



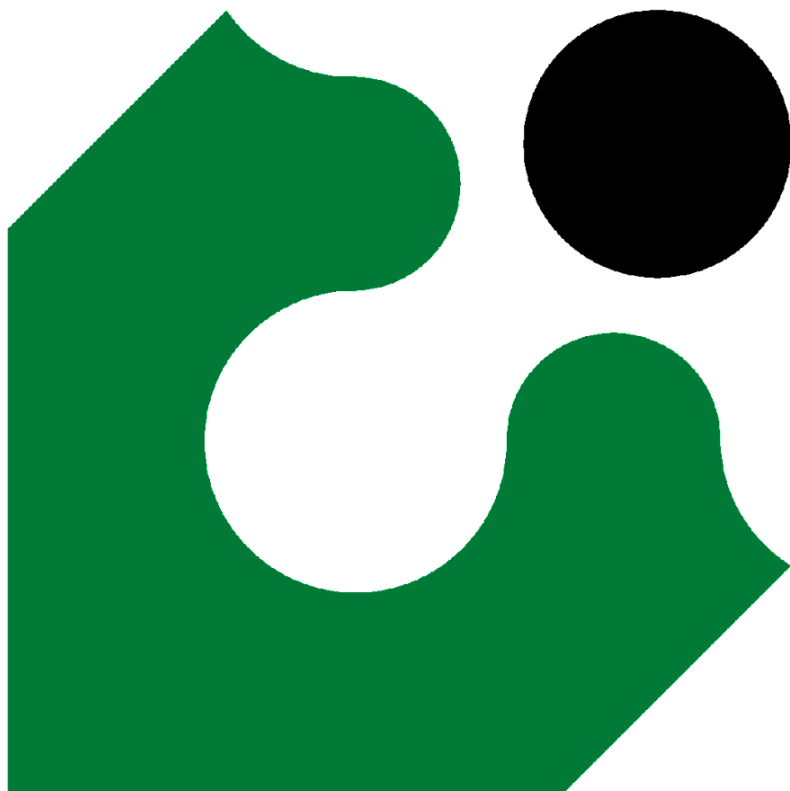
Analisi delle nuove tecnologie per il miglioramento della sicurezza stradale

I quaderni del Centro Regionale Lombardo di governo e monitoraggio della
sicurezza stradale (CMRL)

Codice PoliS-Lombardia

221313OSS

Novembre 2023



Analisi delle nuove tecnologie per il miglioramento della sicurezza stradale

Quaderno

Promosso da Giunta Regionale - Regione Lombardia

nell'ambito del Piano 2019 per incarico della Direzione Generale Sicurezza

(Codice PoliS-Lombardia: 221313OSS)

Gruppo di lavoro tecnico: Fiorella Daniele

Dirigente responsabile: Gabriella Volpi

PoliS-Lombardia

Dirigente Generale: Fulvio Matone

Direttore scientifico: Raffaello Vignali

Gruppo di ricerca:

Roberta Rossi, PoliS-Lombardia

Responsabili scientifici: Giulio Maternini, Direttore del CeSCAM (Centro Studi Città Amica per la sicurezza nella Mobilità) e Benedetto Barabino dell'Università degli Studi di Brescia.

Gruppo di ricerca: Martina Carra, Roberto Ventura, Tommaso Cigognetti, Nuhamin Gezehagne Assefa, Laura Ferretto, Alberto Rutter, Università degli Studi di Brescia.

Pubblicazione non in vendita.

Nessuna riproduzione, traduzione o adattamento
può essere pubblicata senza citarne la fonte.

Copyright® PoliS-Lombardia

PoliS-Lombardia

Via Taramelli, 12/F - 20124 Milano

www.polis.lombardia.it

Analisi delle nuove tecnologie
per il miglioramento della sicurezza stradale

**Analisi delle nuove tecnologie
per il miglioramento della sicurezza stradale**

I quaderni del Centro Regionale Lombardo di governo e monitoraggio della
sicurezza stradale (CMRL)

Codice PoliS-Lombardia

221313OSS

Novembre 2023

INDICE

Introduzione	5
Capitolo 1 - Sistemi articolati e complessi installati sulle infrastrutture	8
1.1 <i>On-crossing</i> , un esempio di rilevamento dei pedoni in fase di attraversamento stradale	9
1.2 <i>Kerbside</i> , un esempio di rilevamento dei pedoni in attesa d’impegnare l’attraversamento pedonale dal lato strada	10
1.3 Un sensore di traffico termico integrato: la <i>ThermiCam™</i>	11
1.4 <i>C-Walk</i> e <i>SafeWalk</i> : due sensori che indicano la presenza di pedoni	13
1.5 Sensore <i>SISAS Pedestrian Save</i> : doppia tecnologia di rilevazione dei pedoni in prossimità degli attraversamenti pedonali	14
1.6 Semafori intelligenti	15
1.7 Segnaletica stradale orizzontale fotoluminescente	19
1.8 Guardrail intelligente “ <i>Andromeda</i> ”	20
1.9 Lampioni intelligenti.....	23
1.10 Sistema <i>Heads-up</i> di <i>Acusensus</i>	25
1.11 Pavimentazione stradale intelligente.....	27
1.12 Segnaletica stradale luminosa dinamica “ <i>Flowell</i> ”	29
1.13 Sistema “ <i>Pedone sicuro 2.0</i> ”	31
1.14 Strisce luminose “ <i>Zebrabright</i> ”	34
1.15 Strisce pedonali intelligenti.....	35
1.16 Strisce pedonali stigmergiche <i>Starling Crossings</i>	37
1.17 <i>Air Crosswalk</i>	39
1.18 Segnaletica orizzontale “ <i>salvamotociclisti</i> ”	40
1.19 Sistema <i>Salva Pedone®</i>	41
Capitolo 2 - Sistemi installati a bordo del veicolo	45
2.1 <i>ISA - Intelligent Speed Adaptation</i>	45
2.2 <i>Frenata automatica di emergenza (AEB)</i>	48
2.3 <i>LSS - Lane Support Systems</i>	51
2.4 Sistema di monitoraggio degli angoli ciechi (<i>BSM</i>)	54
2.5 <i>TSR - Traffic Sign Recognition</i>	56
2.6 <i>Pedestrian protection system Bosch</i>	58
2.7 <i>Fatigue detection</i>	60
Capitolo 3 - Altri dispositivi	63
3.1 <i>Digital twin</i> dell’infrastruttura stradale	63
3.2 <i>Pesatura dinamica dei veicoli (WIM)</i>	64
3.3 <i>LETISmart</i> , il bastone intelligente per non vedenti e ipovedenti	66
Capitolo 4 - Tabella riassuntiva	70
Note e riferimenti bibliografici	72

Introduzione

Le nuove tecnologie per il miglioramento della sicurezza stradale, attualmente in fase di sviluppo e di sperimentazione sfruttano principalmente i dispositivi *IoT - Internet of Things* per combinare hardware, come sensori e telecamere, software ed algoritmi che sfruttano l'Intelligenza Artificiale e l'analisi dei Big Data [1]. L'enorme mole di dati ricavata dai sensori, infatti, viene elaborata da software in grado di compiere analisi [2]:

- predittive, che permettono di ricavare dai dati previsioni su eventi che si verificheranno in futuro;
- prescrittive, che forniscono indicazioni su cosa sia opportuno fare per reagire nel modo migliore al verificarsi di determinati eventi;
- cognitive, che vengono eseguite grazie alla messa a punto di algoritmi, in grado di trasformare i dati grezzi in conoscenza e trasmettere le informazioni ottenute agli utenti della strada.

Le nuove tecnologie per la sicurezza stradale si dividono in due macrogruppi [3]:

1. sistemi di sicurezza installati sull'infrastruttura stradale;
2. sistemi di sicurezza montati sul veicolo.

I sistemi installati sull'**infrastruttura** stradale sono principalmente costituiti da:

- sensori montati lungo la strada per la raccolta dei dati;
- apparecchiature installate a bordo strada per l'emissione di avvisi e indicazioni per gli utenti.

I vantaggi di questo tipo di sistemi di sicurezza sono la capacità di raccogliere dati relativi ai flussi di traffico, alla presenza di incidenti od ostacoli, alle condizioni meteorologiche e del manto stradale, che i sensori installati a bordo dei veicoli non sarebbero in grado di ottenere. I dati e le informazioni raccolte, inoltre, possono essere riportati sulla segnaletica stradale e trasmesse in tempo reale a tutti gli utenti della strada nelle vicinanze.

Un problema legato ai sistemi installati sulle infrastrutture stradali è la necessità di standardizzare le informazioni trasmesse, in modo da renderle più comprensibili e facilmente interpretabili dagli automobilisti, dai ciclisti e dai pedoni.

I sistemi installati **a bordo** dei veicoli sono dotati di:

- sensori installati sul veicolo per la raccolta dei dati;
- unità di bordo (*OBU*), che emettono avvisi per il conducente o assumono il controllo parziale del veicolo.

Il vantaggio di questi sistemi è che sono in grado di avvertire il conducente di potenziali pericoli e di prendere parzialmente il controllo del veicolo nel tentativo di evitare collisioni. Questi vantaggi, tuttavia, riguardano solamente i veicoli dotati di tali sistemi. È inoltre necessario che questi dispositivi di sicurezza siano perfettamente affidabili e seguano degli standard ben precisi, così da non creare confusione nei conducenti, nel caso ci fossero diverse versioni di questi sistemi in commercio. È anche importante che i conducenti siano consapevoli di ciò che il sistema di sicurezza è in grado di eseguire per evitare le collisioni e ridurre i pericoli, al fine di non essere troppo dipendenti dalle unità di bordo. I dispositivi di sicurezza installati sull'infrastruttura e quelli montati a bordo dei veicoli sono inoltre in grado di comunicare tra di loro.

Analisi delle nuove tecnologie per il miglioramento della sicurezza stradale

Lo scambio di dati può avvenire in due direzioni:

- dall'infrastruttura ai veicoli, nel caso, ad esempio, di informazioni relative a limiti di velocità, condizioni del traffico e della strada;
- dai veicoli all'infrastruttura, quando, ad esempio, avviene un incidente e viene inviata automaticamente la richiesta di soccorsi.

Nella tabella 1, invece, vengono distinti i sistemi omologati da quelli non ancora omologati in fase di sperimentazione.

Tabella 1 - Sistemi omologati e non omologati.

Tecnologia	Omologato / non omologato
Semafori intelligenti	Non ancora omologati
Segnaletica stradale fotoluminescente	Non ancora omologata
Guardrail intelligente "Andromeda"	Omologato secondo lo standard americano MASH-16 e con certificazione europea EN 1317
Lampioni intelligenti	Non ancora omologati
Sistema Heads-up	Testato in Australia, non ancora omologato
Pavimentazione stradale intelligente	In fase sperimentale in Colorado, non ancora omologata
Digital twin dell'infrastruttura stradale	In fase sperimentale, non ancora omologato
Segnaletica luminosa "Flowell"	In fase sperimentale in Francia, non ancora omologata
Sistema Pedone sicuro 2.0	Omologato a norma CEE
Strisce luminose "Zebrabright"	In fase sperimentale in UK, non ancora omologate
Strisce pedonali intelligenti	In fase sperimentale in Spagna, non ancora omologate
Strisce stigmergiche "Starling Crossing"	In fase sperimentale a Londra, non ancora omologate
Air Crosswalk	Testato in Russia, non ancora omologato
Virtual Wall	Idea puramente concettuale mai sperimentata
Segnaletica orizzontale "salvamotociclisti"	In fase sperimentale in Austria, Lussemburgo e Germania. Non ancora omologata
Intelligent Speed Adaptation	Omologato e obbligatorio in UE dal 6 Luglio 2022
Autonomous Emergency Braking	Omologato e obbligatorio in UE dal 6 Luglio 2022
Lane Support Systems	Omologato e obbligatorio in UE dal 6 Luglio 2022
Blind Spot Monitoring System	Omologato e obbligatorio in UE dal 6 Luglio 2022
Traffic Sign Recognition System	Omologato e obbligatorio in UE dal 6 Luglio 2022
Pesatura dinamica WIM	Omologato nell'Unione Europea

Elaborazione CeSCAM.

