

#PratoMiMuovo

Smart Mobility per la città di Prato

ANALISI DI FATTIBILITA'

QCD — v2.0

Quality · Cost · Delivery

Versione	2.0 — Aprile 2026
Autore	Matteo Tempestini
Documento	Analisi QCD con mappe e fasi esecutive
Riferimento	Specifica Tecnica v1.0

Indice

0. Executive Summary

Che cos'è PratoMiMuovo?

Un sistema di semafori intelligenti per la città di Prato. Oggi i semafori sono "ciechi": i cicli sono fissi e non reagiscono al traffico reale. PratoMiMuovo li trasforma in un sistema reattivo basato su sensori IoT, intelligenza artificiale e open standard europei. Il risultato: meno attese, meno emissioni, bus più puntuali, ambulanze più veloci, ciclisti e pedoni più sicuri.

IL PROBLEMA	LA SOLUZIONE	I NUMERI CHIAVE
Semafori a ciclo fisso: il verde dura lo stesso tempo con l'incrocio vuoto o in coda. I bus subiscono le stesse attese delle auto. Le ambulanze perdono secondi preziosi. I ciclisti sono invisibili agli incroci.	Rete di sensori (telecamere CV, radar, spire, GPS bus) collegata a un centro di controllo AI. Il sistema legge il traffico in tempo reale e adatta i cicli semaforici ogni 30 secondi. Priorità garantita a bus, ambulanze, pedoni lenti e ciclisti.	<ul style="list-style-type: none"> • -20% tempi attesa ore di punta • -30% PM10 in canyon urbani • -30% ritardo bus LAM • -35/50% tempi percorrenza ambulanze • Azzeramento incidenti da "bruciatura del giallo" • Verde anticipato +4s per ciclisti • -40% energia illuminazione pubblica

Roadmap in un colpo d'occhio

Fase	Periodo	Dove	Incroci	Budget
0+1	2026–2028	Pilota Il Soccorso — sperimentazione	6	~ € 550.000
2	2028–2030	4 zone: Corridoio LAM, PM10, Ospedale, Bici	+100	~ € 2.254.000
3	2030–2031	Città completa — nodi residuali	+65	~ € 1.660.000
TOTALE	5 anni	171 incroci — intera rete semaforica Prato	~171	~ € 4.464.000

OPEX annuale a regime: ~ € 269.000/anno. Break-even atteso in 7–12 anni grazie a risparmi stimati in € 290.000–530.000/anno (energia, efficienza TPL, sanità, incidenti).

1. QUALITY — Qualità del Sistema

Il sistema PratoMiMuovo è definito dalla Specifica Tecnica v1.0. La qualità è verificata su tre dimensioni: performance funzionale, requisiti non funzionali e conformità agli standard.

1.1 KPI e Target di Performance

KPI	Metrica	Target	Verifica
Riduzione attese semafori	Tempo medio attesa ore di punta	-20%	Fine Anno 1
Riduzione PM10 canyon urbani	Concentrazione durante picchi	-30%	Continuo
Recupero puntualità bus LAM	Ritardo cumulato per corsa	-30% (25-40 s)	Fine Anno 1
Tempi percorrenza ambulanze	Traversata corridoio emergenza	-35-50%	Fine Anno 1
Incidenti Dilemma Zone	Impatti laterali bruciatura giallo	Azzeramento	Fine Anno 1
Verde anticipato ciclisti	LPI Head Start attivo su incroci ciclabili	+4-5 s	Go-live
Risparmio energetico illuminazione	Consumo kWh tratti con PIR	-40%	Fine Anno 1
Disponibilità TMC	Uptime annuale	≥ 99,5%	Continuo

1.2 Priorità Utenti — Gerarchia di Sistema

Il sistema rispetta una gerarchia di priorità hard-coded non bypassabile dall'AI Engine:

Priorità	Modulo	Feature	Override consentito?
1 — MASSIMA	Sicurezza Attiva	Pedestrian Extension · Dilemma Zone Protection	Solo manuale da Dashboard H24
2 — ALTA	Emergency Preemption	Via libera ambulanze 118 (proattivo via CROSS)	No (salvo conflitto con P.1)
3 — MEDIA	Bus Priority	Signal Preemption LAM (delay > 120 s)	No (salvo conflitti P.1 e P.2)
4 — STANDARD	Bike LPI + AI Engine	Verde anticipato bici +4s · Ottimizzazione PPO multi-incrocio	Sì — AI Engine può modulare

