t$ . Para cada um destes períodos, determinamos as condições de equilíbrio. Esta aproximação quasi-dinâmica permite-nos ter em consideração a evolução da procura e das condições de tráfego nas regiões em função do tempo [16].

## 3 RESULTADOS

Nesta secção discutimos a implementação dos modelos agregados de tráfego baseados no DMF e o Equilíbrio de Utilizador Determinístico (EUD) e Equilíbrio de Utilizador Estocástico (EUE) na malha urbana que representa a cidade de Innsbruck na Áustria. A Figura 4 (a) representa a cidade de Innsbruck dividida em 4 regiões. Esta rede foi obtida através do *OpenStreetMaps* [14,18], sendo composta por 1992 interseções e 4448 segmentos. Esta malha urbana foi dividida em 4 regiões [14], tendo em consideração a fronteira geográfica representada pelo rio Inn que separa as regiões

2 e 3 das regiões 1 e 4, e também o caminho de ferro que separa as regiões 1 e 4. A Figura 4 (b) representa as funções DMF calibradas para cada uma destas regiões.

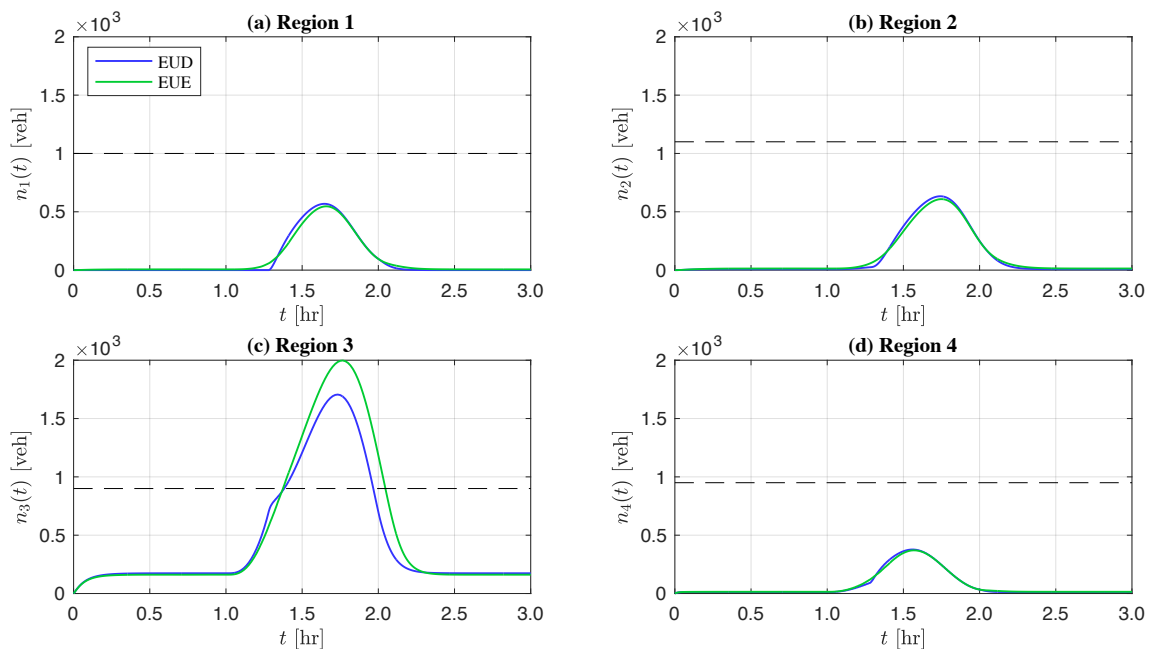
Para o cálculo das condições de equilíbrio na rede regional consideramos um tempo total de simulação  $T$  de 3 horas, sendo o equilíbrio calculado utilizando a aproximação quase-dinâmica a cada  $\delta t = 200$  segundos. Como critério de convergência do Método das Médias Sucessivas consideramos um valor do *Gap*  $< 0.1$  ou um número máximo de 15 iterações sucessivas. Nesta secção analisamos dois cenários diferentes de procura, que são representados nas Figuras 4 (c) (Cenário 1) e 4 (d) (Cenário 2). Para calcular os caminhos regionais e calibrar as suas distâncias de percurso considerámos o conjunto de caminhos mais curtos em distância entre todos os pares de origem e destino na malha urbana. Os caminhos mais curtos foram calculados utilizando o algoritmo de Dijkstra. Os caminhos regionais e calibração das distribuições de comprimentos de percurso foram posteriormente calculados como descrito na secção anterior. No primeiro cenário de procura, Cenário 1, consideramos dois pares regionais de origem-destino (OD): 33; e 42. O par OD 33 representa um caminho interno, enquanto o par OD 42 é conectado por dois caminhos regionais compostos pelas sequências de regiões 412 e 432. No segundo cenário, Cenário 2, consideramos cinco pares OD: 11; 13; 32; 34; e 42. Cada um destes pares OD é conectado por 3 caminhos regionais, levando a um total de 15 caminhos regionais neste cenário.