La sensoristica applicata alla sicurezza stradale, alla mobilità di ciclisti e pedoni, ecc., è un settore in pieno sviluppo. Una vastissima gamma di soluzioni è già stata introdotta sul mercato, altrettante sono in fase di sperimentazione.

Questo studio è stato dunque concepito e strutturato sia su un'analisi tecnologico-funzionale dei singoli sensori già immessi sul mercato, dedicati alla (o appositamente concepiti per la) sicurezza della mobilità pedonale e ciclistica, sia su studi analitici dei sistemi sensoristici complessi già diffusi. Nell'affrontare questi ultimi, il quaderno non si addentra tuttavia nel tema dell'auto a guida autonoma.

Analisi delle nuove tecnologie
per il miglioramento della sicurezza stradale

Sono stati omessi da questo Quaderno analisi e riferimenti:

- ad attività di ricerca settoriale rimasti per ora a livello progettuale;
- a progetti e sperimentazioni cessati ai sensi di provvedimenti legislativo-normativi.

Il metodo adottato per analizzare ciascuna soluzione applicata tanto all'infrastruttura, quanto a bordo del veicolo, oppure inserita tra altri dispositivi è molto semplice, consiste nei seguenti standard di presentazione:

- descrizione della soluzione e/o del sistema;
- vantaggi e svantaggi;
- esempi di applicazione.

Capitolo 1 - Sistemi articolati e complessi installati sulle infrastrutture

L'Italia è un Paese geomorfologicamente articolato e le sue aree interne collinari e montane obbligarono nel passato e continuano ad obbligare ai nostri giorni a realizzare tracciati stradali tortuosi, per superare le curve di livello. Le strade più datate presentano alcune tratti e curve talvolta molto pericolosi. L'uso di sensori per segnalare eventuali presenze di code dopo una curva cieca, ad esempio, diviene di vitale importanza.

Le nuove tecnologie per il miglioramento della sicurezza stradale, basate su sistemi installati direttamente sull'infrastruttura, tramite l'implementazione di vari tipi di sensori e telecamere e l'utilizzo di algoritmi che elaborano i dati raccolti, contribuiscono a risolvere i sopracitati ed altrettanti problemi, essendo in grado di:

- raccogliere informazioni relative ai flussi di traffico e gestire la circolazione e la fermata o la sosta dei veicoli, dei ciclisti e dei pedoni¹ in modo da rendere le strade più fruibili e ridurre il rischio di incidenti;
- migliorare la visibilità delle strade e della relativa segnaletica, specialmente di notte, in condizioni meteorologiche avverse (pioggia, ghiaccio, nebbia);
- monitorare sia le condizioni sia le situazioni critiche (movimenti franosi, incendi, presenza di liquidi sull'asfalto, ecc.) che possano interessare le infrastrutture stradali, in modo da programmare i necessari interventi di manutenzione, ma anche classificare le diverse tipologie di veicoli che vi circolano;
- monitorare i comportamenti di tutti gli utenti della strada, segnalando alle autorità le eventuali infrazioni commesse alla guida;
- ridurre al minimo le conseguenze per tutte le persone coinvolte in caso di incidente.

I nuovi sistemi installati sulle infrastrutture stradali, alcuni dei quali sono ancora in fase di sviluppo, includono:

- soluzioni sensoristiche semplici:
 1. sensori per il rilevamento dei pedoni in fase di attraversamento stradale (*On-crossing*);
 2. sensori per il rilevamento dei pedoni in attesa d'impegnare l'attraversamento pedonale dal lato strada (*Kerbside*);
 3. sensori termici di traffico integrato: la *ThermCamTM*;
 4. *C-Walk* e *Safe-Walk*, due sensori che indicano la presenza di pedoni;
 5. *SISAS Pedestrian Safe*;
- soluzioni inerenti alla sicurezza stradale e sistemi sensoristici articolati e complessi dedicati:
 6. Semafori intelligenti;
 7. Segnaletica stradale orizzontale fotoluminescente;
 8. *Guardrail* intelligente "*Andromeda*";

¹ Per esempio lo stazionamento dei veicoli e/o presenza di persone dopo una curva cieca.

9. Lampioni intelligenti;
10. Sistema *Heads-up* di *Acusensus*;
11. Pavimentazione stradale intelligente;
12. Segnaletica stradale luminosa didattica "*Flowell*";
13. Sistema "*Pedone sicuro 2.0*";
14. Strisce luminose "*Zebrabright*";
15. Strisce pedonali intelligenti;
16. Strisce pedonali stigmergiche *Starling Crossing*;
17. *Air Crossing*;
18. Segnaletica orizzontale "salvamotociclisti";
19. Sistema "*Salva Pedone*".

1.1 *On-crossing*, un esempio di rilevamento dei pedoni in fase di attraversamento stradale

1.1.1 Descrizione

Progettato per essere utilizzato in coppia, questa soluzione *Doppler CW* fornisce un rilevamento affidabile dei pedoni durante l'attraversamento della sede stradale. L'uso di rilevatori "*on-crossing*" fa sì che l'intervallo cronologico della lanterna semaforica disposta sul verde pedonale si perpetui, ritardando l'attivazione del segnale verde per i veicoli, in conflitto con il primo. Lo scopo è permettere ai pedoni di oltrepassare la carreggiata stradale in tutta sicurezza in corrispondenza delle strisce zebraate, migliorando notevolmente l'efficienza dell'attraversamento pedonale rispetto l'obsoleta modalità di attraversamento pedonale regolata da tempi ciclici fissi.

Le peculiarità del sensore *On-Crossing* risultano le seguenti:

- range operativo, fino a 12 m;
- larghezza della zona d'attraversamento tipicamente rilevata, fino ad almeno 4 m;
- velocità della soglia minima del pedone < 0,5 m/s;
- posizione del rilevatore, ai lati dell'attraversamento pedonale; nessuna regolazione speciale è necessaria per evitare interferenze tra le unità;
- altezza dal suolo di montaggio del rilevatore variabile (possono esserne adottate varie): ≥ 3 m; $\leq 4,5$ m.

1.1.2 Vantaggi e svantaggi

Le peculiarità del sensore corrispondono ai principali vantaggi, a partire dalla larghezza dell'area rilevabile, dal posizionamento dell'apparecchiatura, ecc. Svantaggi sono rilevabili nelle avarie e nei malfunzionamenti soprattutto endogeni o esogeni, dovuti ad eventuali avarie sistemiche, cali di tensione, *black-out*, ecc.

1.1.3 Immagini esemplificative

Soluzione tecnologica immessa e diffusa sul mercato.

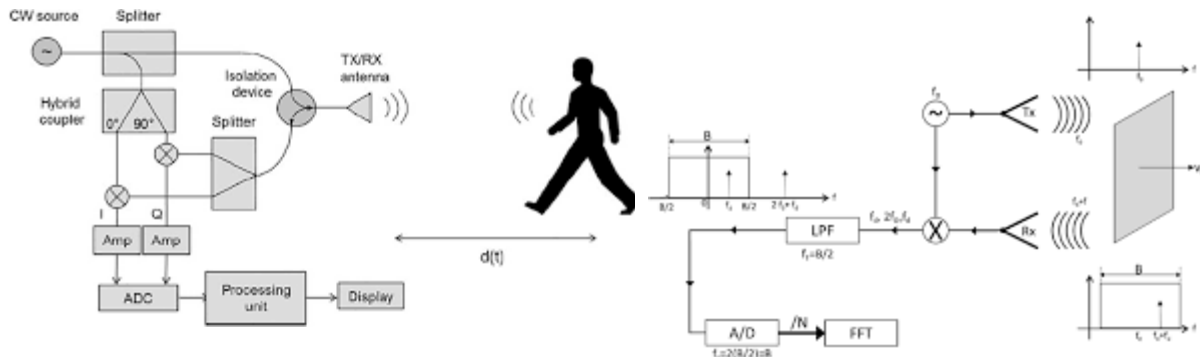


Figura 1 - A destra architettura del CW-Continuous Wave Doppler radar; a sinistra schema funzionamento Doppler CW.
Fonte: (a) Raffo et al. (2017). Software Defined Doppler Radar as a Contactless Multipurpose Microwave Sensor for Vibrations Monitoring, *Sensors* 17(1):115; (b) Gennarelli et al. (2022). CW Doppler Radar as Occupancy Sensor: A Comparison of Different Detection Strategies. *Frontiers* 2.

1.2 Kerbside, un esempio di rilevamento dei pedoni in attesa d'impegnare l'attraversamento pedonale dal lato strada

1.2.1 Descrizione

Utilizzando un'avanzata progettazione "a doppia antenna" del rilevatore Heimdall collocato a lato della strada si ottiene un affidabile rilevamento dei pedoni in attesa d'attraversare la sede stradale. L'uso esclusivo di due antenne integrate permette al rilevatore di fornire ottime prestazioni verso molteplici tipologie di intersezioni stradali, senza la necessità di utilizzare un software di set-up complesso e costoso.

Servendosi di un radar avanzato per queste applicazioni, i problemi che potrebbero insorgere attraverso l'uso di altre tecnologie, come quelle che si basano sulle tecnologie video, vengono eliminati e le unità "kerbside" Heimdall assolvono le loro funzioni sia in condizioni di piena luminosità, sia nella totale oscurità in quanto completamente immuni dagli effetti delle ombre. Le caratteristiche operative delle unità Kerbside risultano le seguenti:

- il range operativo consta d'aree d'attesa di larghezza $\leq 4,5$ m (impostazione DIP switch per le aree di attesa brevi e attese lunghe);
- larghezza della zona d'attesa: tipicamente 1 m (tipicamente 2 m, se adiacente all'unità di prenotazione d'attraversamento pedonale);
- rilevamento dei pedoni completamente statici = fermi;
- posizione del rilevatore: installato su palo, con associate unità di prenotazione dell'attraversamento pedonale;
- altezza di montaggio del rilevatore variabile (possono essere adottate varie altezze dal suolo, oscillanti da 3,3 m a 4 m).

1.2.2 Vantaggi e svantaggi

Le sopraccitate peculiarità del sensore corrispondono ai principali vantaggi della sua applicazione. Svantaggi riguardano il rilevamento dei soli pedoni fermi e le avarie e i malfunzionamenti soprattutto endogeni o esogeni, dovuti ad eventuali avarie sistemiche, cali di tensione, *black-out*, ecc.

1.2.3 Immagini esemplificative

Soluzione tecnologica immessa e diffusa sul mercato.



Figura 2 - A destra sensore Heimdall Kerbside; a sinistra sensore Heimdall 3. Fonte: <https://lasemaforica.com>;

1.3 Un sensore di traffico termico integrato: la ThermiCam™

1.3.1 Descrizione

La *ThermiCam™*, è una termocamera integrata, finalizzata alla rilevazione dei veicoli, dei velocipedi e di veicoli affini. Riveste inoltre funzioni di conteggio del transito agli incroci semaforizzati, rilevando veicoli, cicli, ecc., in prossimità o sulla linea di arresto. Il sensore intelligente di *ThermiCam™* trasmette le informazioni rilevate attraverso la chiusura di contatto o via IP al controller semaforico, abilitando un maggiore controllo dinamico dei semafori, ovvero:

- riduzione dei tempi di attesa per i veicoli;
- miglioramento del flusso di traffico;
- riduzione delle emissioni dei veicoli;
- miglioramento della sicurezza e della mobilità ciclistica.

La *ThermiCam™* si basa sulla termografia per il controllo degli incroci, avvalendosi di immagini termiche per analizzare le dinamiche del traffico. La termografia offre determinati innegabili vantaggi inerenti il monitoraggio tipologico veicolare e la gestione degli incroci, quali la distinzione tra autoveicoli, velocipedi, ecc. *ThermiCam™* utilizza l'energia termica emessa dai veicoli e dai ciclisti per distinguere le due utenze. Il sensore intelligente può fornire al *controller* semaforico informazioni specifiche sulla presenza di veicoli e cicli, per consentire ai gestori della viabilità di prendere decisioni più adeguate e di adattare l'intervallo cronologico della lanterna semaforica disposta sul verde (= via libera), in relazione al particolare utente della strada (ciclo o altro veicolo).