1.3 Architettura — Stack Tecnologico

Layer	Componenti	Standard
Sensing (Occhi)	Telecamere CV YOLOv8, radar Doppler 24GHz, spire induttive, PIR termico, GPS bus, sensori aria IoT	RTSP, RS-485, MQTT, LoRaWAN EU868, GTFS-RT

Communication	ChirpStack LoRaWAN, EMQX Enterprise MQTT, backbone fibra+4G/5G	TLS 1.3, mTLS, QoS 1-2, latenza <50 ms
Processing — TMC (Cervello)	Apache Kafka, Apache Flink CEP, AI Engine PPO, moduli Safety/Bus/EV/Env/Gating, InfluxDB, PostgreSQL+PostGIS	Avro, sliding window 30s/5min/1h
Actuator (Muscoli)	ATC semaforici, PMV, illuminazione LED adattiva	NTCIP 1202, UTMC, DATEX II, DALI-2
Integration	ARPAT API, DATEX II gateway, GTFS-RT CAP, Open Data Portal, CROSS 118 (Regione Toscana)	INSPIRE/OGC, CC BY 4.0, JSON/GeoJSON

1.4 Latenze e Disponibilità

Scenario	Target	Max
Dilemma Zone — All-Red	< 100 ms	200 ms
Pedestrian Extension — comando ATC	< 200 ms	500 ms
Emergency Preemption ambulanza	< 150 ms	300 ms
Bus Signal Preemption	< 500 ms	1 s
Environmental gating — riduzione verde	< 60 s da soglia	3 min
Feed DATEX II → navigatori	< 2 min	5 min
Disponibilità TMC	≥ 99,5% / anno	max 44 h downtime/anno

2. COST — Analisi dei Costi

2.1 Costo Unitario per Incrocio

Componente	Dettaglio	Costo (€)
ATC upgrade/sostituzione	NTCIP 1202/UTMC	4.000–6.000
Telecamere CV + edge AI	2× con SoC YOLOv8	4.000–6.000
Spire induttive	2× fresatura + installazione	2.000–2.800
Radar Doppler 24GHz	1× velocità 0–150 km/h	1.800–2.500
Sensori PIR termici	2× strisce pedonali	600–800
Sensore aria IoT	PM10/NO2/CO, LoRaWAN	500–800
EV Preemption detector	Sirena/lampeggiante 118	1.500–2.500
Cablaggio + fibra	Attestazione su ATC	2.500–4.000
Installazione e opere civili	Montaggio, fresatura, scavi	4.000–6.000
COSTO MEDIO / INCROCIO	Centro-stima con EV preemption	~ € 26.000

2.2 Budget per Fase

Fase	Periodo	CAPEX	Dettaglio principale
0+1 Pilota Soccorso	2026–2028	€ 550.000	6 incroci + TMC + SW + integraz. CROSS/CAP
2 — 4 Zone	2028–2030	€ 2.254.000	100 incroci · € 709k/anno · economie di scala
3 — Città completa	2030–2031	€ 1.660.000	65 incroci residui (config. leggera)
TOTALE CAPEX	5 anni	€ 4.464.000	
OPEX annuale a regime	Anno 6+	€ 269.000/anno	HW maint. + staff 1.5 FTE + licenze + hosting
Risparmio annuale atteso	A regime	€ 290–530k/anno	Energia + TPL + sanità PM10 + incidenti

3. DELIVERY — Piano dei Tempi

3.1 Roadmap Gantt

Il grafico seguente mostra la roadmap completa del progetto dalla progettazione (Aprile 2026) alla copertura dell'intera rete semaforica di Prato (fine 2031).