**Figura 4 – (a) Cidade de Innsbruck, Áustria, dividida em 4 regiões. (b) Funções do DMF relacionando a produção de viagens e a acumulação de veículos em cada região. (c) Calibração do cenário de procura 1. (d) Calibração do cenário de procura 2.**

A Figura 5 representa as dinâmicas agregadas da acumulação, i.e. condições de tráfego, em cada uma das quatro regiões em função do tempo  $t$  [hr], para o Cenário 1. Neste primeiro cenário modelamos as condições de tráfego utilizando o modelo baseado nas acumulações de veículos, i.e. *accumulation-based model*. As curvas a azul representam as condições de equilíbrio da rede correspondentes ao EUD, enquanto as curvas a verde dizem respeito ao EUE. Começamos por analisar as condições correspondentes ao EUD, onde se consideram distâncias médias de percurso para cada caminho em cada região no cálculo dos tempos de trajeto. Os condutores do par OD 33 viajam apenas no caminho interno à região 3. Por outro lado, inicialmente, os condutores do par OD 42 escolhem viajar inicialmente no caminho 432, o que explica os picos de acumulação registados entre as 1.5 e 2 horas de simulação. Os picos registados nas regiões 4 e 2 representam os condutores que partem e chegam ao seu destino durante o período de maior procura

(ver Figura 5 (c)). Contudo, também se regista um pico na procura no par OD 33, o que aumenta o congestionamento na região 3 e, por conseguinte, também os tempos de trajeto no caminho regional 432 que conecta o par OD 42. Note-se que segundo a assunção base dos modelos agregados de tráfego baseados no DMF, o aumento de um veículo numa região leva automaticamente à diminuição da velocidade espacial média de todos os veículos que circulam nessa mesma região, isto é, a condição de homogeneidade do tráfego do DMF. Portanto, o aumento do congestionamento na região 3, leva a que se forme um engarrafamento, e no período entre as 1.5 e 2 horas de simulação, os condutores que antes escolhiam viajar no caminho regional 432 passam a escolher viajar no caminho 412 dado este apresentar um tempo de trajeto inferior. Este facto também explica o aumento da acumulação verificado na região 1 apenas durante este período entre as 1.5 e 2 horas. No caso das condições de equilíbrio EUE, verificamos que a acumulação é ligeiramente inferior na região 3 quando comparada com as condições de equilíbrio EUD. Esta diferença deve-se ao facto da perceção dos tempos de trajeto por parte dos condutores em condições do EUE, onde se consideram as distribuições do tempo de trajeto em vez de valores determinísticos (ver equação 6 e 7). Devido à perceção das distribuições dos tempos de trajeto, alguns condutores escolhem também viajar no caminho regional 412 fora do período de maior procura, isto é, entre 1.5 e 2 horas do tempo de simulação, o que não acontecia no caso do equilíbrio EUD.