Le applicazioni agli incroci risultano le seguenti:

- attivazione del segnale di verde veicolare. Un'applicazione particolarmente comune è il "verde attuato", ossia il consenso e l'attivazione del segnale di via libera dedicato ai veicoli, ed esclusivamente in presenza di una vettura o di un mezzo a due ruote nell'area di rilevazione. Vengono rilevati i cicli sia in movimento sia in fase di stazionamento, come anche altri veicoli. *ThermiCam™* è in grado di gestire fino a sedici zone virtuali di rilevazione di veicoli e quattro regioni virtuali di rilevazione di cicli (superficie maggiore rispetto a una zona, maggiormente efficiente per la rilevazione di cicli);
- estensione dell'intervallo cronologico del segnale di via libera (= durata del verde). *ThermiCam™* può essere utilizzata anche per la rilevazione anticipata di cicli e altri veicoli. Un'applicazione comune è l'estensione della durata del verde.
Per i velocipedi e veicoli affini: quando una bicicletta si trova a una determinata distanza dalla linea di arresto, la durata del verde può essere prolungata fino a quando la bicicletta avrà liberato l'area.
Per gli altri veicoli: In questi casi, *ThermiCam™* può sostituire efficacemente le spire induttive e anche i radar. Qualora un veicolo impegni la zona ove il conducente possa esitare tra l'arrestarsi o attraversare l'incrocio a semaforo giallo, la durata del verde può essere estesa fino a quando il veicolo abbia abbandonato la zona;
- conteggio del numero dei veicoli e dei cicli, che può essere attivato contemporaneamente alla funzionalità di rilevazione presenza, utilizzando le stesse zone e le stesse regioni di rilevazione.

1.3.2 Vantaggi e svantaggi

I vantaggi dell'applicazione di questa videocamera sono insiti nelle sue peculiarità funzionali, ampiamente analizzate nella succitata descrizione, quali, tra le altre, il rilievo numerico dei transiti, il controllo dinamico dei semafori, le applicazioni termografiche, l'efficacia e l'efficienza delle applicazioni dedicate agli incroci, ecc. Gli svantaggi sono rilevabili in eventuali malfunzionamenti endogeni o esogeni, dovuti ad eventuali avarie sistemiche, cali di tensione, black-out, ecc.

1.3.3 Immagini esemplificative

Soluzione tecnologica immessa e diffusa sul mercato.

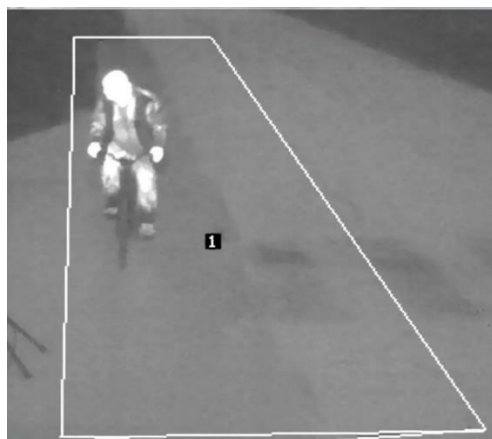


Figura 3 - A destra *ThermiCam™*; a sinistra esempio di rilievo bici. Fonte: www.flir.it; <https://lasemaforica.com>.

1.4 *C-Walk* e *SafeWalk*: due sensori che indicano la presenza di pedoni

1.4.1 Descrizione

I sensori pedonali *FLIR ITS* sono concepiti per migliorare la sicurezza e l'efficienza nelle aree urbane, rilevando la mobilità pedonale tramite il controllo dinamico dei semafori e della segnaletica luminosa e abbattendo contemporaneamente inutili attese per pedoni e automobilisti. I sensori pedonali *FLIR ITS* offrono soluzioni integrate che uniscono una fotocamera e un rilevatore in una singola unità:

- *C-Walk*, che rileva i pedoni in fase d'attraversamento;
- *SafeWalk*, che rileva i pedoni in attesa ed in avvicinamento.

I sensori *FLIR ITS C-Walk* e *SafeWalk* utilizzano zone di rilevamento predefinite ("spire virtuali"): non appena un pedone entra nella zona predefinita, il dispositivo di rilevamento attiva la regolazione semaforica o una segnalazione.

Controllo semaforico. L'attraversamento degli incroci semaforizzati può comunque rivelarsi rischioso, se non pericoloso per i pedoni. I sensori *C-Walk* e *SafeWalk* possono ridurre il rischio e migliorare la sicurezza, adattando gli intervalli cronologici delle lanterne semaforiche disposte a via libera (=semaforo verde), o sulla base d'informazioni della presenza del pedone. *C-Walk* e *SafeWalk* riducono anche significativamente i tempi di attesa sia per i pedoni, sia per gli automobilisti.

Attivazione dei segnali luminosi. I segnali luminosi risultano molto efficaci per migliorare la consapevolezza dei guidatori e per ridurre i rischi per i pedoni; ridotti risultano, tuttavia, i tradizionali segnali luminosi, che lampeggiano continuamente, poiché non trasmettono agli automobilisti alcun reale stimolo capace di modificarne il comportamento di guida. L'applicazione dei sensori *C-Walk* e *SafeWalk* risulta più efficace, perché attiva segnali luminosi, come l'illuminazione interrata o luci lampeggianti, solo in presenza di pedoni in una specifica area di rilevazione.

Configurazione del sistema. Il sensore viene configurato tramite PC portatile con software preinstallato di facile utilizzo. Richiede meno di cinque minuti e non richiede alcuna conoscenza specifica. Utilizzando le immagini della telecamera, le zone virtuali di rilevazione pedonale possono essere posizionate con precisione. La verifica e la visualizzazione della rilevazione è possibile tramite lo streaming video MPEG-4.

1.4.2 Vantaggi e svantaggi

I principali vantaggi sono riassumibili schematicamente come segue:

- sensori *all-in-one* (camera + rilevatore);
- installazione sospesa;
- posizionamento accurato della zona;
- indirizzabile via IP;
- installazione celere e facile.

I sensori *SafeWalk* e *C-Walk* sono stati progettati per evitare gravosi costi di installazione e di manutenzione. Il processo di installazione, infatti, risulta veloce ed il montaggio e le connessioni sono semplici e celeri, così da permettere di iniziare ad analizzare in pochi minuti la zona pedonale di rilevamento. I sensori possono essere montati in modo semplice sulle infrastrutture esistenti.

Analisi delle nuove tecnologie
per il miglioramento della sicurezza stradale

Svantaggi sono rilevabili in eventuali malfunzionamenti endogeni o esogeni, dovuti ad eventuali avarie sistemiche, cali di tensione, *black-out*, ecc.

1.4.3 Immagini esemplificative

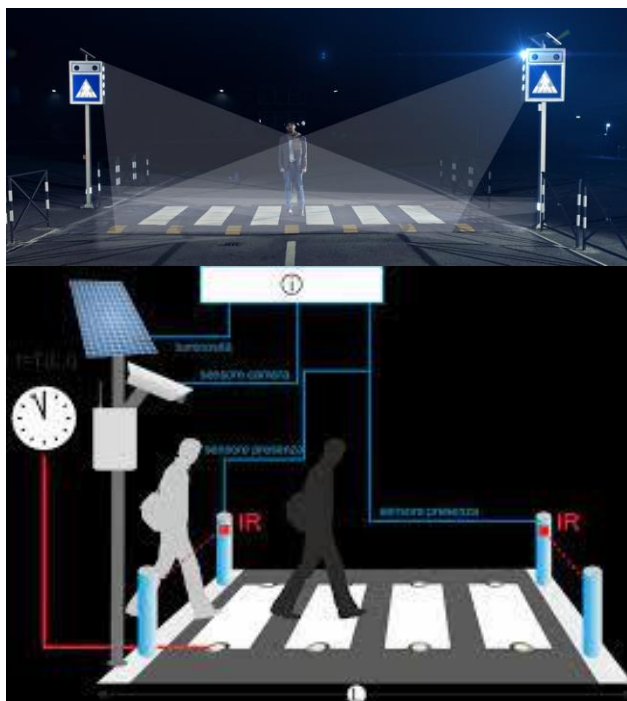


Figura 4 - C-Walk e Safe Walk. <https://www.deltasegnalatica.com/PedoneSmart.html>;
http://www.ingeltech.com/wordpress/wp-content/uploads/2015/04/SMW_Deliverable_D2.pdf

1.5 Sensore SISAS Pedestrian Save: doppia tecnologia di rilevazione dei pedoni in prossimità degli attraversamenti pedonali

1.5.1 Descrizione

Il dispositivo utilizza una tecnologia a doppia tecnologia *radar* 24 Ghz ed infrarosso, disponendo di un modulo di comunicazione radio *Rx-Tx* 433,92 omologato per comunicare a distanza con un altro dispositivo. Il rilievo del pedone può avvenire in modalità automatica attraverso il sensore radar e/o in modalità manuale, mediante ingresso pulsante. La configurazione del dispositivo può avvenire tramite radiocomando (opzionale), o tramite pulsante interno.

1.5.2 Vantaggi e svantaggi

L' utilizzo dei due sensori garantisce di ridurre l'angolo di azione ed evitare così false letture causate dal movimento di falsi obiettivi nelle vicinanze. Non si ravvisano svantaggi, ad eccezione, ovviamente, di avarie del dispositivo con il quale il sensore dialoga a distanza o dal sensore stesso.

1.5.3 Immagini esemplificative

Analisi delle nuove tecnologie per il miglioramento della sicurezza stradale



Figura 5 - SISAS Pedestrian Safe – dall’alto a sinistra in senso orario - <https://www.sisas.it/categoria-prodotto/traffic-systems/prevention-information-and-control-systems/sensors/?lang=en>; <https://www.sisas.it/tag-prodotto/sensore-pedestrian-save-doppia-tecnologia/>; <https://www.sisas.it/prodotto/pedestrian-save/>; <https://www.sisastechronic.it/prodotto/sensore-ir-per-centralina-pedestrian/>; <https://www.sisastechronic.it/prodotto/sky-light-traffic/>

1.6 Semafori intelligenti

1.6.1 Descrizione

I semafori intelligenti sono dotati di una serie di sensori che consentono di rilevare e raccogliere informazioni riguardanti i flussi di traffico nella zona circostante, insieme alle condizioni ambientali e stradali. Questi dispositivi, inoltre, sono dotati di sensori in grado di rilevare dati sul livello di inclinazione del terreno ed eventuali vibrazioni, utili per la previsione di terremoti, frane e altre catastrofi naturali. In aggiunta, i semafori intelligenti utilizzano anche luci più visibili e connessioni wireless, in modo da poter incrociare le informazioni acquisite dai sensori con quelle raccolte dagli altri semafori presenti nella zona e con i dati ottenibili dall’IoT - *Internet of Things*, migliorando il loro funzionamento, non più regolato da un timer come nei semafori tradizionali [4].

I dati relativi al traffico della zona vengono raccolti tramite dei sensori *radar*.

Esistono molteplici tecnologie per il rilevamento del passaggio delle automobili, che possono essere impiegate nei semafori intelligenti:

- sensori magnetici;
- sensori ottici;

Analisi delle nuove tecnologie per il miglioramento della sicurezza stradale

- sensori a ultrasuoni.

I sensori magnetici consistono in una spira di metallo, annessa sotto il tappetino d'usura, posta in prossimità delle zone di arresto delle auto. All'interno della spira viene fatta scorrere una piccola quantità di energia elettrica. Al passaggio dei veicoli, la corrente elettrica della spira viene perturbata e viene così rilevata la presenza di veicoli in prossimità del semaforo. L'informazione ottenuta viene poi incrociata con quella degli altri semafori presenti nell'incrocio, regolando il proprio funzionamento.



Figura 6 - Schema di semafori intelligenti in un incrocio. Fonte: www.isac.rwth-aachen.de.

I sensori ottici sfruttano un sistema di telecamere o di sensori infrarossi che inquadrano la zona di arresto in prossimità del semaforo e segnalano la presenza di eventuali veicoli, permettendo al semaforo di acquisire informazioni sui veicoli in attesa di impegnare l'incrocio, per poter regolare il suo funzionamento, anche in base alle informazioni provenienti dai semafori attigui.

I sensori a ultrasuoni rilevano il passaggio dei veicoli emanando delle onde a ultrasuoni nella direzione della zona di arresto al semaforo. Le onde emanate, in presenza di un veicolo, rimbalzano e tornano indietro al sensore, informando così il semaforo [4].



Figura 7 - ACCoRD. Fonte: <https://media.ford.com>.

