ASSE PRIORITARIO 1 BIS - TECNOLOGIE DIGITALI, PULITE E BIOTECNOLOGIE: CONTRIBUTO ALLA PIATTAFORMA STEP OBIETTIVO SPECIFICO 1.6 - SOSTENERE GLI INVESTIMENTI CHE CONTRIBUISCONO AGLI OBIETTIVI DELLA PIATTAFORMA PER LE TECNOLOGIE STRATEGICHE PER L'EUROPA (STEP) DI CUI ALL'ART. 2 DEL REGOLAMENTO UE 2024/795 AZIONE 1.6.1 – SOSTENERE LO SVILUPPO E LA FABBRICAZIONE DI TECNOLOGIE CRITICHE AIUTI PER LO SVILUPPO E LA FABBRICAZIONE DI TECNOLOGIE CRITICHE STEP – II EDIZIONE D.D. n. 61 del 14/11/2025

Il Progetto

WasteGuard: *Sistema di Verifica Preventiva e Feedback Immediato per la Raccolta Differenziata Intelligente*

Il modello di raccolta "porta a porta", che ha contribuito negli ultimi decenni ad aumentare il tasso di raccolta differenziata dei rifiuti urbani, mostra oggi problemi strutturali che ne limitano l'efficacia Errore: sorgente del riferimento non trovataErrore: sorgente del riferimento non trovata. Da un lato, la rigidità temporale del servizio costringe i cittadini a organizzare la propria quotidianità attorno ai giorni di raccolta, generando inefficienze e disservizi che si acuiscono nelle realtà urbane caratterizzate da elevata densità abitativa Errore: sorgente del riferimento non trovata. Le difficoltà maggiori riguardano la popolazione anziana, in crescita esponenziale nei prossimi decenni, che incontra ostacoli oggettivi nella gestione fisica dei conferimenti Errore: sorgente del riferimento non trovata. Dall'altro, il modello porta a porta fa emergere una contraddizione intrinseca in termini di sostenibilità economica e ambientale, in quanto flotte di veicoli attraversano capillarmente il territorio secondo schedulazioni predeterminate, indipendentemente dall'effettiva necessità di svuotamento dei cassonetti, causando uno spreco di risorse energetiche e un incremento delle emissioni climalteranti e della congestione del traffico urbano Errore: sorgente del riferimento non trovata.

Le isole ecologiche intelligenti di prossimità hanno il potenziale di superare questi limiti, grazie a tre caratteristiche chiave:

- la distribuzione capillare sul territorio elimina i vincoli di orario, garantendo massima flessibilità ai cittadini Errore: sorgente del riferimento non trovata;
- i sensori IoT ottimizzano la raccolta, attivando gli svuotamenti solo quando necessario anziché per calendario Errore: sorgente del riferimento non trovata;
- l'identificazione utente permette tariffe puntuali basate sui rifiuti effettivamente prodotti, applicando il principio "*chi inquina paga*" Errore: sorgente del riferimento non trovata.

Tuttavia, l'automazione del conferimento introduce una vulnerabilità assente nel modello porta a porta, ovverosia la mancanza del controllo umano immediato Errore: sorgente del riferimento non trovataErrore: sorgente del riferimento non trovataErrore: sorgente del riferimento non trovata. Nel sistema tradizionale, l'operatore ecologico funge da primo filtro qualitativo, rifiutando sacchetti palesemente non conformi e mantenendo così una forma di feedback diretto. Nelle isole automatizzate, questa funzione di gate-keeping scompare e, pertanto, qualsiasi materiale inserito nell'apertura designata precipita nel contenitore, mescolandosi irrimediabilmente con i conferimenti corretti Errore: sorgente del riferimento non trovata. Le strategie correttive

attualmente disponibili si collocano tutte in una logica ex post e risultano problematiche sotto molteplici profili. Innanzitutto, l'approccio sanzionatorio, basato sull'identificazione dell'utente responsabile e sulla successiva irrogazione di multe, è inefficiente, perché richiede personale dedicato alle verifiche ispettive, genera contenziosi amministrativi, e soprattutto interviene quando il danno ambientale si è già materializzato Errore: sorgente del riferimento non trovata. Dal punto di vista educativo, la letteratura comportamentale evidenzia che un cittadino che riceve una sanzione settimane dopo il conferimento errato, difficilmente connette cognitivamente causa ed effetto, percependo il sistema come punitivo e mostrando resistenza anziché cambiamento comportamentale Errore: sorgente del riferimento non trovata.

Si configura così un dilemma progettuale: *come preservare i vantaggi delle isole ecologiche intelligenti minimizzando il rischio di contaminazione, senza ricadere in approcci puramente punitivi che risultano comunque inefficaci nel prevenire il danno ambientale?*

Il progetto **WasteGuard** nasce per rispondere a queste esigenze, attraverso l'implementazione di un sistema di verifica automatica che interviene preventivamente sul conferimento dei rifiuti, trasformando le isole ecologiche da semplici contenitori intelligenti in dispositivi capaci di validare la qualità dei materiali in tempo reale. L'architettura della soluzione (vedi Figura 1) si sviluppa lungo tre direttrici—***meccanico, cognitivo e relazionale***—che operano sequenzialmente per intercettare, analizzare e rispondere al comportamento dell'utente nel momento stesso del conferimento.