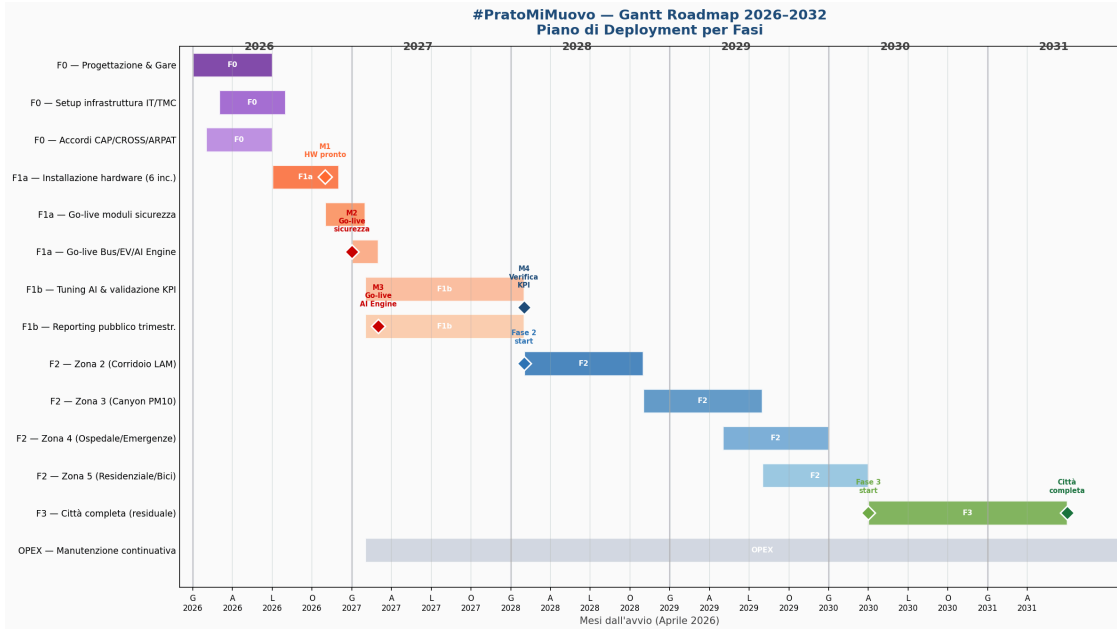


Fig. 1 — Gantt chart roadmap 2026–2032 · Fasi di deployment per zone

3.2 Mappa Fasi di Deployment — Città di Prato

La mappa schematica mostra come il sistema si espande progressivamente sulla città, zona per zona, con priorità basate sull'impatto: corridoio LAM prima, canyon PM10 subito dopo, poi il corridoio ospedale e infine le zone residenziali ciclabili.