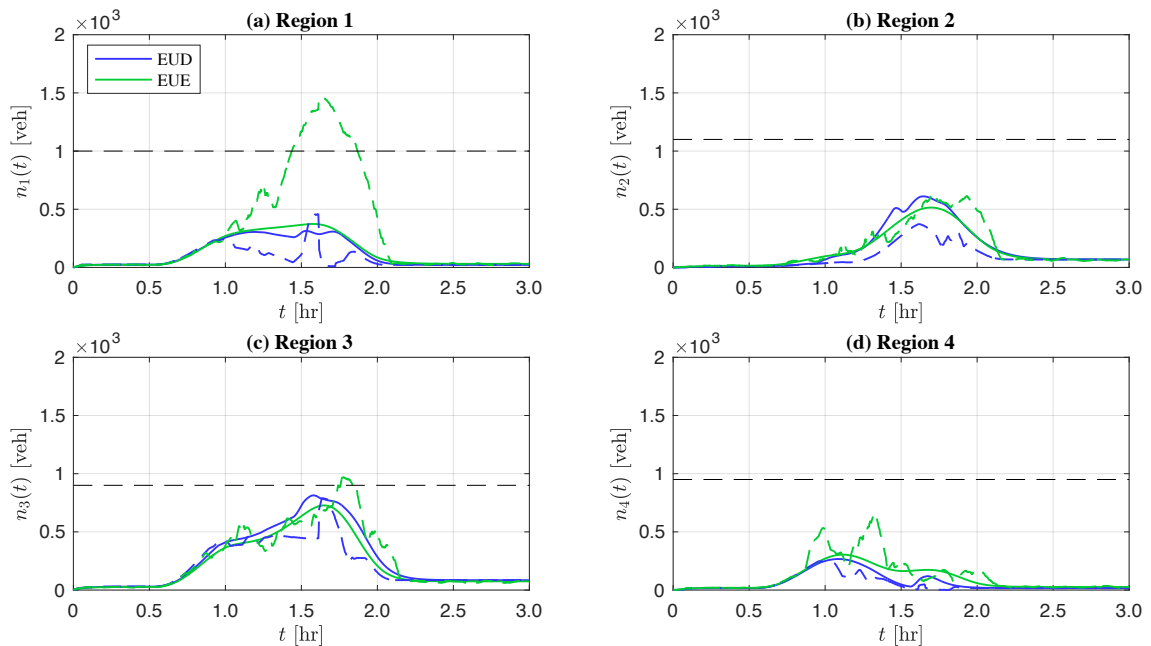


**Figura 5 – Evolução das acumulações [veículos] em função do tempo  $t$  [hr] nas quatro regiões sobre as condições de equilíbrio EUD (curvas a azul) e EUE (curvas a verde), para o primeiro cenário de procura - Cenário 1.**

A Figura 6 representa as dinâmicas agregadas de tráfego representadas pela evolução da acumulação em função do tempo  $t$  [hr] em cada uma das quatro regiões, sobre as condições de equilíbrio EUD e EUE. As curvas a cheio referem-se a dinâmicas modeladas utilizando o modelo de tráfego baseado nas acumulações (i.e. *accumulation-based*), enquanto as curvas a tracejado representam as dinâmicas modeladas utilizando o modelo baseado nas viagens (i.e. *trip-based*). Neste cenário observam-se dinâmicas agregadas de tráfego mais complexas, pois existe uma maior interação entre os condutores que viajam entre os diferentes pares OD. Contudo, a maior diferença de se ressaltar é entre as dinâmicas modeladas pelos dois modelos agregados de tráfego. Estas diferenças explicam-se pelas diferentes



dinâmicas associadas a cada modelo, nomeadamente à forma de como se faz a gestão entre os fluxos de entrada e de saída de cada região, tal como explicado em [4].



**Figura 6 – Evolução das acumulações [veículos] em função do tempo  $t$  [hr] nas quatro regiões sobre as condições de equilíbrio EUD (curvas a azul) e EUE (curvas a verde), para o Cenário 2. As curvas a cheio representam as dinâmicas de tráfego modeladas através do modelo baseado nas acumulações de veículos (*accumulation-based*), e as curvas a tracejado referem-se às dinâmicas modeladas através do modelo baseado nas viagens (*trip-based*).**

