



IL FUTURO DELLA MOBILITÀ INTELLIGENTE E SOSTENIBILE

Digital Twin & Intelligenza Artificiale.
Innovazione tecnologica “As a Service“
per la gestione operativa
e la pianificazione tattico-strategica
della mobilità urbana sostenibile e interconnessa

Firenze | Milano | Roma | Bari



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italidomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA





IL FUTURO DELLA MOBILITÀ
INTELLIGENTE E SOSTENIBILE

Ottimizzazione del Traffico

Ing. Alessio Tesone, Università di Napoli «Federico II»

Agenda

- Introduzione
- Descrizione del caso studio
- Descrizione dell'algoritmo
- Risultati
- Conclusioni e Sviluppi futuri



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



MOST
CENTRO NAZIONALE PER LA MOBILITÀ SOSTENIBILE

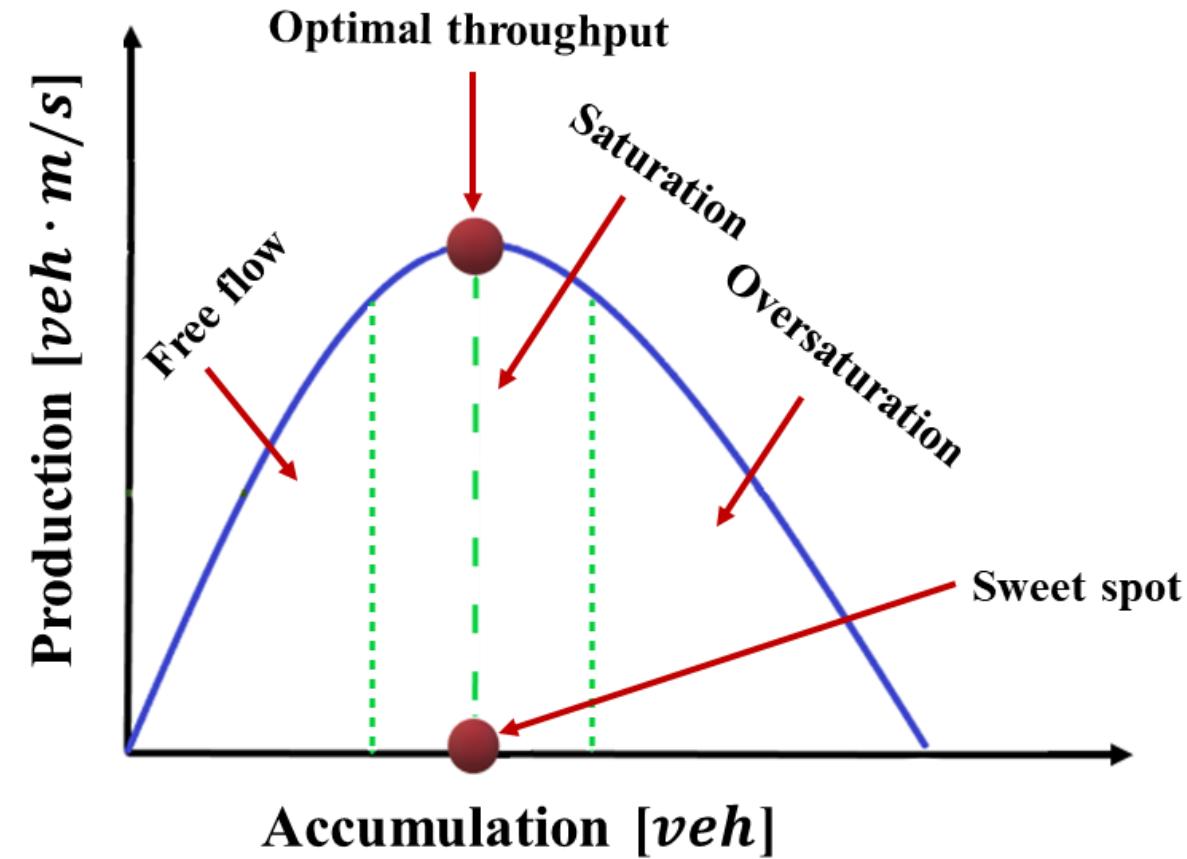


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II

Introduzione

Macroscopic Fundamental Diagram (MFD)