Grazie ai sensori montati sul semaforo, è anche possibile: misurare la velocità dei veicoli che si approssimano all'intersezione; regolare la temporizzazione, tramite programmi di attuazione, in modo da favorire il miglior utilizzo dei tempi di verde per ogni singolo accesso; rilevare eventuali infrazioni, che vengono poi comunicate in tempo reale alle autorità; individuare la presenza di pedoni in prossimità degli attraversamenti pedonali e calcolare di quanto tempo necessitano per attraversare la strada in maniera sicura, regolando di conseguenza il funzionamento del semaforo [5]. I semafori intelligenti sono anche in grado, facendo scattare il verde in modo automatico, di favorire il transito dei veicoli di emergenza, quali ambulanze, veicoli dei vigili del fuoco e delle forze dell'ordine [6]. Tutti i dati raccolti dai sensori possono essere anche impiegati per condurre delle analisi statistiche sul traffico in una determinata zona o nella città in generale.

1.6.2 Vantaggi e svantaggi

Il vantaggio principale derivante dall'utilizzo dei semafori intelligenti è la diminuzione del traffico e della congestione, grazie alla maggiore scorrevolezza, aumentando di conseguenza la fruibilità delle strade, riducendo il rischio di incidenti e diminuendo il grado di inquinamento, dato che i tempi di transito e i tempi di attesa dei veicoli fermi al semaforo vengono notevolmente ridotti. Inoltre, l'utilizzo di lampadine *LED* consente di ridurre del 50% il consumo di energia elettrica, oltre a una migliore visibilità in ogni condizione. Al risparmio dell'energia elettrica contribuiscono anche i sensori di rilevamento del traffico, che spengono le luci nel caso non ci siano pedoni e veicoli in transito, e dai sensori che rilevano le condizioni ambientali, che permettono di regolare il livello di illuminamento [4]. Non ci sono dei veri e propri svantaggi nell'impiego dei semafori intelligenti. L'unico problema potrebbe verificarsi nel caso in cui uno dei semafori smettesse di funzionare, mandando in crisi il funzionamento corretto anche degli altri semafori circostanti.

I costi di installazione relativi a tre diversi sistemi di semafori intelligenti (*InSync*, *SCATS*, *ACS-Lite*) sono stati analizzati dall'Università del Connecticut e sono riassunti nella seguente Tabella [7]:

Tabella 2 - Costo di installazione di tre diversi sistemi di semafori intelligenti.

Sistema	Costo di installazione / incrocio
InSync	\$25000 - \$35000
SCATS	\$25000 - \$30000
ACS-Lite	\$8000 - \$12000

1.6.3 Esempi di applicazione

La tecnologia inerente ai semafori intelligenti è stata e continua ad essere oggetto di sperimentazioni². Al contempo si sta affermando sul mercato e diffondendosi rapidamente nelle principali città italiane.

² Alcune delle sperimentazioni più note sono quelle della Ford e della Siemens. Il Ford Testa *Connected Traffic Light Technology*, è una tecnologia che sfrutta la connettività tra veicoli ed infrastrutture al fine di "dialogare" con i semafori, agevolando così il transito di ambulanze, veicoli dei Vigili del Fuoco e delle Forze dell'Ordine. Il sistema risulta anche abilitato ad inviare informazioni sulle tempistiche dei semafori disposti a via impedita (rosso) o a via libera (verde), ad altri veicoli, si da migliorare il flusso del traffico per tutti gli utenti dell'arteria stradale. I test condotti sono parte di un ampio progetto, obiettivo del quale è esplorare i vantaggi dell'utilizzo congiunto di veicoli connessi e/o automatizzati ed infrastrutture collegate alla rete, anche al fine di migliorare l'esperienza di guida attraverso l'innovazione. Nelle situazioni di emergenza, tutto ciò che provoca rallentamenti alle squadre di primo soccorso, provoca effetti sulla celerità dell'intervento: alcuni ritardi potrebbero rivelarsi fatali. Il sistema *Connected Traffic Light Technology* risulta pure in grado di aiutare a ridurre il rischio di incidente provocato dai primi soccorritori nel caso in cui siano costretti a passare con il semaforo rosso. I semafori abilitati a

Analisi delle nuove tecnologie per il miglioramento della sicurezza stradale



Figura 8 - V2X Volkswagen. Fonte: www.alvolante.it.

inviare ai veicoli in avvicinamento tutte le informazioni sulle tempistiche del rosso e del verde, risultano inoltre in grado di contribuire alla riduzione della congestione sulle strade. La tecnologia è stata testata su una strada con otto semafori consecutivi ad Aquisgrana, in Germania, e due tratti con tre semafori consecutivi appena fuori città, tutti allestiti dai partner del progetto. Il test ha simulato diversi scenari: l'auto in prova, una *Ford Kuga Plug-In Hybrid*, dotata di un'unità a bordo per comunicare con l'infrastruttura e di un hardware per il controllo rapido al fine di connettersi al prototipo di software di bordo del veicolo, ha rivestito, a seconda dei diversi scenari, il ruolo di un'ambulanza e quello di un veicolo adibito al trasporto passeggeri. Riproducendo una situazione d'emergenza e la necessità di soccorso il veicolo in prova indica al semaforo di disporsi al via libera: una volta superato l'incrocio, il semaforo riprende il suo funzionamento standard. I test riferiti all'uso quotidiano del veicolo si sono basati sull'invio di informazioni all'auto in merito ai tempi cronologici di passaggio del semaforo dal rosso al verde e viceversa. La tecnologia ACC - *Adaptive Cruise Control* della Ford permette quindi di adattare la velocità dell'auto, garantendo che il semaforo sia verde al passaggio del maggior numero di autoveicoli. Le funzioni di assistenza alla guida risultano assolutamente supplementari, non sostituendo l'attenzione, la capacità di giudizio e la necessità di controllare il veicolo da parte del conducente. Con la lanterna semaforica disposta al rosso, la velocità del veicolo cala, riducendosi dai 50 km/h ai 30 km/h, sì da permettere di cronometrare l'auto nell'avvicinarsi e raggiungere il semaforo allo scattare del verde. La tecnologia potrebbe risultare ulteriormente d'aiuto per i veicoli che sopraggiungono al semaforo disposto al rosso, permettendo di ridurre al minimo le brusche frenate ed i tempi d'attesa al semaforo stesso: il veicolo è in grado di ricevere, infatti, le informazioni riferite alla disposizione del semaforo, molto prima di sopraggiungere all'incrocio, con la possibilità di rallentare in anticipo, contribuendo a ridurre il traffico. La comunicazione tra veicoli e semafori è consentita dalla tecnologia C-V2X (*Cellular Vehicle-to-Everything*), una piattaforma unificata che collega i veicoli all'infrastruttura stradale, ad altri veicoli e agli altri utenti della strada. Gli ingegneri della Ford hanno sperimentato questo sistema nell'ambito del progetto ACCorD - *Corridor for New Mobility* di Aquisgrana e Düsseldorf, finanziato dal Ministero Federale tedesco per il digitale e i trasporti e sostenuto dalla RWTH University di Aquisgrana, Vodafone, Straßen. NRW (l'Autorità stradale per il Land della Renania Settentrionale-Vestfalia) e la Città di Aquisgrana. Un altro sistema "dialogante" attraverso la rete è stato sviluppato dalla Siemens in partnership con la Volkswagen, i sistemi V2X (acronimo di Vehicle to X, intendendo indicare il concetto "Dall'auto alle cose"), piattaforma connessa alla rete telematica consentendo alle autovetture di comunicare vicendevolmente con semafori, parcheggi ed altri impianti, infrastrutture o servizi stradali. La città tedesca di Wolfsburg (sede della Volkswagen), è stata selezionata per i test di queste tecnologie sviluppate congiuntamente dalle citate note industrie, esplorandone le ricadute sul traffico e sulla guida quotidiana. La sperimentazione ha coinvolto dieci impianti semaforici, collocati lungo un'arteria stradale particolarmente trafficata di Wolfsburg ed in grado di trasmettere anticipatamente alle autovetture la disposizione cromatica delle lanterne semaforiche (rosso = via impedita, verde = via libera), sì da concedere, grazie ad una centralina, d'elaborare queste informazioni comunicandole in anticipo ai conducenti delle autovetture. Inoltre, permette di non decelerare se i semafori stessero per disporsi al "verde", ma di rallentare se si stessero disponendo al "rosso". Soluzione ottimale per migliorare i regimi di velocità, abbassare le emissioni dei gas di scarico ed aumentare la fluidità del traffico; tuttavia i tempi di immissione sul mercato e quindi d'applicazione pratica si sono dimostrati più lunghi del previsto. Due impianti semaforici sono stati dotati di ulteriori sensori, in grado di riconoscere pedoni o ciclisti che attraversano la strada, inviando un messaggio all'automobile in procinto di avvicinarsi al passaggio pedonale, permettendo conseguentemente al conducente di rallentare e di non risultare impreparato. La Volkswagen ha sviluppato questo sistema nella convinzione che questo genere di supporto possa rivelarsi di fondamentale importanza, soprattutto in riferimento a passaggi pedonali successivi a curve strette o a svolte pericolose, in prossimità delle quali l'ambiente edificato o la vegetazione potessero alterare la visibilità.

Alcuni modelli, specificamente studiati per rilevare infrazioni al codice della strada, come ad esempio il passaggio col semaforo rosso, sono già presenti in diverse città italiane, tra cui Torino e Genova. Anche a Milano sono presenti semafori intelligenti, installati esclusivamente per la regolazione del transito delle linee tramviarie, in modo da rendere più scorrevole il traffico e diminuire i tempi di attesa alle fermate. A Bologna il 60% degli incroci è già regolato da semafori intelligenti, portando a una riduzione dei tempi di percorrenza dei flussi veicolari compresa tra il 12% e il 15% [8].

1.7 Segnaletica stradale orizzontale fotoluminescente

1.7.1 Descrizione

La segnaletica stradale fotoluminescente è visibile di giorno ed è luminosa nell'oscurità. Questo tipo di segnaletica viene realizzato in materiali fotoluminescenti, in grado di assorbire energia da una sorgente di luce naturale o artificiale e di immagazzinarla, prima di restituirla sotto forma di luce visibile, di tonalità verde, quando l'ambiente circostante diventa buio.

La luce intensa verde che i materiali fotoluminescenti irradiano al buio si smorza col tempo. L'intensità massima, infatti, può durare da un minimo di 30 minuti a un massimo di 60 minuti. Oltre questo arco di tempo, sopprime la fosforescenza, meno intensa della fotoluminescenza, ma la segnaletica resta comunque visibile, in dettaglio di superficie, in condizioni di basso illuminamento.

Per la segnaletica stradale orizzontale fotoluminescente, vengono applicati dei pigmenti fosforescenti insieme alla vernice fotoluminescente, che non necessitano né di fonti di energia né di elettricità per funzionare. Tuttavia, è importante assicurarsi che, nelle zone in cui si trova la segnaletica fotoluminescente, il livello di radiazione luminosa sia sufficientemente intenso da consentirle di ricaricarsi e immagazzinare la necessaria energia luminosa [14].



Figura 9 - Segnaletica orizzontale fotoluminescente. Fonte: www.engineeringexploration.com.

1.7.2 Vantaggi e svantaggi

Il vantaggio principale derivante dall'applicazione della segnaletica stradale orizzontale fotoluminescente consiste nel garantire una maggiore sicurezza stradale. Grazie al suo utilizzo, infatti, si ha un notevole miglioramento della visibilità durante le ore notturne e in presenza di condizioni meteorologiche avverse, contribuendo a ridurre il rischio di incidenti stradali, causati dalla scarsa visibilità, specialmente nelle strade prive di illuminazione artificiale o in quelle non illuminate a sufficienza, come le gallerie [15]. In questo modo, gli automobilisti hanno una migliore percezione della strada davanti a sé, importante specialmente in prossimità di curve, incroci, attraversamenti pedonali e piste ciclabili, garantendo quindi una maggiore sicurezza anche a pedoni e ciclisti [16].

Un altro vantaggio dell'utilizzo della segnaletica fotoluminescente è il risparmio di energia elettrica, in quanto questo sistema può sostituire in parte l'illuminazione artificiale tradizionale.