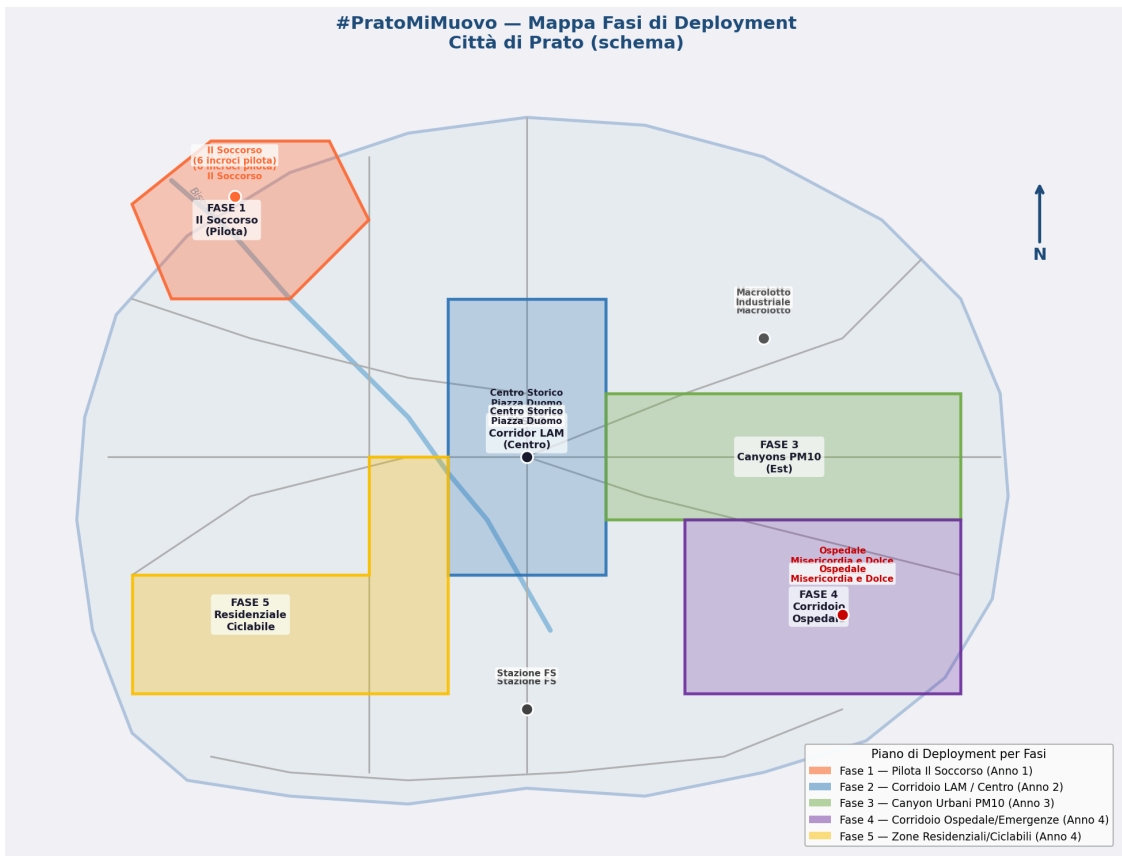


Fig. 2 — Mappa schematica Prato · 5 fasi di deploy per zone · Schema non in scala

4. Fasi Esecutive — Dettaglio

4.1 Fase 0 — Progettazione & Setup (Apr – Set 2026)

Sei mesi di preparazione prima di toccare un singolo semaforo. Obiettivo: avere tutto pronto — gare aggiudicate, server TMC live, accordi firmati — per partire con il cantiere in ottobre.

Attività	Output	Scadenza
Studio di fattibilità + selezione 6 incroci Soccorso	Mappa incroci + censimento ATC esistenti	Mag 2026
Progettazione esecutiva (layout sensori, planimetrie, capitolato tecnico)	Elaborati progettuali firmati	Giu 2026
Avvio gara fornitura hardware IoT/ITS (ATC, camere, radar, PIR, spire)	Bando pubblicato su MEPA/CUC	Giu 2026
Avvio gara sviluppo software TMC e moduli AI	Bando pubblicato	Giu 2026
Setup server TMC (Kafka, Flink, InfluxDB, PostgreSQL, EMQX)	Infrastruttura IT live in staging	Set 2026
Accordo tecnico con CAP (feed GTFS-RT bus LAM)	MOU firmato + endpoint test	Set 2026
Accordo con CROSS / Regione Toscana (preemption ambulanze)	Protocollo operativo firmato	Set 2026
Accordo con ARPAT (accesso API qualità aria)	Chiave API + SLA definito	Set 2026
Piano comunicazione community II Soccorso	Kit comunicazione + primo post social	Set 2026