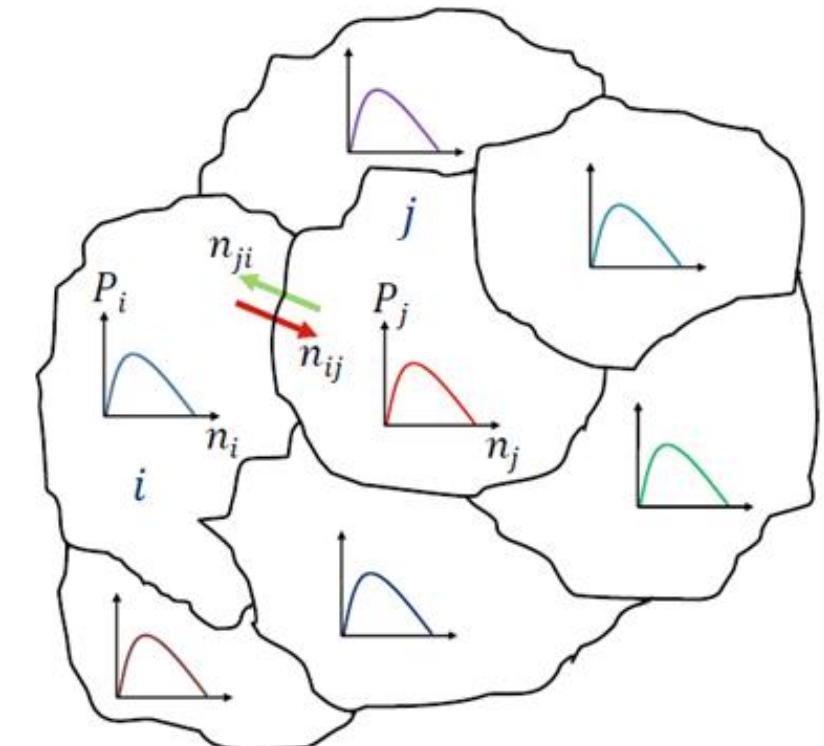
- L'MFD descrive la relazione tra accumulation (numero di veicoli in una zona) e production (throughput).
- Esiste una **critical accumulation** che massimizza la produzione (sweet spot).
- Oltre il valore critico, la rete entra in **oversaturation**, con perdita di efficienza.
- L'MFD fornisce una **rappresentazione aggregata** e robusta dello stato del traffico urbano.



Introduzione

MFD nel contesto Multi-Reservoir

- Una città può essere suddivisa in più **zone**, ciascuna con il proprio MFD.
- Ogni zona ha un proprio livello di congestimento misurabile tramite l'accumulation.
- Il modello multireservoir permette di **studiare come il traffico si distribuisce tra zone adiacenti**.
- Consente di capire quando una zona è vicina alla saturazione e dove indirizzare i flussi.



Introduzione

Dall'MFD alla Logica di Controllo

- L'MFD non è solo uno strumento descrittivo: può guidare strategie di controllo.

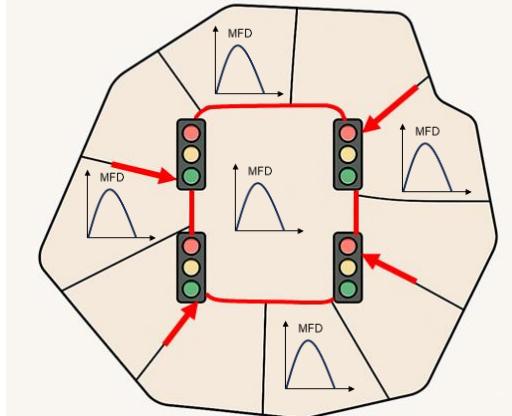
- È alla base di approcci consolidati come:

Perimeter Control (regolazione degli ingressi in una zona)

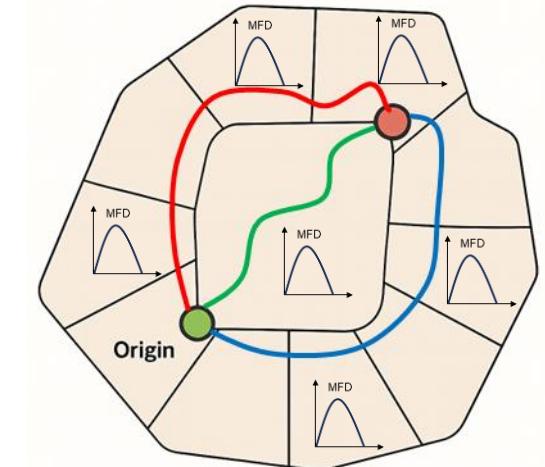
Route Guidance (redistribuzione dei flussi tra le zone)

- Questi metodi mirano a mantenere ogni zona vicino alla sua **critical accumulation**, massimizzando la production.
- L'idea chiave: esercitare un **controllo sui flussi inter-zonali**, non sui singoli link.

Perimeter Control



Route Guidance



Introduzione

Domanda di Ricerca

- È possibile utilizzare il paradigma MFD per **regolare opportunamente un semaforo?**
- Possiamo sfruttare un singolo incrocio per **influenzare la distribuzione del traffico tra zone?**
- Possiamo farlo **senza V2I (vehicle-to-infrastructure)**, senza connected vehicles, usando solo misure aggregate?