Tuttavia, durante la fase di sperimentazione di questa tecnologia, sono stati notati alcuni problemi da risolvere [17]:

- la luce emessa dai materiali fotoluminescenti a volte non è uniforme e costante lungo tutto il percorso;
- in condizioni climatiche critiche, ad esempio durante forti piogge, o in presenza di detriti, la segnaletica fotoluminescente tende a essere poco visibile [14].

Infine, come riportato nella descrizione del sistema, si evidenzia come svantaggio il rischio connesso ad un basso livello di radiazione luminosa che, in determinate aree, può comportare livelli insufficiente di ricarica e immagazzinamento della necessaria energia luminosa richiesta dalla segnaletica stradale orizzontale fotoluminescente.

1.7.3 Esempi di applicazione

Recentemente la tecnologia della segnaletica stradale orizzontale fotoluminescente è stata testata in Australia, nello Stato di Victoria, dall'azienda *Gippsland Tarmac Linemarking*, in collaborazione con *OmniGrip* e *Vic Roads*, su un tratto della Metung Road, ottenendo risultati incoraggianti [18].

Questo nuovo sistema è stato sperimentato con successo anche su un tratto di 500 metri dell'autostrada N329 nei pressi di Oss, a circa 100 km da Amsterdam, dallo Studio *Roosegaard* in collaborazione con la Società di costruzioni stradali *Heijmans* [19].

Inoltre, la segnaletica orizzontale luminescente è stata applicata in Francia, dalla startup *Olikrom*, su una pista ciclabile di 2 km a Pessac, mentre in Italia è stata utilizzata per illuminare i tratti ciclopedonali del Comune di Soncino, grazie al contributo dell'Azienda *EmmeBi* [20].

1.8 Guardrail intelligente “Andromeda”

1.8.1 Descrizione

Negli ultimi anni è stato studiato e sviluppato dall'Azienda casertana *SMA Road Safety* un nuovo tipo di *guardrail*, chiamato “*Andromeda*”, che integra diverse soluzioni tecniche volte a migliorare la sicurezza stradale e che rappresenta la prima barriera stradale intelligente mai prodotta.

La barriera è composta da una griglia di acciaio zincato, di spessore ridotto, e da pannelli trasparenti in *PET - Polietilene tereftalato*, che viene inserita ad una distanza minima dal terreno e incorniciata da

pali a profilo circolare in metallo, senza la presenza di superfici taglienti [21]. Sono presenti in commercio due diverse versioni del guardrail intelligente [22]:

- la variante *H2*, con una larghezza di 14 cm e in grado di resistere all'urto con autobus di 13 tonnellate;
- la variante *H4*, con una larghezza di 18 cm e in grado di assorbire anche l'urto di autoarticolati di oltre 38 tonnellate.

La barriera è inoltre dotata di un sistema di illuminazione integrato automatico, costituito da luci a LED, che, tramite dei sensori, si illumina di notte e in presenza di condizioni atmosferiche avverse. Inoltre, sempre grazie alla presenza di sensori, è in grado di allertare autonomamente e in tempo reale i soccorsi in caso di incidente, la cui posizione viene individuata in maniera esatta. È anche possibile segnalare opportunamente gli incidenti ai veicoli che sopraggiungono tramite delle luci intermittenti, visibili a molti chilometri di distanza, permettendo anche di rilevare la formazione di code sul tratto stradale interessato [21]. La barriera può essere equipaggiata con ulteriori strumenti, quali sensori di umidità, di temperatura e sistemi di segnalazione di guida per i veicoli a guida autonoma [23], ed è anche dotata di chip *NFC - Near Field Communication* per lo scambio di informazioni con smartphone tramite un'apposita app. Vengono rese così disponibili le istruzioni per l'installazione o la manutenzione dell'intera struttura, oppure si può gestire l'inventario dei prodotti installati [24].

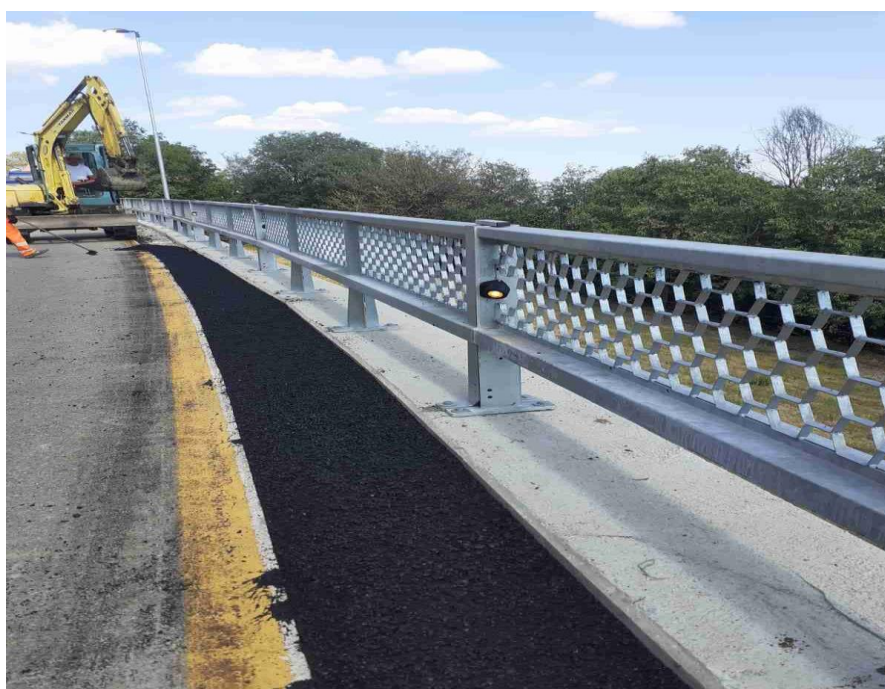


Figura 10 - Barriera stradale "Andromeda". Fonte: www.smartoadsafety.com.

1.8.2 Vantaggi e svantaggi

Uno dei vantaggi più rilevanti che derivano dall'applicazione del *guardrail "Andromeda"* è che la sua forma permette di ridurre i rischi di lesioni severe in caso d'impatto dei motociclisti. Oltre ad essere più distanziati, i pali hanno infatti un profilo circolare e nessuna superficie è tagliente. In più si possono inserire nella parte bassa anche protezioni specifiche in metallo, per impedire che i motociclisti possano passare sotto alle strutture orizzontali [25].

Grazie alla presenza delle luci a *LED*, questo sistema permette di migliorare notevolmente la visibilità durante le ore notturne e in presenza di condizioni climatiche critiche. Inoltre, grazie alla presenza dei sensori in grado di rilevare e segnalare in tempo reale gli incidenti, si rendono più veloci i soccorsi e, grazie alle luci intermittenti installate che permettono di informare gli automobilisti della presenza di un incidente prima che lo raggiungano, si evitano la generazione di code e la congestione del traffico nel tratto interessato.

L'installazione di questo tipo di barriere permette di risparmiare spazio, essendo un dispositivo simmetrico che protegge da entrambi i lati, al contrario del guardrail tradizionale, che deve essere a doppia fila, e può essere utile anche per delimitare le piste ciclabili dalla strada per i veicoli [25].

Questo tipo di barriera è anche meno impattante dal punto di vista estetico rispetto ai guardrail più tradizionali, grazie alla presenza dei pannelli trasparenti in PET [26].

Tuttavia, il guardrail "*Andromeda*" risulta avere un costo superiore di circa il 30% rispetto alle barriere stradali tradizionali, a cui vanno aggiunti i costi connessi alla sensoristica e alla parte intelligente del sistema [25].

1.8.3 Esempi di applicazione

Un primo *guardrail "Andromeda"* sarà installato in Provincia di Salerno, a Baronissi, lungo l'arteria che collega la città ad Avellino, anche se in questo caso non saranno inseriti i sensori. Da programma ci sono già altre città in cui questa tecnologia verrà applicata: in Italia verrà installata a Torino, mentre all'estero è stata richiesta per le strade di Hong Kong [22].



Figura 11 - Guardrail intelligente "*Andromeda*". Fonte: www.insella.it.

1.9 Lampioni intelligenti

1.9.1 Descrizione

I lampioni intelligenti si basano sul principio di illuminazione pubblica complessa, essendo dotati di moderne lampade *LED* che vengono interconnesse alla rete e dotate di nuove cellule e sensori. Sono integrati con sensori di movimento e di luce in grado di attivare l'illuminazione artificiale solo dove e quando serve, ricoprendo la funzione primaria di un lampione [27]. Grazie a questo sistema in grado di rilevare la presenza di veicoli, biciclette o pedoni, il lampione può regolare la sua illuminazione in modo specifico, aumentandola in presenza di esseri umani o di traffico e diminuendola nei momenti di stasi [28].

I lampioni intelligenti sono inoltre integrati a fotocellule, videocamere e unità indipendenti di intelligenza artificiale, che permettono di identificare anomalie nei flussi di traffico, quali incidenti, rallentamenti, lavori stradali, auto ferme nella carreggiata e comportamenti imprudenti, e riconoscerne la gravità. Tramite un sistema di segnalazione e allerta automatico, che comunica con i lampioni adiacenti all'area interessata e in grado di regolare i tempi semaforici degli incroci o in corrispondenza delle strisce pedonali, il lampione informa i veicoli in procinto di sopraggiungere sul luogo della necessità di rallentare, cambiare percorso o fermarsi immediatamente, anche con l'ausilio di pannelli posti sui lampioni adiacenti, limitando quindi i rischi per la circolazione [29].



Figura 12 - Esempio di sistema di lampioni intelligenti. Fonte: www.arkys.biz.

In maniera simile ai semafori intelligenti, i lampioni di illuminazione intelligente possono svolgere altre molteplici funzioni, quali [30]:

- videosorveglianza urbana e assistenza nelle situazioni di pericolo;
- controllo della qualità dell'aria e monitoraggio ambientale;

- gestione dei parcheggi;
- controllo dei movimenti dei trasporti pubblici;
- controllo delle vibrazioni e delle oscillazioni negli edifici per un monitoraggio continuo e la prevenzione di possibili terremoti;
- prevenzione degli incendi, grazie alla possibilità di rilevare incendi e fumo, con conseguente comunicazione dell'allarme;
- controllo della raccolta dei rifiuti urbani;
- raccolta di informazioni sulle condizioni e sulle previsioni meteo della città;
- fungere da colonnine di ricarica per i veicoli elettrici e da centraline di comunicazione per parlare con i veicoli in transito, dotati di tecnologia *Vehicle-to-vehicle* e *Vehicle-to-infrastructure communications*.

1.9.2 Vantaggi e svantaggi

L'installazione di questo tipo di lampioni intelligenti porta una serie di vantaggi. Grazie alla possibilità di controllare i flussi di traffico e di rilevare incidenti e altre anomalie alla circolazione, i lampioni intelligenti concorrono a migliorare la sicurezza stradale, riducendo il rischio di incidenti e le loro conseguenze. Rilevando e segnalando in tempo reale gli incidenti, inoltre, si riducono i tempi di intervento delle autorità e dei soccorsi, aumentando di conseguenza la possibilità di salvare le persone coinvolte in sinistri stradali [29].

Un altro vantaggio è dato dai sistemi di regolazione automatica in base alla luce naturale e dai sensori, integrati nei lampioni, che rilevano il movimento. Questi, infatti, consentono di ridurre gli sprechi energetici, permettendo un risparmio fino al 50-60% di energia rispetto a un lampione tradizionale. Questo si trasforma anche in un risparmio economico non indifferente a lungo termine. In questo modo viene anche ridotto l'inquinamento luminoso e le emissioni di gas serra.

La grande flessibilità di questi sistemi garantisce, inoltre, una migliore qualità dell'illuminazione stessa. I sensori installati sul lampione, infatti, controllano la sua efficienza segnalando tempestivamente eventuali problematiche e i necessari interventi. Ciò da un lato migliora la qualità e l'intensità della luce in tempo reale e dall'altro rende più tempestivi e veloci gli interventi di manutenzione, se necessari [27].

I principali svantaggi di questa tecnologia sono l'alto costo iniziale rispetto ai lampioni tradizionali e la difficoltà di installazione, essendo dispositivi molto sofisticati [31]. Infatti, il costo medio per un lampione intelligente è di circa \$14000, con costi di installazione compresi tra \$500 e \$1000 [32].