Figura 1: Architettura di WasteGuard

Quando il cittadino identificato conferisce un sacchetto (Figura 2), quest'ultimo viene intercettato in una camera di ispezione anziché cadere direttamente nel contenitore. Un sistema di taglio adattivo apre il sacchetto gestendo materiali diversi (plastica, bioplastica, carta) e il contenuto

viene riversato su una piattaforma dove avviene l'analisi. La piattaforma è dotata di telecamere ad alta risoluzione e sensori iperspettrali che operano in sinergia: le prime catturano immagini dettagliate da angolazioni multiple mentre la piattaforma ruota, i secondi identificano la composizione chimica dei materiali attraverso firme spettrali, distinguendo ad esempio diversi tipi di plastiche altrimenti indistinguibili visivamente. Modelli di IA operanti all'edge prima segmentano e isolano ogni singolo oggetto presente, poi classificano ciascun elemento in categorie specifiche (PET, alluminio, carta, organico, ecc.) e valutano la gravità della contaminazione.

In base all'analisi, il motore decisionale di **WasteGuard** attiva risposte graduate e configurabili dagli amministratori, visualizzate sullo schermo interattivo posto in prossimità dell'utente che mostra in tempo reale cosa sta accadendo attraverso animazioni facilmente comprensibili:

- Se il contenuto è conforme, viene accettato con feedback positivo.
- Per errori marginali (ad esempio, un tappo di plastica lasciato su una bottiglia di vetro), il sistema accetta comunque il conferimento ma spiega all'utente quale imprecisione è stata rilevata e come correggerla la prossima volta, senza penalizzazioni.
- Per contaminazioni gravi, il contenuto viene espulso e reinserito in un sacchetto biodegradabile che l'utente deve recuperare.



Figura 2: Camera d'ispezione

Questa flessibilità consente un approccio educativo graduale al corretto conferimento, dove il sistema si mostra tollerante con gli utenti alle prime esperienze, ma diventa progressivamente più rigoroso quando rileva comportamenti scorretti reiterati. L'esperienza utente si estende oltre l'isola ecologica attraverso un'applicazione mobile (Figura 3) che permette ai cittadini di monitorare le proprie performance nel tempo, confrontarle con le medie di quartiere e ricevere consigli personalizzati. Elementi di gamification calibrati introducono dinamiche motivazionali senza banalizzare l'obiettivo ambientale, trasformando la raccolta differenziata in un percorso di miglioramento continuo.



Figura 3: Mobile App

Sul versante gestionale, ogni conferimento genera dati che il sistema elabora per fornire agli amministratori strumenti decisionali concreti. Le dashboard interattive (Figura 4) visualizzano mappe degli errori per quartiere, andamenti temporali e classificazioni per tipologia, permettendo di identificare rapidamente le zone critiche e pianificare campagne informative mirate. Gli algoritmi di machine learning analizzano questi dati per individuare utenti con comportamenti problematici ricorrenti, prevedere picchi di conferimento legati a festività o eventi climatici, e ottimizzare dinamicamente i percorsi di raccolta in base al riempimento effettivo dei contenitori. Il risultato è una riduzione significativa dei chilometri percorsi e delle emissioni di CO_2.

Completano la soluzione **WasteGuard** sensori diagnostici che monitorano continuamente i componenti critici e algoritmi di manutenzione predittiva che segnalano degradi prima che diventino guasti, garantendo affidabilità e continuità del servizio.



Figura 4: Dashboard amministrative

Le linee di intervento sopra descritte avranno un impatto notevole nel settore della gestione dei rifiuti urbani, che si articolerà su tre dimensioni complementari:

- **Ambientale ed economico**: WasteGuard ridurrà la contaminazione dei materiali raccolti dal 15-20% attuale Errore: sorgente del riferimento non trovata a meno del 5%, aumentando il valore di quanto può essere effettivamente riciclato. La logistica basata sui dati reali di riempimento dei cassonetti taglierà del 35-45% i chilometri percorsi dai mezzi di raccolta, con benefici immediati su emissioni e costi operativi.
- **Educativo**: Il feedback istantaneo creerà un apprendimento efficace, perché non si tratterà più di seguire regole astratte sotto la minaccia di una multa, ma di capire concretamente cosa si sta facendo bene o male, nel momento stesso in cui lo si fa.
- **Sociale**: Eliminando i vincoli di orario, il sistema restituirà autonomia ai cittadini, con vantaggi immediati per anziani, famiglie con esigenze di flessibilità oraria e persone con ridotta mobilità.

Infine, la natura general purpose del progetto consentirà di sfruttare le soluzioni tecnologiche implementate anche in altri contesti, come ad esempio nell'ambito della sanità e la gestione dei rifiuti speciali, economia circolare e mercati secondari (e.g., valutazione dello stato dei prodotti conferiti, indirizzandoli verso percorsi di riparazione, ricondizionamento o riciclo appropriati), agricoltura di precisione (e.g., analisi dello stato di maturazione di frutta e ortaggi, rilevamento precoce di patologie vegetali, valutazione della qualità del suolo), settore industriale e commerciale (e.g., controllo qualità automatizzato nelle linee di produzione manifatturiera), etc.