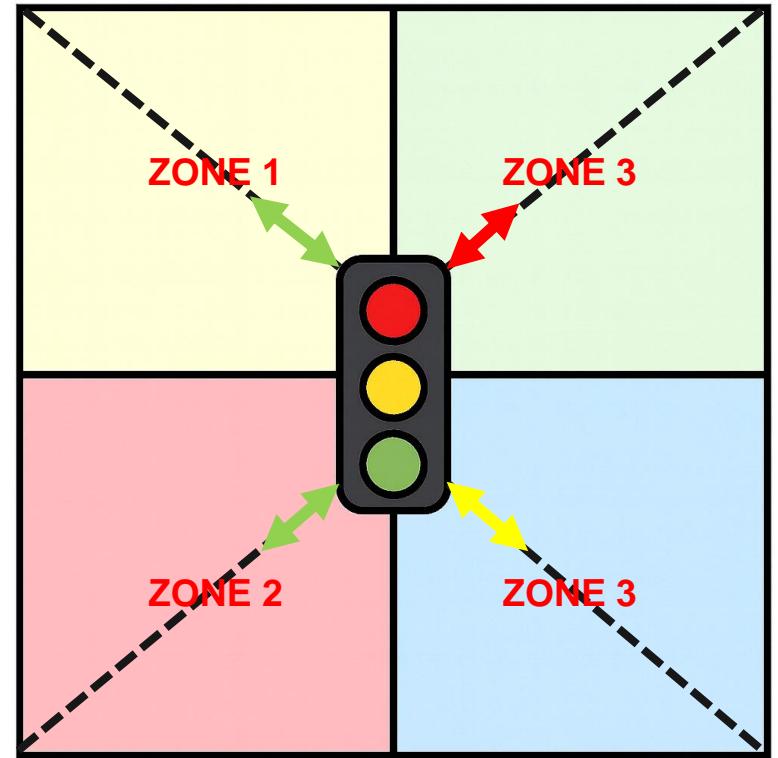
Obiettivo: capire se un semaforo può diventare uno strumento di route guidance implicito basato sull'MFD.

Introduzione

Perché un semaforo può controllare le zone urbane

- In un'intersezione a 4 fasi:
 - più verde su una fase → più flusso in una direzione;
 - meno verde → si limita il movimento.

Attraverso i green times si stabiliscono **priorità implicite** tra movimenti.

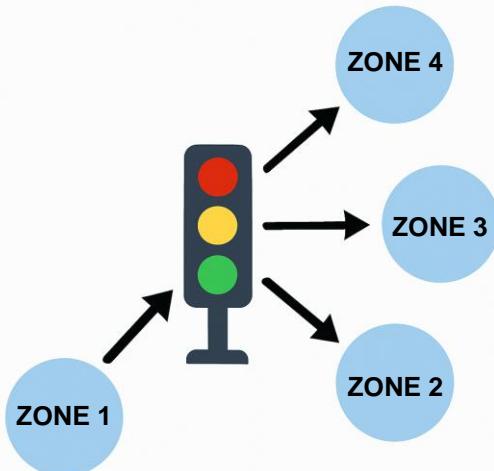


- Normalmente:
 - i semafori sono programmati su dati storici,
 - oppure sono adattivi ma solo in senso **locale**, non a livello di rete.

Introduzione

Un Semaforo Come Distributore di Flussi tra Zone

- Ogni movimento del semaforo collega una **zona di origine** e una **zona di destinazione**.
- Aumentare/diminuire una durata di verde → cambia quanti veicoli passano tra due zone.
- Monitorando l'accumulation delle zone (via MFD) possiamo **regolare ogni 5 minuti** i green times.
- Questo crea una forma di **route guidance implicita**. senza bisogno di comunicazione veicolo-infrastruttura.