1.9.3 Esempi di applicazione

Un sistema di lampioni intelligenti è stato recentemente sperimentato in Norvegia, su un tratto di 9 km dell'arteria stradale che collega Nes e Hole, installando circa 220 radar per altrettanti lampioni a *LED*, dotati di sensori in grado di riconoscere il passaggio di qualsiasi veicolo, ciclista o pedone. In assenza di questi ultimi, i sensori riducono l'intensità della luce del 20%, ottenendo un notevole risparmio energetico.

Sempre nel Nord Europa, in Danimarca, esiste un grande centro europeo dove si sperimenta la tecnologia a *LED* nell'illuminazione pubblica, il *DOLL - Danish Outdoor Lighting Lab*. Qui, tutti i lampioni a *LED*, usati per illuminare le strade, sono collegati in rete. Grazie ad appositi sensori di movimento e ambientali, si accendono solo in caso di necessità e si regolano sulla base della luce naturale presente.

Inoltre fungono da centraline e si integrano con altri dispositivi per far fronte a necessità di comunicazione, sicurezza e controllo.

In Italia, è stato firmato dall'ANAS il progetto "*Greenlight*" per l'illuminazione stradale e l'efficientamento energetico sulle autostrade, in particolare nelle gallerie. L'obiettivo è quello di ridurre i consumi e ottimizzare gli impianti, attraverso la sostituzione dei lampioni con sistemi a *LED* di ultima generazione provvisti di un sistema di controllo per permetterne la regolazione.

A Livorno, invece, è in fase di studio e realizzazione un modello di *smart city*, dotato di un sistema che si appoggerà sulla rete elettrica, utilizzando i lampioni a *LED* e i semafori come pali intelligenti, insieme a sensoristica e telecamere [30].

1.10 Sistema *Heads-up* di Acusensus

1.10.1 Descrizione

Il sistema *Heads-up* è stato sviluppato dalla Società australiana "*Acusensus*", una delle Aziende *leader* al mondo nell'impiego dell'intelligenza artificiale per il miglioramento della sicurezza stradale.

Questa tecnologia è costituita da una serie di telecamere, che possono essere installate sulle infrastrutture stradali esistenti, come ponti, cavalcavia, e anche su cartelli stradali, o su strutture mobili, come rimorchi, e che sono in grado di visualizzare e registrare il comportamento all'interno dell'abitacolo dei veicoli [33].

Il sistema funziona nel seguente modo [34]:

1. le telecamere acquisiscono immagini ad alta risoluzione ed esaminano l'intero flusso di traffico sulle corsie della strada su cui vengono montate;
2. vengono registrate automaticamente immagini nitide dei veicoli in transito e delle loro targhe, attraverso una serie di telecamere, un *flash* a infrarossi e un sistema di lenti e filtri;
3. le immagini vengono ottimizzate per l'intelligenza artificiale che, addestrata con specifici algoritmi, riesce a individuare, con un alto grado di probabilità, i conducenti impegnati in comportamenti rischiosi, valutando la loro distrazione e lo stato degli altri passeggeri;
4. i comportamenti identificati, che possono costituire un reato, vengono inviati in tempo reale alle forze dell'ordine, che poi rilevano le eventuali infrazioni;
5. tramite dei sensori viene anche misurata la velocità dei veicoli in transito.



Figura 13 - Esempio di installazione del sistema Heads-up. Fonte: www.cbc.ca.

1.10.2 Vantaggi e svantaggi

La soluzione sviluppata da *Acusensus* permette di rilevare comportamenti di guida pericolosi e fonti di distrazione, che sono spesso difficili da rilevare, ai fini di un contrasto efficace da parte delle forze dell'ordine, quali l'utilizzo alla guida di telefoni cellulari, il mancato uso delle cinture di sicurezza e il superamento dei limiti di velocità. Il sistema *Heads-up* risulta essere un ottimo deterrente per gli automobilisti che commettono infrazioni alla guida, riducendo di conseguenza il rischio di incidenti e aumentando la sicurezza stradale nel suo complesso.

La tecnologia di *Acusensus* può anche essere utilizzata per raccogliere informazioni sui flussi di traffico e su eventuali anomalie alla circolazione, aiutando a individuare i tratti in cui potrebbe essere necessario, ad esempio, apportare modifiche alle infrastrutture o far rispettare nuove disposizioni normative [33].

Il sistema, inoltre, è in grado di catturare immagini sia di giorno che di notte e in tutte le condizioni meteorologiche. Grazie a sensori ad alte prestazioni, possono essere rilevati veicoli che viaggiano fino a 300 km/h senza sfocature o distorsioni dovute al movimento.

Il sistema avanzato di riconoscimento automatico dei comportamenti pericolosi alla guida è capace di ridurre al minimo i falsi positivi, garantendo contemporaneamente che non vengano scartati i casi reali di infrazione.

Un altro vantaggio del sistema *Heads-up* è la possibilità di condurre rilevazioni per giorni, settimane o mesi in un determinato luogo, tramite l'uso combinato di batterie, pannelli solari e generatori.

Il sistema può essere implementato in maniera economica su un'ampia gamma di infrastrutture stradali preesistenti o su un rimorchio, grazie alla compattezza e alla leggerezza dell'hardware, a vantaggio anche della sicurezza degli operatori [34].



Figura 14 - Esempio di immagine scattata dal sistema Heads-up. Fonte: www.cbc.ca.

I principali svantaggi connessi all'utilizzo di questa tecnologia sono principalmente:

- costi iniziali e di manutenzione elevati, più alti rispetto a un guardrail tradizionale, essendo un sistema avanzato e complesso;
- problemi relativi alla *privacy*, in quanto le immagini scattate ritraggono l'abitacolo dei veicoli, il conducente ed eventuali passeggeri. Sebbene le telecamere siano utilizzate negli spazi pubblici, permangono problemi di *privacy* riguardo al modo in cui le immagini vengono archiviate, consultate e smaltite.

1.10.3 Esempi di applicazione

Il sistema *Heads-up* è stato lanciato per la prima volta nel 2019 nello Stato australiano del Nuovo Galles del Sud. Nei primi due anni dal varo della tecnologia, secondo *Acusensus*, è stata ottenuta una riduzione del 22% degli incidenti mortali e una riduzione dell'uso del cellulare alla guida superiore all'80%. A partire dal 2021, la tecnologia è stata anche impiegata nel Queensland, riducendo nei primi sei mesi di utilizzo i decessi causati da incidenti stradali del 10%. Il sistema *Acusensus* verrà anche implementato e sperimentato per tre settimane nella città di Montreal, in Canada, e nello Stato di Washington, negli Stati Uniti [35].

1.11 Pavimentazione stradale intelligente

1.11.1 Descrizione

La pavimentazione stradale intelligente è costituita da lastre prefabbricate in calcestruzzo, assemblabili tra loro tramite incastro. Ogni lastra è dotata al suo interno di una serie di sensori:

- accelerometri a tre assi in grado di misurare le vibrazioni sul terreno e prevedere il passaggio dei veicoli;

Analisi delle nuove tecnologie per il miglioramento della sicurezza stradale

- sensori piezoelettrici o in fibra ottica, che misurano la deformazione della pavimentazione e rilevano il peso dei veicoli e la sua distribuzione;
- magnetometri che misurano le dimensioni degli assi dei veicoli, in modo da aiutare il sistema a capire quale tipo di veicolo sta passando sopra una determinata piastra;
- un giroscopio che registra la posizione di ciascuna lastra ed eventuali spostamenti rispetto alla sua posizione originaria.

Insieme a due unità di elaborazione centrale, questi sensori sono capaci di determinare la posizione, la traiettoria, la velocità e le dimensioni dei veicoli in tempo reale.

Successivamente, i sensori inviano i dati raccolti tramite una connessione *PoE - Power-over Ethernet*, tramite la quale sia la potenza elettrica che i dati viaggiano attraverso lo stesso cavo, ai centri di controllo, collocati circa ogni 800 metri lungo la strada. Ogni centro di controllo funge da piccolo centro dati ed è dotato di *server* e di una stazione base *wireless*. L'intero sistema è alimentato dalla rete [36].

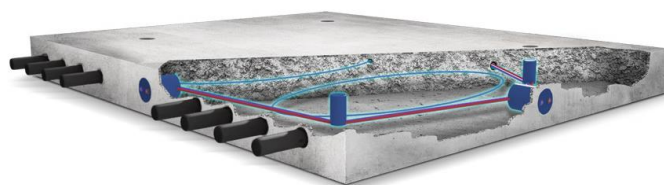


Figura 15 - Esempio di lastra prefabbricata in calcestruzzo. Fonte: www.integratedroadways.com.

1.11.2 Vantaggi e svantaggi

I vantaggi derivanti dall'impiego di questa tecnologia sono molteplici. La pavimentazione stradale intelligente favorisce il miglioramento della sicurezza stradale nel suo complesso, in quanto la sua implementazione permette di [36]:

- monitorare in tempo reale i flussi di traffico, segnalando eventuali code e rallentamenti, e costruire un modello statistico relativo al comportamento tenuto dai conducenti lungo il tratto di strada preso in esame;
- rilevare in tempo reale la posizione, la traiettoria e la velocità dei veicoli, permettendo di avvisare subito le autorità e i soccorsi nel caso si verifichi un incidente (collisione, uscita di strada, caduta accidentale di un carico, ecc.), riducendo i tempi di intervento;
- emettere automaticamente multe per eccesso di velocità;
- informare i conducenti sulle condizioni del manto stradale, come la presenza di acqua e ghiaccio, in modo da prevenire gli incidenti causati dalla poca aderenza.

La pavimentazione stradale intelligente, inoltre, essendo costituita da lastre prefabbricate in calcestruzzo, assemblabili tra loro, permette la realizzazione delle strade in tempi ridotti e la programmazione degli interventi di manutenzione e riparazione, prima della comparsa di danni sulla superficie [37]. Anche la manutenzione e la sostituzione della sensoristica presente all'interno della lastra in calcestruzzo viene facilitata, grazie alla presenza di accessi diretti ai sensori [38].

In futuro si ritiene che le pavimentazioni intelligenti saranno anche in grado di comunicare direttamente con i veicoli connessi e a guida autonoma e permetteranno la ricarica in moto dei veicoli elettrici [39].

Gli svantaggi connessi all'impiego di questa nuova tecnologia sono, principalmente [40]:

- i costi di implementazione molto elevati, specialmente su larga scala, pari a circa il doppio del costo di una strada convenzionale;
- l'affidabilità dei sensori montati all'interno delle piastre e gli eventuali problemi che nascerebbero nel caso di danneggiamento di una di esse.

1.11.3 Esempi di applicazione

La pavimentazione stradale intelligente verrà testata per la prima volta nella Città di Denver, in Colorado. Inizialmente verrà condotto un *test* sul Brighton Boulevard di Denver, tramite l'applicazione di quattro lastre prefabbricate, per accertare che la tecnologia funzioni correttamente. Se questo primo *test* andrà bene, verrà programmata l'implementazione di circa 500 metri di pavimentazione intelligente su una corsia della Highway 285, in corrispondenza di una curva pericolosa, causa di numerosi incidenti, specialmente in condizioni di maltempo [41]. L'obiettivo della prova è rilevare e segnalare quando un conducente sbanda ed esce di strada, ovvero la tipologia di incidente che si verifica maggiormente sulle strade di montagna del Colorado [36].

1.12 Segnaletica stradale luminosa dinamica "Flowell"

1.12.1 Descrizione

La tecnologia "*Flowell*", sviluppata dall'Azienda *Colas*, è un sistema modulare che emette segnali luminosi dinamici, visibili di giorno e di notte, aventi lo scopo di ottimizzare lo spazio urbano, gestire i flussi di traffico e aumentare la sicurezza stradale, specialmente nelle zone in cui coesistono più forme di mobilità [47]. Le indicazioni stradali dinamiche vengono emesse da dei pannelli multistrato, aventi uno spessore di 7 mm, all'interno dei quali sono inglobati dei *LED*, che vengono installati sul manto stradale e collegati alla rete elettrica e ai terminali di controllo dei semafori. Il sistema si attiva in presenza di veicoli, ciclisti e pedoni, che vengono rilevati da sensori presenti nelle lastre. Le lastre, inoltre, contengono al loro interno dei sensori in grado di regolare la luminosità dei *LED* in base al livello di illuminamento dell'ambiente esterno circostante. I pannelli *Flowell* possono essere realizzati in diverse forme e con diversi colori, a seconda dell'indicazione stradale che si vuole trasmettere. Essi sono anche in grado di resistere alla dilatazione termica, ai carichi dei veicoli che ci passano sopra e sono caratterizzati da una rugosità superficiale che offre un livello di aderenza paragonabile a quello offerto dalla segnaletica orizzontale tradizionale [48].