## 4 CONCLUSÕES

Neste artigo revemos a teoria associada aos modelos agregados de tráfego baseados no DMF, e o cálculo de equilíbrios dinâmicos em redes regionais considerando estas dinâmicas agregadas de tráfego. Em particular, revemos os conceitos de Equilíbrio Utilizador Determinístico e Estocástico. Discutimos a implementação destes modelos baseados no DMF, assim como o cálculo das condições de equilíbrio numa de 4 regiões que representa a cidade de Innsbruck na Áustria. Neste artigo considerámos dois cenários hipotéticos e diferentes de procura nesta cidade. Recorrendo à simulação dos modelos DMF, calculamos as condições de equilíbrio e analisámos as dinâmicas modeladas, demonstrando em particular o efeito das distribuições de distâncias de percurso nas condições de tráfego e o efeito de potenciais engarrafamentos em regiões na escolha dos condutores pelo seu caminho alternativo para viajar. Demonstrámos também num cenário de procura mais complexo, as dinâmicas de tráfego modeladas pelos dois modelos DMF podem ser significativamente diferentes devido à diferente forma de gerir os fluxos de entrada e de saída em cada região por parte de cada um dos modelos. A validação dos modelos agregados de tráfego baseados no DMF foi efetuada com base em dados simulados [4] e também dados reais [5].

Os modelos agregados de tráfego baseados no DMF apresentam-se como uma excelente alternativa para modelar com um baixo custo computacional, dinâmicas ao nível da rede o que pode ser de extrema relevância para aplicações em sistemas de mobilidade partilhada ou cenários de veículos autónomos e conectados. Os autores em [7] apresentam uma

boa discussão sobre as vantagens e limitações existentes nestes modelos de tráfego, assim como uma síntese de linhas de investigação futuras.

## 5 AGRADECIMENTOS

Sérgio F. A. Batista e Mónica Menéndez agradecem o apoio do centro de investigação CITIES (Center for Interacting Urban Networks) da Universidade de Nova Iorque Abu Dhabi, financiado pela Tamkeen sob o programa de financiamentos de institutos de investigação da NYUAD (projeto GC001).

## 6 REFERÊNCIAS

1. F. van Wageningen-Kessels, F., H. van Lint, K. Vuik and S. Hoogendoorn, Artigo em revista científica, *EURO Journal of Transportation Logistics* 4(4), 445–473, 2015.
2. C. Daganzo, Artigo em revista científica, *Transportation Research Part B: Methodological*, 41, 49-62, 2007.
3. N. Geroliminis and C. Daganzo, Artigo em revista científica, *Transportation Research Part B: Methodological*, 42, 759-770, 2008.
4. G. Mariotte and L. Leclercq, Artigo em revista científica, *Transportation Research Part B: Methodological*, 122, 327-349, 2019.
5. G. Mariotte, L. Leclercq, S. Batista, J. Krug and M. Paipuri, Artigo em revista científica, *Transportation Research Part B: Methodological*, 136, 62-86, 2020.
6. S. F. A. Batista, C. Lopez and M. Menéndez, Artigos em atas de congressos, *Proceedings of the 7<sup>th</sup> IEEE Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, pp. 1-6, Online, 16-17 of June 2021, IEEE.
7. M. Johari, M. Keyvan-Ekbatani, L. Leclercq, D. Ngoduy and H. Mahmassani, Artigo em revista científica, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 131, 103334, 2021.
8. I. Sirmatel and N. Geroliminis, Artigo em revista científica, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21(12), 4983-4994, 2019.
9. S. F. A. Batista, D. Ingole, L. Leclercq and M. Menéndez, Artigo em revista científica, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(6), 5176-5186, 2021.
10. K. Yang, M. Menéndez and N. Zheng, Artigo em revista científica, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 105, 439-455, 2019.
11. D. Ingole, G. Mariotte and L. Leclercq, Artigo em revista científica, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 86, 102411, 2020.
12. C. Beojone and N. Geroliminis, Artigo em revista científica, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 124, 102890, 2020.
13. S. Batista, M. Seppecher and L. Leclercq, Artigo em revista científica, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 127, 102953, 2021.
14. S. F. A. Batista, G. Cantelmo, M. Menéndez and C. Antoniou, Artigo em revista científica, *Computer Aided in Civil and Infrastructure Engineering*, 37(1), 93-109, 2022.
15. S. F. A. Batista, L. Leclercq and N. Geroliminis, Artigo em revista científica, *Transportation Research Part B: Methodological*, 122, 192-217, 2019.
16. S. F. A. Batista and L. Leclercq, Artigo em revista científica, *Transportation Science*, 53, 1563-1590, 2019.
17. Y. Sheffi, *Urban Transportation networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, 1985.
18. OpenStreetMap contributors, 2020. Innsbruck dump retrieved from <https://planet.osm.org>