Il semaforo diventa uno strumento per riequilibrare le accumulation tra zone

Introduzione

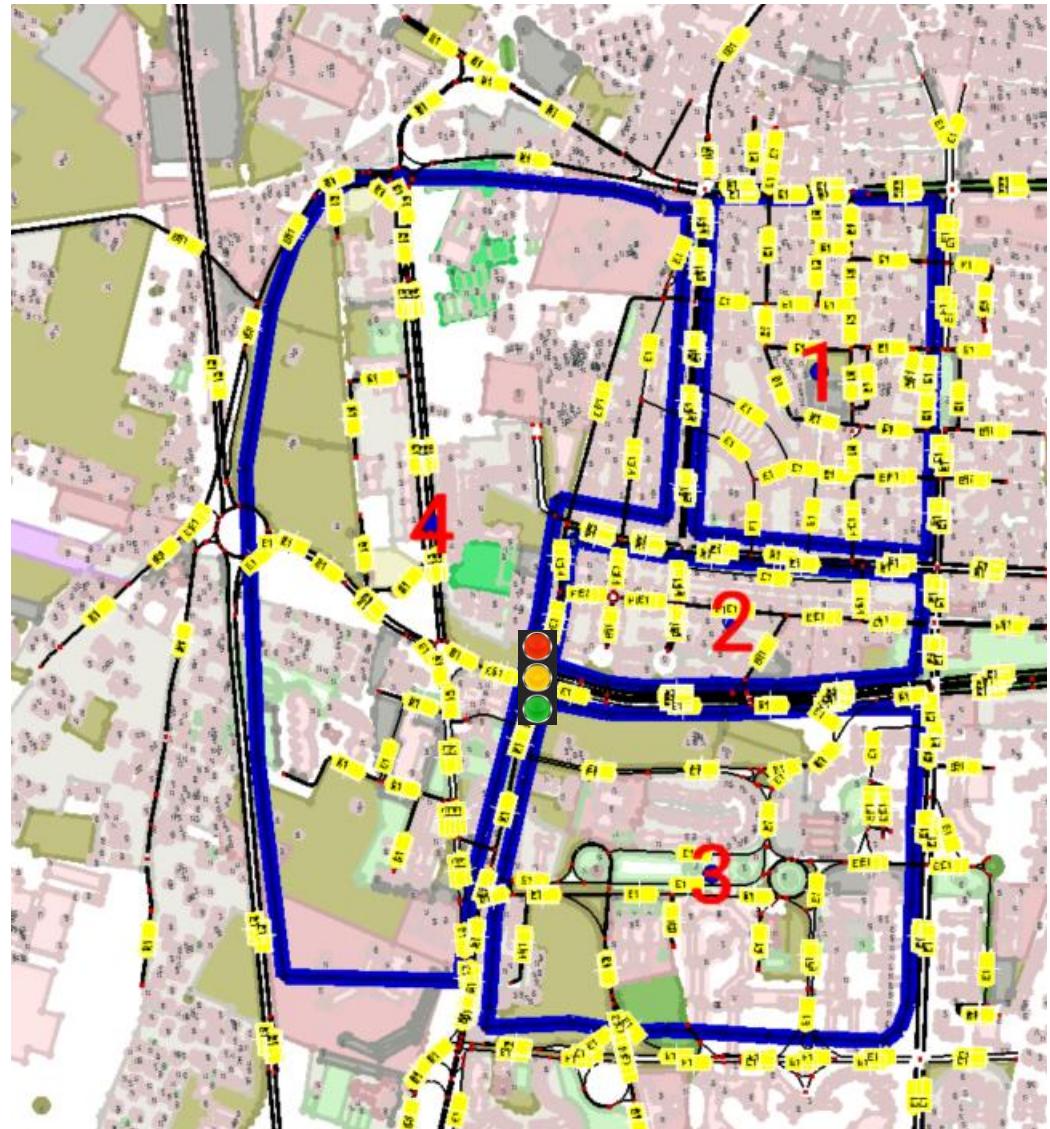
Goal dell'MFD-Aware Signal Control

- Ridurre accumulation nelle zone sovraccaricate.
- Favorire flussi verso zone con maggiore capacità residua.
- Massimizzare la production di rete.
- Applicazione in contesti reali **senza smart infrastructure**.

Descrizione del caso studio

Simulation Network: Bari Urban Core

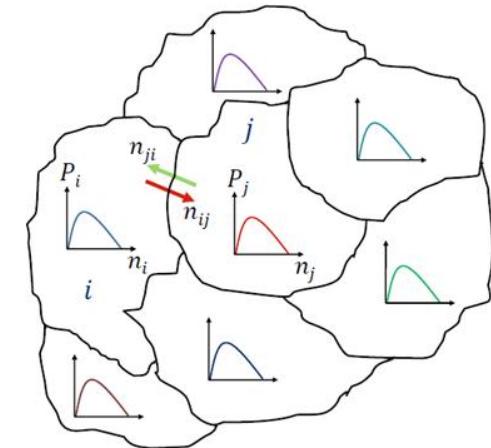
- Rete di traffico realistica del centro urbano di Bari (modello SUMO).
- Elevata densità di intersezioni e movimenti complessi.
- Loop detectors installati nei link principali → misure di occupancy e stima delle accumulation di zona.
- Identificazione di un semaforo strategico (TLS 12231538499) come punto di controllo.



Descrizione del caso studio

Zonal Partitioning for MFD-Based

- La rete è stata suddivisa in 4 zone macroscopiche.
- Ogni zona rappresenta un bacino con comportamento coerente dal punto di vista MFD.
- Criteri adottati:
 - bassa varianza intra-zonale,
 - compattezza geometrica,
 - assenza di biforcazioni interne,
 - MFD stabile e unimodale.
- La zonizzazione permette di applicare il controllo a livello di rete.