1.12.2 Vantaggi e svantaggi

Uno dei vantaggi principali dell'utilizzo della tecnologia *Flowell* è quello di favorire il rispetto del Codice della Strada da parte di tutti gli utenti, migliorando la sicurezza stradale e garantendo la coesistenza di diverse forme di mobilità. Per esempio, i pannelli luminosi a *LED* permettono di:

- migliorare la visibilità per i pedoni in prossimità degli attraversamenti pedonali;
- migliorare la visibilità per i ciclisti negli incroci o in altri punti potenzialmente pericolosi;
- migliorare la visibilità della segnaletica orizzontale;
- migliorare l'organizzazione dello spazio pubblico, evidenziando le aree dedicate a ciascuna tipologia di utente stradale, in prossimità di incroci pericolosi.

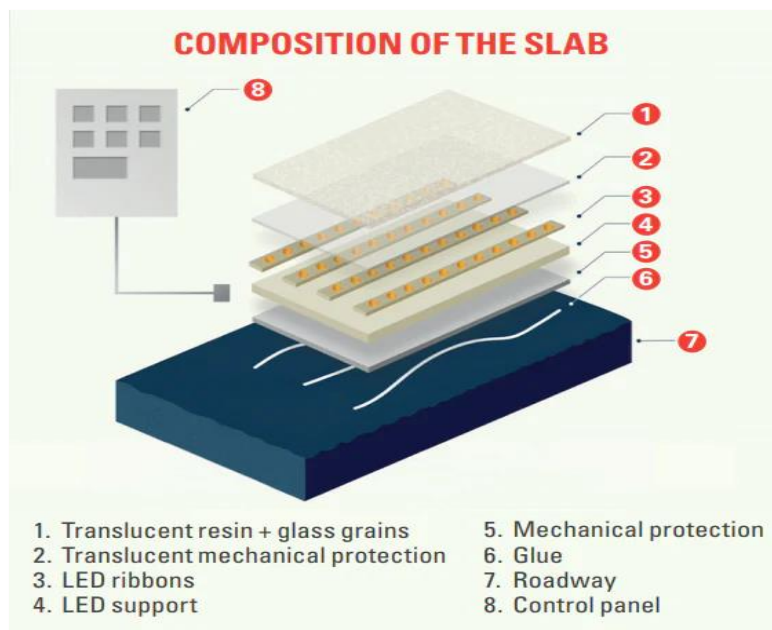


Figura 16 - Struttura delle lastre a LED del sistema Flowell. Fonte: www.ascoltd.co.nz.

Un altro vantaggio offerto da questa tecnologia è ottimizzare lo spazio urbano, adeguando l'infrastruttura stradale a seconda delle diverse esigenze degli utenti della strada e dei livelli di traffico. Tramite i segnali dinamici luminosi emessi dai pannelli, è possibile, infatti:

- creare aree di sosta temporanee in prossimità delle scuole;
- dare la priorità al transito di una determinata tipologia di veicoli in orari specifici e in determinate zone;
- trasformare i parcheggi riservati di giorno al carico e scarico in parcheggi notturni per i residenti [48].

I limiti del sistema di illuminazione dinamica *Flowell* sono gli elevati costi di implementazione e l'insufficiente visibilità dei segnali luminosi in determinate condizioni [49].

1.12.3 Esempi di applicazione

Il Progetto *Flowell* è stato testato per la prima volta all'inizio del 2019 a Nantes, all'incrocio tra i boulevard Vincent Gâche e General De Gaule, attraversato da circa 12.000 veicoli e 2.000 ciclisti al giorno e dagli autobus delle linee 4 e 5. In questo caso, i pannelli installati sul manto stradale emettono delle segnalazioni luminose dinamiche che avvisano gli utenti dell'arrivo e del passaggio degli autobus all'incrocio, evidenziando la traiettoria che andranno a percorrere. L'obiettivo è ridurre il numero di incidenti stradali che si verificano in prossimità dell'incrocio in questione, specialmente quelli che coinvolgono gli autobus, e il numero delle cadute dei passeggeri in seguito a frenate e manovre brusche compiute dai conducenti dei mezzi di trasporto pubblico per evitare collisioni con veicoli, ciclisti e pedoni. Tramite le segnalazioni luminose dinamiche, inoltre, si incentivano tutti gli utenti della strada a prestare maggiore attenzione in prossimità dell'incrocio.



Figura 17 - Applicazione dei pannelli Flowell a Nantes. Fonte: www.transdev.com.

A fine 2020, è stata condotta una valutazione dall'Ente francese CEREMA, dalla quale emerge che, in seguito all'utilizzo sperimentale dei pannelli *Flowell* a Nantes, si è avuta una riduzione del 25% del rischio di incidenti o manovre brusche durante le ore di punta serali [49].

I pannelli *Flowell* sono stati installati anche nel quartiere La Défense di Parigi, per migliorare la sicurezza delle piste ciclabili, segnalando la presenza dei ciclisti tramite dei segnali luminosi a forma di bicicletta. A Lione, invece, sono stati montati sul manto stradale dei pannelli *Flowell* che emettono dei segnali luminosi dinamici a forma di tram, per avvertire pedoni e biciclette del passaggio dei tram [48].

1.13 Sistema “Pedone sicuro 2.0”

1.12.1 Descrizione

“Pedone sicuro 2.0” è un dispositivo sviluppato e realizzato dall'Azienda *Safety 21*, che viene installato in prossimità degli attraversamenti pedonali non presidiati da un impianto semaforico. Il sistema è costituito da una telecamera fisheye a 360° e da quattro fotocellule, installate su paline di colore arancione, che insieme sono in grado di rilevare la presenza di pedoni sul marciapiede a ridosso dell'attraversamento pedonale. In questa eventualità, i conducenti dei veicoli in arrivo vengono avvisati da dei lampeggianti LED ad elevata luminosità, installati in prossimità delle strisce pedonali, e da dei pre-segnalatori posti a 70 metri di distanza, in modo da informare in anticipo gli automobilisti della presenza di pedoni sull'attraversamento pedonale e, di conseguenza, di rallentare e procedere con prudenza [50].

La telecamera, inoltre, riprende interamente l'attraversamento, registrando il video. Grazie a una connessione senza fili (*Wireless 4G/LTE*) e tramite la centralina di controllo, la telecamera è collegata con la centrale remota, alla quale fornisce in tempo reale le immagini provenienti direttamente dall'attraversamento pedonale. Le immagini vengono gestite a norma di legge e, nonostante non possano essere utilizzate per infrazioni del Codice della Strada, sono potenzialmente utili in caso di

incidente. L'energia elettrica necessaria per alimentare l'intero sistema viene fornita da pannelli solari incorporati sulle paline [51].



Figura 18 - Esempio di installazione del sistema "Pedone sicuro 2.0". Fonte: www.safety21.it.

Il sistema "Pedone sicuro 2.0" può essere configurato in quattro modi diversi [52]:

1. Soluzione base, costituita da:
 - 2 segnali luminosi posti ai lati del perimetro del passaggio pedonale;
 - 2 fotocellule per il rilevamento dei pedoni, collocate sui pali che delimitano il perimetro del passaggio pedonale;
 - 2 box col sistema elettronico per l'attivazione dei segnali luminosi LED.
2. Soluzione ideale, che comprende:
 - 2 segnali luminosi pre-segnalatori del passaggio pedonale;
 - 2 segnali luminosi posti ai lati del perimetro del passaggio pedonale;
 - 2 fotocellule per il rilevamento dei pedoni, collocate sui pali che delimitano il perimetro del passaggio pedonale;
 - 4 box col sistema elettronico per l'attivazione delle luci a LED.
3. Soluzione intermedia, caratterizzata da:
 - 4 segnali luminosi posti ai lati del perimetro del passaggio pedonale;
 - 2 fotocellule per il rilevamento dei pedoni, collocate sui pali che delimitano il perimetro del passaggio pedonale;
 - 4 box col sistema elettronico per l'attivazione dei segnali luminosi LED.
4. Soluzione completa, costituita da:
 - 2 segnali luminosi pre-segnalatori del passaggio pedonale;
 - 4 segnali luminosi posti ai lati del perimetro del passaggio pedonale;

Analisi delle nuove tecnologie per il miglioramento della sicurezza stradale

- 2 fotocellule per il rilevamento dei pedoni, collocate sui pali che delimitano il perimetro del passaggio pedonale;
- 6 box col sistema elettronico per l'attivazione dei segnali luminosi LED.

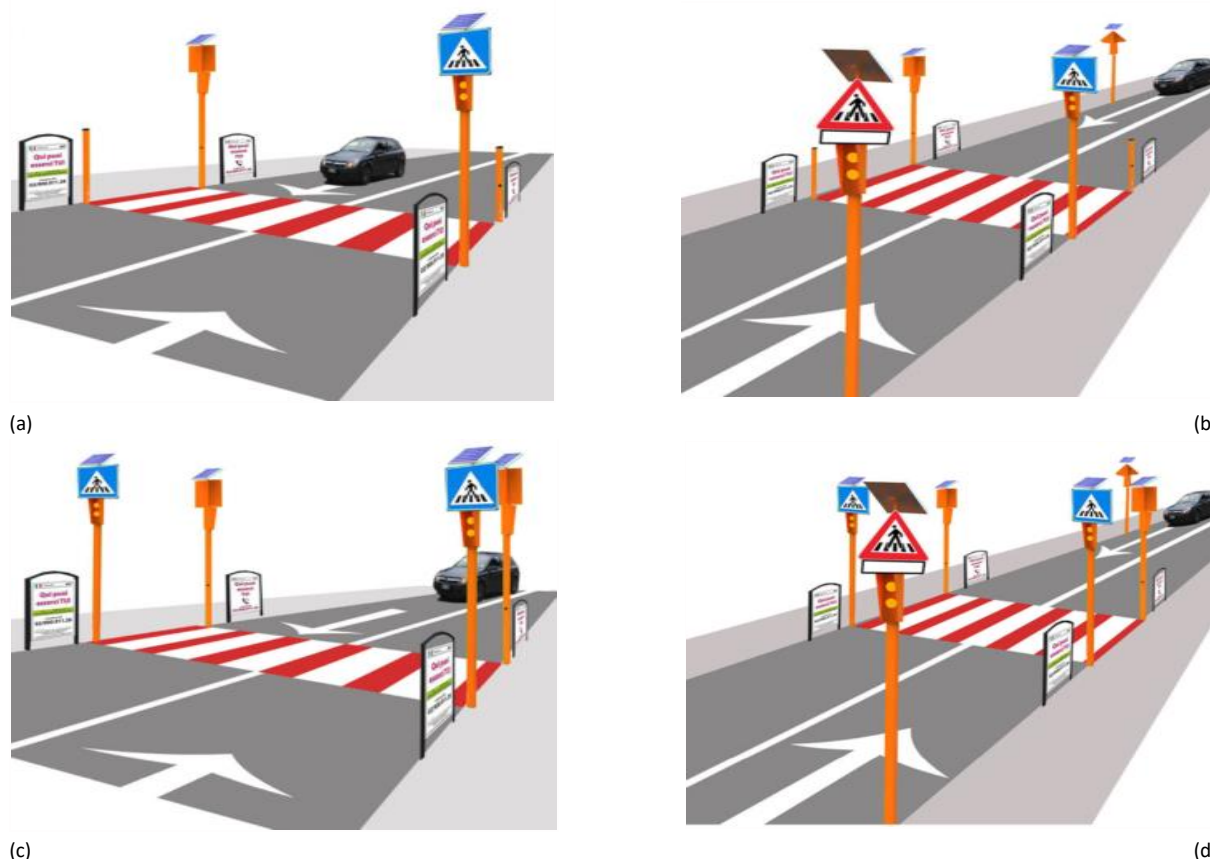


Figura 19 - (a) soluzione base; (b) soluzione ideale; (c) soluzione intermedia; (d) soluzione completa. Fonte: www.pedonesicuro.eu.