4.2 Fase 1a — Deployment Pilota II Soccorso (Ott 2026 – Feb 2027)

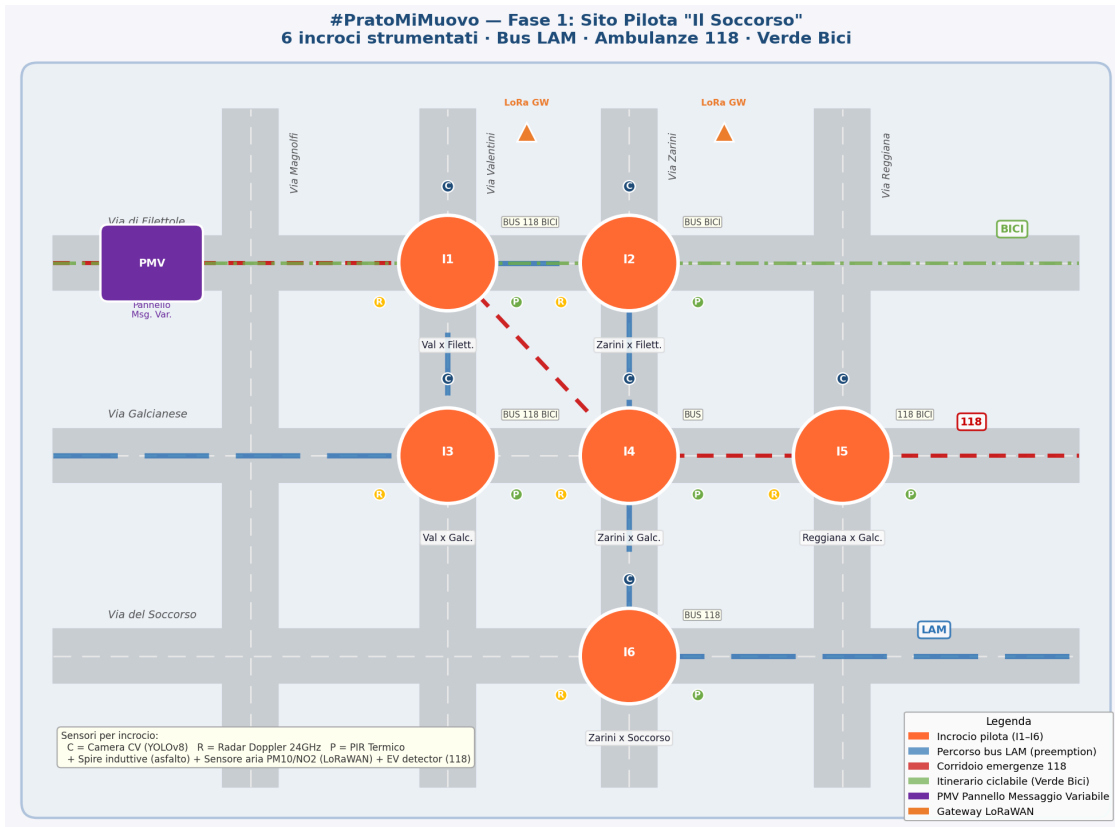


Fig. 3 — Sito pilota Il Soccorso · 6 incroci · percorso LAM (blu) · corridoio 118 (rosso) · itinerario ciclabile (verde)

Il quartiere Il Soccorso viene scelto come banco di prova per ragioni precise: alta densità di traffico misto (auto, bus LAM, biciclette, pedoni), presenza di un corridoio bus rilevante, strade con problemi di PM10 e assenza di interventi semaforici recenti.

Milestone	Descrizione	Data
M1 — Posa fibra + gateway LoRaWAN	Backbone zona Soccorso · 2 gateway su pali	Ott 2026
M2 — HW incroci I1–I3	ATC, camere CV, spire, radar, PIR, aria	Nov 2026
M3 — HW incroci I4–I6	Completamento hardware · PMV + LED adattivo	Dic 2026
M4 — Go-live MONITOR ONLY	Dati sensori → TMC · nessun comando ATC ancora	Gen 2027
M5 — Attivazione Sicurezza Attiva	Pedestrian Extension + Dilemma Zone in produzione	Gen 2027
M6 — Attivazione Emergency Preemption (118)	CROSS integrato · test con ambulanze 118	Feb 2027
M7 — Attivazione Bus Priority LAM	Preemption semaforica su corridoio pilota	Feb 2027
M8 — Go-live AI Engine + Verde Bici	Ottimizzazione PPO live · LPI ciclisti attivo	Feb 2027
M9 — Acceptance test + prima reportistica	Verifica KPI · dashboard pubblica · post social	Mar 2027

4.3 Schema Tecnico — Incrocio Intelligente Tipo

Ogni incrocio strumentato segue questo layout standard. I sensori sono posizionati per coprire tutte le direzioni di traffico. Ogni componente ha una funzione specifica e comunica con il TMC tramite fibra o 4G.