Descrizione del caso studio

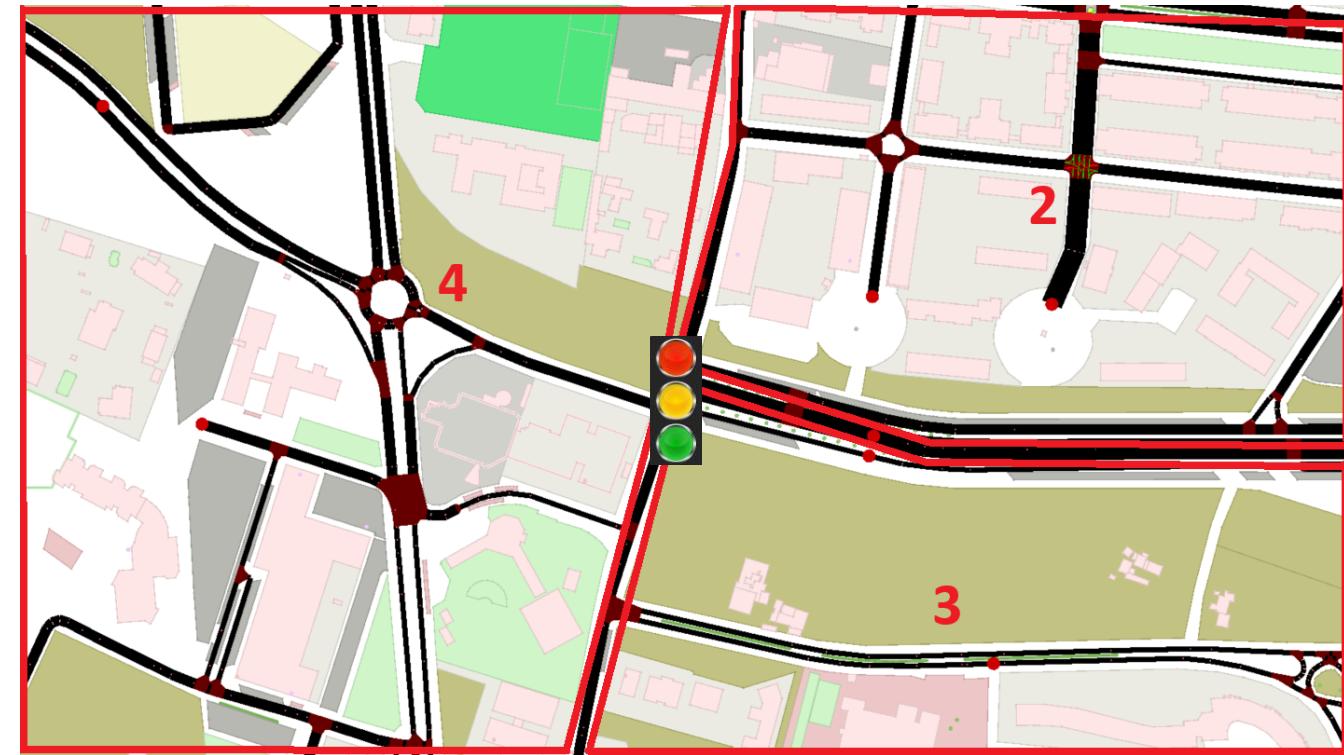
Strategic Intersection: Key Inter-Zonal Movements

- Il semaforo si trova in un punto dove tre zone urbane si incontrano:

Zona 2, Zona 3 e Zona 4.

- Le manovre significative sono quelle che permettono spostamenti tra zone diverse:

- Zona 3 → Zona 2
- Zona 3 → Zona 4
- Zona 2 → Zona 4
- Zona 4 → Zona 3
- Zona 4 → Zona 2



- Queste manovre costituiscono tutti gli attraversamenti inter-zonali controllabili dal semaforo.
- Regolando le fasi che abilitano tali movimenti, possiamo favorire zone meno congestionate e proteggere quelle critiche.

Descrizione dell'algoritmo

Decision Variables & Cycle Constraints

- La variabile di controllo è la **durata delle fasi semaforiche**: $x = [x_1, \dots, x_m]$
- Il ciclo totale è fisso: 95s.
- Una parte del ciclo è **non modificabile** (fasi pedonali/clearance $\rightarrow C_{fixed}$).
- Solo le fasi veicolari selezionate possono essere ridistribuite:

$$\sum_{i=1}^m x_i = C_{opt}$$

- Ogni fase ha vincoli min/max:

$$x_i^{min} \leq x_i \leq x_i^{max}$$



Descrizione dell'algoritmo

Zonal Congestion Estimation (MFD-Based)

- Per ogni zona z calcoliamo la **relative density**:

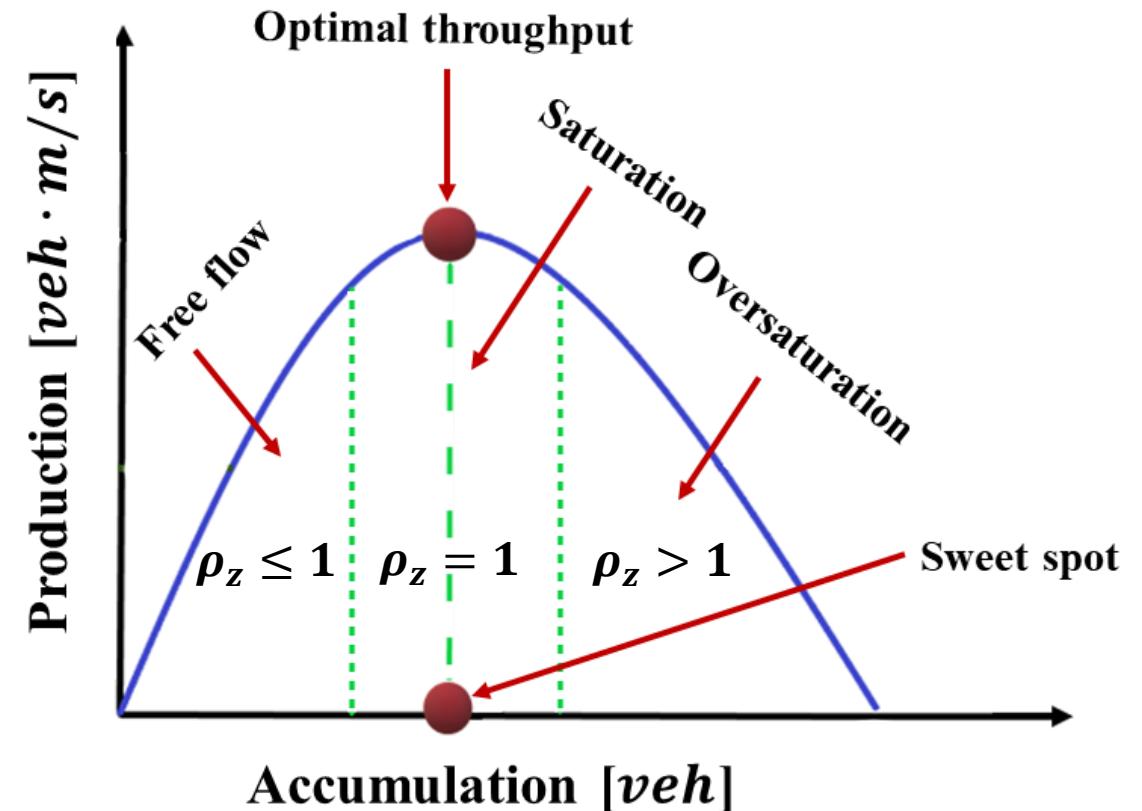
$$\rho_z = \frac{\text{accumulation}}{\text{critical accumulation}}$$

- Usiamo una penalizzazione **asimmetrica**:

$$e_z = \begin{cases} (\rho_z - 1)^2, & \rho_z > 1 \\ 0.5 \cdot (\rho_z - 1)^2, & \rho_z \leq 1 \end{cases}$$

- Il risultato è un vettore di congestione:

$$e = [e_1, e_2, e_3, e_4]$$



Descrizione dell'algoritmo

Phase-Zone Incidence & Phase-Weight Function

Ogni fase abilita uno o più movimenti che collegano: una **zona di origine** e una **zona di destinazione**

- Incidenza rappresentata da due matrici: $\Gamma_{in}, \Gamma_{out} \rightarrow \Gamma_{in}(i, z) = 1$ se la fase i riceve veicoli dalla zona z
 $\Gamma_{out}(i, z) = 1$ se la fase i immette veicoli nella zona z
- **Pesi preliminari:** $W_{i,z} = \alpha \Gamma_{in}(i, z) + \beta \Gamma_{out}(i, z)$ ($\alpha \neq \beta$)
- Per evitare distorsioni dovute al diverso numero di connessioni per zona, la matrice W è normalizzata colonna per colonna:
- Il peso finale di ciascuna fase rispetto allo stato delle zone è:

$$\widehat{W}_{i,z} = W_{i,z} / \sum_j W_{j,z}$$

$$w_i = \sum_z \widehat{W}_{i,z} e_z$$

Descrizione dell'algoritmo

Problema di ottimizzazione

- Il problema di ottimizzazione consiste nel ridistribuire la parte variabile del ciclo semaforico (pari a C_{opt}) tra le sole fasi controllabili, minimizzando il costo totale:

$$\min_{x_i} \sum_{i=1}^m x_i w_i$$

subject to

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m x_i &= C_{opt} \\ x_i^{min} &\leq x_i \leq x_i^{max} \end{aligned}$$

- Effetto del controllore:

Fasi collegate a zone congestionate → accorciate

Fasi collegate a zone meno congestionate → allungate

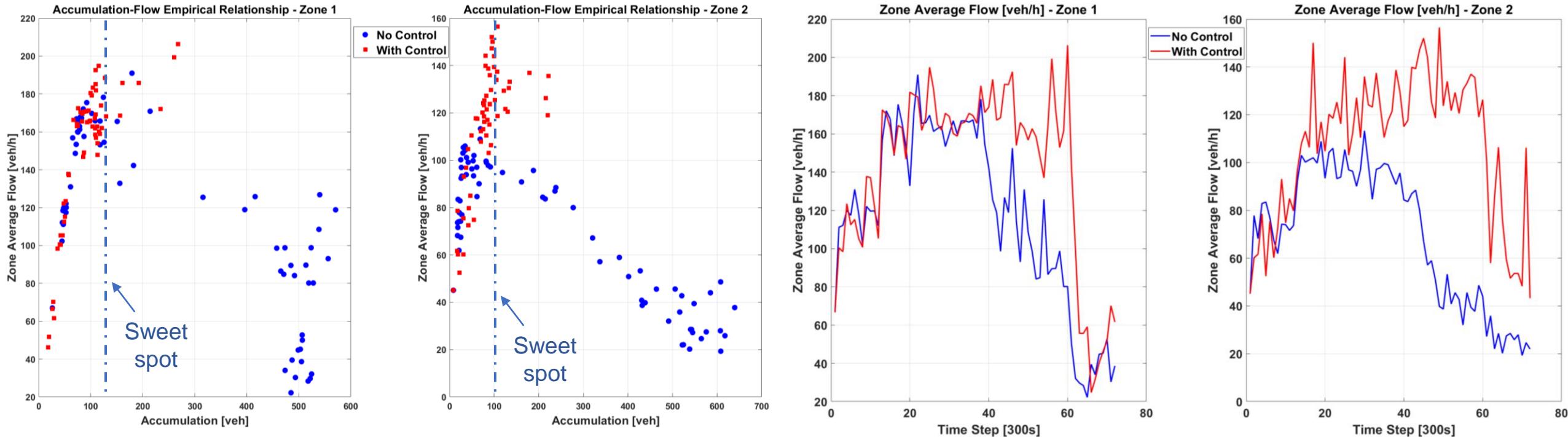
→ ***Implicit route guidance tra zone***

Risultati

Scenario D2 – Improvement Under Significant Congestion

Scenario:

- Congestione marcata nelle Zone 1 e 2 – La rete non è in gridlock → margine di intervento del controllore – Accumulation superiore a quella critica



Effetti del Controllo:

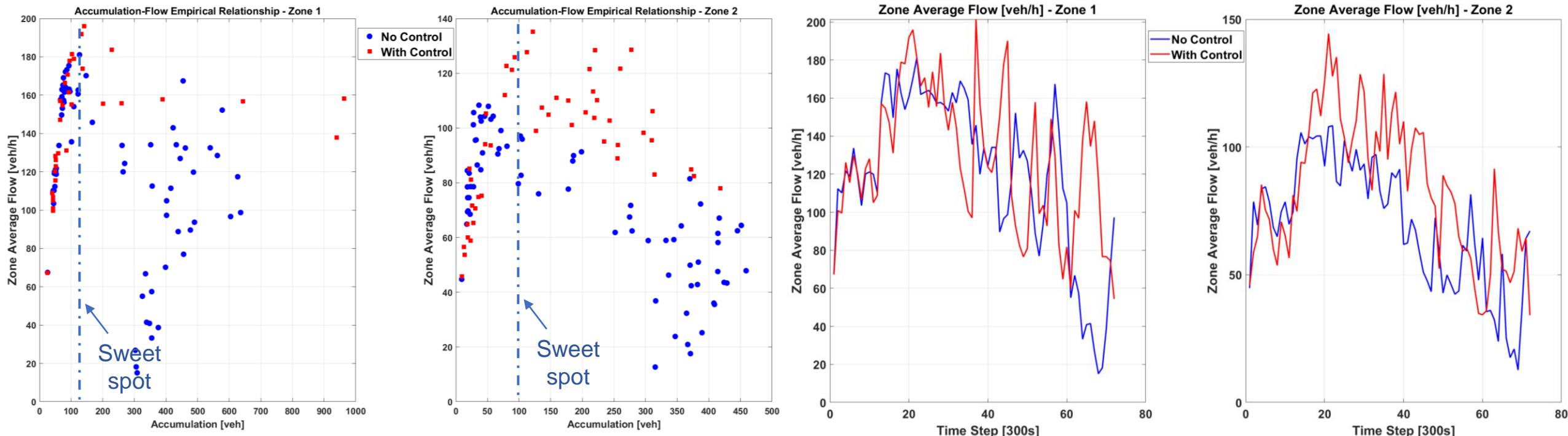
- Nonostante la congestione, il controllo riduce i livelli di accumulation - Le curve MFD risultano più stabili e più vicine al regime ottimale - Outflow aumentato, soprattutto nelle zone critiche

Risultati

Scenario D3 – Congestion Containment

- Domanda molto elevata, rete prossima al collasso – La rete è in gridlock → limitato margine di intervento del controllore – Congestione persistente, accumulation vicina ai valori di jam

Scenario:



Effetti del Controllo:

- Il controllo non elimina la congestione, ma la contiene – Outflow di zona migliorato

Risultati

Outflow Improvement across zones

Zona	Scenario D2	Scenario D3
Zona 1	+ 17.1%	+ 3.2%
Zona 2	+ 44.9%	+ 6.3%
Zona 3	+ 17.2%	+ 5.5%
Zona 4	+50.3%	+ 27.0%

Questa tabella riassume l'impatto del controllo sull'outflow di ciascuna zona.

In D2 i benefici sono molto marcati, mentre in D3 il controllo continua ad essere utile ma solo nelle zone che non hanno raggiunto la saturazione strutturale.

Conclusioni

- Il controllo MFD-based applicato a un singolo semaforo *strategico* si dimostra efficace anche in reti congestionate.
- Il semaforo diventa un vero strumento di **implicit route guidance**, senza necessità di V2I o infrastrutture avanzate.
- Il controller riduce l'accumulation nelle zone critiche, massimizza il throughput e limita fenomeni di hysteresis.
- Lo schema è robusto, leggero e facilmente implementabile in reti urbane reali.

Sviluppi Futuri

- **Integration with MPC:**

introdurre un modello predittivo per anticipare evoluzioni della congestione.

- **Multi-intersection Coordination:**

estendere il controllo a più semafori per massimizzare l'effetto a livello di rete.

- **Integration of eMFD-based Congestion Levels:**

includere anche gli indicatori ambientali nel controllo (es. emissioni, fuel consumption).

le curve eMFD per il centro urbano di Bari **sono già state calibrate**, abilitando futuri controlli congiunti congestione–emission (in vista della **direttiva 2024/1203/UE**).



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



MOST
CENTRO NAZIONALE PER LA MOBILITÀ SOSTENIBILE



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II

Sviluppi Futuri

Direttiva 2024/1203/UE

Obiettivo

Le amministrazioni locali dovranno adeguarsi alla Direttiva, il cui scopo è accelerare il raggiungimento degli obiettivi climatici UE, in particolare la riduzione delle emissioni e il raggiungimento della neutralità climatica.

21 maggio 2026

Con l'imminente entrata in vigore della Direttiva fissata per il 21 maggio 2026, gli Stati membri devono conformarsi integralmente, assumendosi le conseguenze di eventuali inadempienze, comprese responsabilità e sanzioni.



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA

MOST
CENTRO NAZIONALE PER LA MOBILITÀ SOSTENIBILE



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II

Sviluppi Futuri

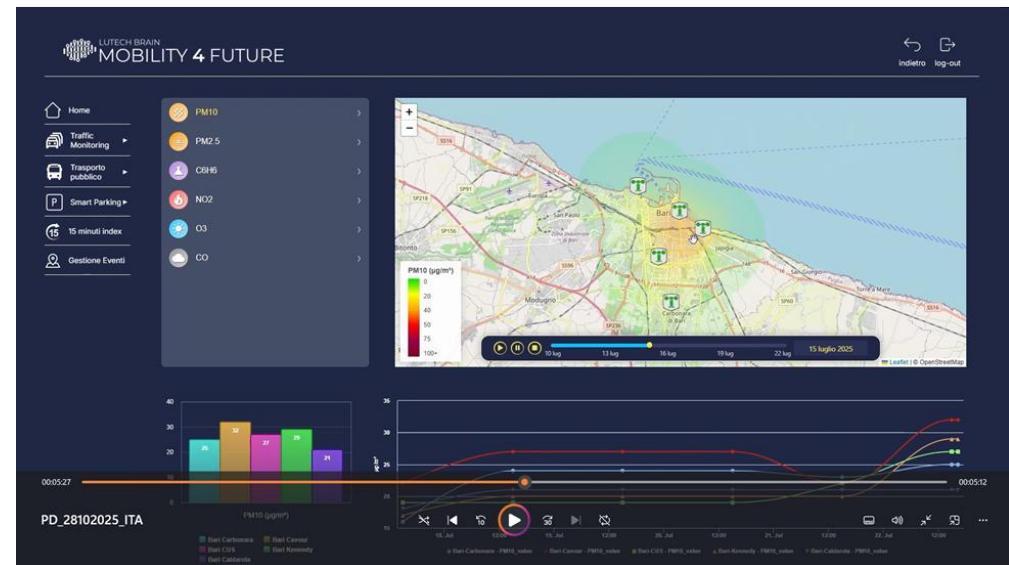
Direttiva 2024/1203/UE

Lutech offre un **supporto concreto** alle Pubbliche Amministrazioni attraverso la **piattaforma MOBILITY4FUTURE** che aiuta a:

- monitorare e gestire le emissioni di CO₂ e altri inquinanti;
- analizza i flussi di mobilità urbana;
- promuove il trasporto pubblico e la mobilità ciclabile.

Lutech rappresenta un alleato affidabile, offrendo supporto operativo e strumenti pratici per trasformare i dati in azioni efficaci e garantire conformità alla normativa.

LUTECH BRAIN
MOBILITY4FUTURE





IL FUTURO DELLA MOBILITÀ
INTELLIGENTE E SOSTENIBILE

Grazie per l'attenzione!

Ing. Alessio Tesone, Università di Napoli «Federico II»



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



MOST
CENTRO NAZIONALE PER LA MOBILITÀ SOSTENIBILE



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II