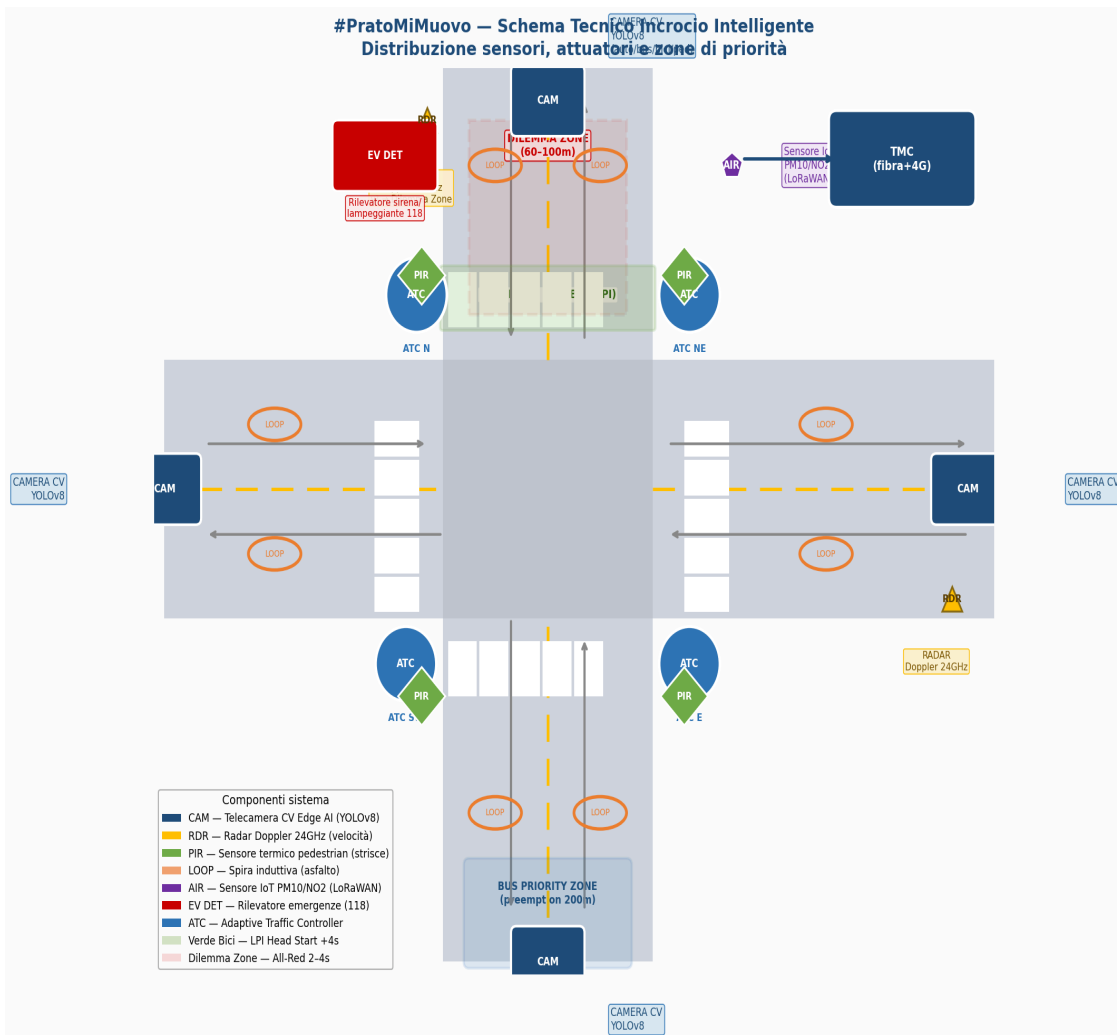


Fig. 4 — Schema tecnico incrocio intelligente tipo · sensori, attuatori, zone di priorità

Componente	Funzione	Protocollo
CAM — Telecamera CV (edge, YOLOv8)	Conta e classifica veicoli, bici, pedoni in tempo reale	RTSP → MQTT · TLS 1.3
RDR — Radar Doppler 24GHz	Velocità dei veicoli in arrivo: calcola se entrano in Dilemma Zone	MQTT · QoS 2
PIR — Sensore termico (strisce pedonali)	Rileva presenza e velocità pedoni: attiva Pedestrian Extension	LoRaWAN EU868
LOOP — Spira induttiva (asfalto)	Conteggio passaggi, occupancy corsia, coda	RS-485 → MQTT
AIR — Sensore IoT PM10/NO2/CO	Qualità aria locale: attiva Environmental TM se soglia superata	LoRaWAN Class A
EV DET — Rilevatore emergenze	Rileva sirena/lampeggiante ambulanza: preemption locale immediata	MQTT · QoS 2
ATC — Adaptive Traffic Controller	Esegue i comandi del TMC sui semafori · Failsafe autonomo	NTCIP 1202 / REST

4.4 Fase 1b — Tuning e Validazione (Mar 2027 – Mar 2028)

Un anno di produzione con focus sull'ottimizzazione. Il sistema gira con tutti i moduli attivi: si raccolgono dati reali, si confrontano con i KPI target e si calibra l'AI Engine.

Trimestre	Attività principale	Deliverable
Q2 2027(Apr–Giu)	Raccolta dati baseline · Analisi delta attese semafori vs. pre-sistema · Primo tuning reward function AI	Report T1 pubblico · Dashboard open data live
Q3 2027(Lug–Set)	Calibrazione soglie: velocità pedone PIR, distanza Dilemma Zone radar, isteresi PM10 · Ottimizzazione LPI ciclisti per incrocio	Report T2 · Parametri calibrati in produzione
Q4 2027(Ott–Dic)	Verifica intermedia KPI · Test stress natalizio (traffico anomalo) · Simulazione failure TMC (piano fisso failsafe)	Report T3 · Piano contingency validato
Q1 2028(Gen–Mar)	Verifica formale KPI (-20% attese, -30% PM10, -30% delay LAM) · Go/No-Go Fase 2 · Reportistica finale pilota	Delibera Go/No-Go · Report finale pilota pubblico

4.5 Fase 2 — Estensione 4 Zone (Apr 2028 – Giu 2030)

Il modello pilota è replicabile. Hardware, configurazione e procedure sono standardizzati. Ogni zona viene deployata in 9 mesi. L'ordine di priorità è basato sull'impatto atteso.

Zona	Periodo	Area / Strade chiave	Razionale	Incroci
Zona 2 Corridoio LAM	Apr–Dic 2028	Viale della Repubblica / Via Valentini · asse NS centrale	Massimo impatto puntualità bus LAM · alta densità ciclisti	25
Zona 3 Canyon PM10	Gen–Set 2029	Via Pistoiese / SS325 · asse EW alta densità traffico	Strade più critiche per qualità aria · Environmental TM prioritario	25
Zona 4 Ospedale/118	Ott 2029–Feb 2030	Corridoio Ospedale Misericordia e Dolce · zone est	Emergency Preemption su percorsi ambulanza + Bus Priority	25
Zona 5 Resid./Ciclabili	Mar–Giu 2030	San Paolo · Galciana · zone residenziali ad alta densità bici/ped	Verde Bici e Pedestrian Extension su itinerari ciclabili PUMS	25
TOTALE FASE 2	26 mesi	4 zone · rete semi-completa	Budget: ~ € 2.254.000	100

4.6 Fase 3 — Connessione Completa (2030–2031)

I nodi residuali (~65 incroci) vengono valutati caso per caso: non tutti richiedono strumentazione completa. Incroci a basso traffico o già rimodernati possono ricevere configurazioni leggere (solo ATC upgrade + loop, senza telecamere CV). Entro fine 2031 Prato ha una rete semaforica intelligente su tutta la maglia urbana.

4.7 Matrice dei Rischi

Rischio	Prob.	Impatto	Mitigazione
Ritardo gare d'appalto	Alta	Alto	Avvio gare in parallelo in Fase 0 · Uso framework MEPA/Consip
ATC esistenti non compatibili NTCIP/UTMC	Media	Medio	Censimento ATC in Fase 0 · Costo sostituzione già nel budget
Integrazione CROSS (118) ritardata	Media	Alto	Accordo avviato in Fase 0 · Fallback: rilevamento locale sirena/ottico
KPI non raggiunti al termine Anno 1	Bassa	Alto	12 mesi di tuning prima valutazione · Go/No-Go basato su dati
Variazioni costo hardware IoT	Media	Medio	Contingency 8–10% per fase · Gare pluriennali con prezzi bloccati
Resistenza politica o dei cittadini	Bassa	Alto	Piano editoriale #PratoMiMuovo · Dashboard open data pubblica

#PratoMiMuovo

Da città statica a città reattiva.

QCD Analysis v2.0 — Aprile 2026 — Matteo Tempestini