1.13.2 Vantaggi e svantaggi

Circa il 30% degli incidenti stradali che provocano delle vittime tra i pedoni avviene sulle strisce pedonali. Questo è in gran parte dovuto allo scarso illuminamento e alla segnalazione inadeguata degli attraversamenti pedonali [51]. L'utilizzo del sistema di monitoraggio degli attraversamenti pedonali "Pedone sicuro 2.0" contribuisce a migliorare la sicurezza e a ridurre il rischio di incidenti in prossimità degli attraversamenti pedonali, soprattutto in quelli non regolati da un impianto semaforico. Infatti, grazie alla presenza dei segnalatori a LED situati nelle vicinanze ed in prossimità dell'attraversamento, questo dispositivo risolve il problema della scarsa visibilità degli attraversamenti pedonali con qualsiasi condizione meteo, sia di giorno che di notte, e attira l'attenzione sul passaggio pedonale anche dei conducenti più distratti. Il sistema "Pedone sicuro 2.0" si attiva automaticamente, senza la necessità di premere alcun pulsante, e risulta essere molto utile negli attraversamenti pedonali molto affollati, come quelli presenti vicino a scuole e ospedali.

Un altro vantaggio è che il dispositivo impatta in maniera minima sull'ambiente, in quanto non sono necessari scavi per installare le paline al terreno. Il sistema è alimentato dall'energia elettrica fornita da pannelli solari montati sulle paline e si disattiva automaticamente in assenza di pedoni nelle vicinanze dell'attraversamento pedonale, riducendo al minimo i consumi energetici [53].

Finora non sono state rilevate criticità legate all'utilizzo di questa nuova tecnologia.

1.13.3 Esempi di applicazione

Il dispositivo "Pedone sicuro 2.0" è stato installato per la prima volta a Porto San Giorgio, in provincia di Fermo, per migliorare la sicurezza di un doppio attraversamento pedonale particolarmente pericoloso, collocato sul lungomare [53], e a Viguzzolo, in provincia di Alessandria, in corrispondenza di un passaggio pedonale posto sulla strada provinciale che attraversa il paese [54]. Il sistema, inoltre, è presente, da Luglio 2017, sulla Lariana nel comune di Torno e da Agosto 2017 sulla SP 40 nel Comune di Arosio, in provincia di Como (tra via Monte Rosa e via Piave) [55]. Anche il comune di Ameglia (provincia della Spezia) ha deciso di adottare questo sistema, che è stato installato in corrispondenza dell'attraversamento pedonale posto al km 4+070 sulla Strada Statale N°432 "Bocca di Magra", in modo da renderlo più visibile e controllato [56].

1.14 Strisce luminose "Zebrabright"

1.14.1 Descrizione

Il progetto "Zebrabright", lanciato e sviluppato dall'azienda *Prismo Road Markings*, consiste nel realizzare le strisce degli attraversamenti pedonali e ciclabili utilizzando una speciale vernice al MMA - *Metacrilato di Metile*, sulla quale viene poi applicato uno strato costituito da perline di vetro di alta qualità, aventi uno spessore di circa 2 mm. In questo modo, le strisce si illuminano al passaggio dei veicoli, essendo in grado di riflettere le luci dei fanali. La tecnologia "Zebrabright" consente, quindi, di realizzare delle strisce pedonali e ciclabili altamente riflettenti, in grado di generare un effetto riflettente di circa 700 mcd/lux/m², durante le notti con cielo sereno, contro i 150 mcd/lux/m² che generano le strisce tradizionali, e di circa 100 mcd/lux/m² quando la visibilità notturna è ridotta in presenza di condizioni meteorologiche avverse [57].

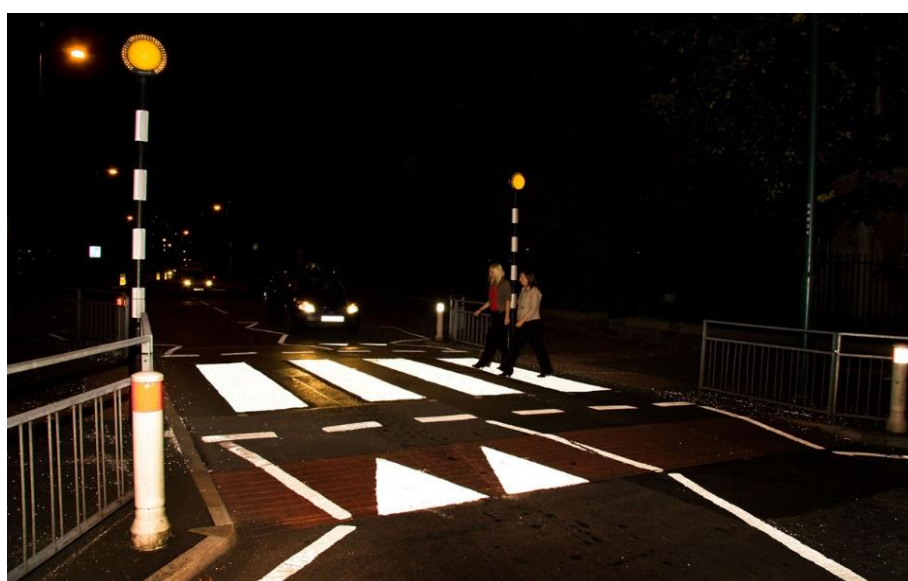


Figura 20 - Esempio di strisce pedonali "Zebrabright". Fonte: www.italiaennisprismo.it.

1.14.2 Descrizione

Il vantaggio principale delle strisce ciclopedonali luminose “*Zebrabright*” è il miglioramento della visibilità degli attraversamenti pedonali e ciclabili, soprattutto di quelli non regolati da un impianto semaforico e di quelli collocati in punti pericolosi e poco visibili durante la notte, riducendo il rischio di incidenti e favorendo il rallentamento da parte dei conducenti dei veicoli nelle vicinanze dei passaggi pedonali e ciclabili. L’utilizzo della vernice a base di metacrilato di metile, combinata con le perline di vetro, oltre a generare l’effetto riflettente, garantisce altri vantaggi, quali [58]:

- resistenza a temperature estreme;
- durata prolungata;
- ottimi livelli di aderenza;
- facilità di applicazione, che avviene a freddo;
- bassi costi e poca manutenzione.

Anche nel caso di questa tecnologia, non sono stati rilevati particolari svantaggi.

1.14.3 Esempi di applicazione

I primi test della tecnologia *Zebrabright* sono stati svolti su due attraversamenti pedonali nel centro della città di Nottingham (Inghilterra). Tramite l’impiego di un retroriflettometro, è emerso che il sistema delle strisce pedonali luminose, grazie alla vernice a base di metacrilato di metile, abbinata alle perline di vetro, aumenta l’effetto retro-riflettente di oltre cinque volte rispetto alle soluzioni standard, registrando un valore di circa 750 mcd, contro i 150 mcd delle normali strisce. I risultati complessivi della prova sono stati molto promettenti avendo misurato livelli di riflettività molto alti in condizioni di strada asciutta e superiori in caso di strada umida rispetto ai livelli di riflettività garantiti in condizioni di asciutto dalle normali vernici termoplastiche utilizzate per la segnaletica stradale [59].

1.15 Strisce pedonali intelligenti

1.15.1 Descrizione

Le strisce pedonali intelligenti, in grado di illuminarsi al passaggio dei pedoni, rappresentano un sistema messo a punto e sviluppato dall’Azienda catalana *Llumtraffic*. Il sistema è costituito da:

- sensori di pressione;
- luci a *LED*;
- vernice riflettente;
- pannelli fotovoltaici.

I sensori di pressione, installati sulla pedana di accesso dell’attraversamento pedonale, misurando il peso, rilevano il passaggio dei pedoni in procinto di attraversare la strada e inviano un impulso per l’accensione delle luci a *LED*, montate sia alle estremità della striscia pedonale che sulla segnaletica stradale verticale. In questo modo, l’attraversamento pedonale viene adeguatamente illuminato e segnalato a eventuali veicoli che stanno sopraggiungendo, sia grazie alle luci a *LED*, sia mediante l’impiego della vernice riflettente. L’energia necessaria viene fornita dai pannelli fotovoltaici [60]. In assenza di pedoni in prossimità dell’attraversamento pedonale, il dispositivo resta spento.

1.15.2 Descrizione

Le strisce pedonali intelligenti che si illuminano automaticamente al passaggio dei pedoni contribuiscono a migliorare la visibilità e, di conseguenza, la sicurezza degli attraversamenti pedonali posti in zone particolarmente critiche o poco illuminate. Questa soluzione rappresenta anche un valido deterrente alla velocità delle auto, poiché l'illuminazione improvvisa delle strisce pedonali intelligenti spinge i conducenti a rallentare e a fermarsi immediatamente, a differenza di quanto accade spesso con gli attraversamenti pedonali classici. Il sistema ha, inoltre, un basso impatto energetico, in quanto l'energia viene fornita dai pannelli fotovoltaici e le luci a *LED* si spengono in assenza di pedoni in procinto di attraversare la strada.

Lo svantaggio di questa nuova tecnologia che ne contrasta l'implementazione su larga scala è il costo elevato, pari a 10.000 €: una cifra che però non è troppo alta se si tengono in considerazione i costi sociali degli incidenti e delle morti che riguardano i pedoni [61].



Figura 21 - Esempio di strisce pedonali intelligenti. Fonte: www.lastampa.it/motori/tecnologia;
<https://www.lombardiaspeciale.regione.lombardia.it>.

1.15.3 Esempi di applicazione

Le strisce pedonali intelligenti sviluppate da *Llumtraffic* sono state installate in diverse città della Spagna. In particolare, in alcuni attraversamenti pedonali ad Antequera e nella città catalana di Cambrils, nell'ambito del progetto di *smart city "Urban Lab"*, cui aderiscono anche il Comune di Barcellona e le Città di Figueres, Llieda e Solsona [62].

Un dispositivo simile, chiamato sistema "salva pedone" [63], è stato testato anche in Italia, a Legnano ed è ampiamente e particolarmente descritto nel paragrafo omonimo³.

1.16 Strisce pedonali stigmergiche *Starling Crossings*

1.16.1 Descrizione

La Società di progettazione urbana *Umbrellium* ha sviluppato un nuovo sistema di strisce pedonali adattive, conosciute col nome di *Starling Crossings*, che rappresenta l'acronimo di *Stigmergic Adaptive Responsive LearnINg Crossing*. Il funzionamento di questo tipo di attraversamenti pedonali si basa sul concetto di stigmergia, ovvero la capacità dei componenti di un sistema di comunicare tra loro attraverso la modifica dell'ambiente circostante [64]. Le strisce pedonali *Starling Crossing*, infatti, sono in grado di modificare il loro colore, l'intensità luminosa e la loro larghezza, in base al numero di pedoni che stanno per attraversare la strada e in base alle condizioni del traffico.

Il sistema è costituito da [65]:

- una serie di telecamere ad alta definizione, che riprende la zona circostante l'attraversamento pedonale, monitorando il traffico in tutte le direzioni;
- un'unità di controllo, che, oltre a registrare le informazioni, è in grado di calcolare la posizione, la traiettoria, la velocità e di prevedere i movimenti dei veicoli, dei ciclisti e dei pedoni presenti. Questo è reso possibile grazie alle reti neurali, che adattano il proprio comportamento sfruttando l'esperienza passata;
- il manto stradale, posto in corrispondenza del passaggio pedonale e ciclabile, che è costituito da pannelli in plastica con luci a *LED* incorporate, inseriti in una robusta struttura metallica, in grado di resistere al peso dei veicoli e di offrire un'elevata aderenza anche in condizioni di strada bagnata [66];
- l'illuminazione a *LED*, che consente di rappresentare non solo le tradizionali strisce bianche, ma anche altri tipi di indicazioni, con diverse forme e colori. Ad esempio, è possibile evidenziare ai pedoni la migliore traiettoria da seguire per passare da una parte all'altra della strada, in funzione delle condizioni del traffico. Inoltre, l'area dell'attraversamento può ingrandirsi nei momenti di maggiore afflusso di pedoni e ciclisti, e assottigliarsi fino a scomparire in assenza di pedoni.

Questa tecnologia è stata sviluppata prendendo in considerazione i dati relativi agli incidenti stradali che ogni anno coinvolgono i pedoni nel Regno Unito. Questi eventi, infatti, sono strettamente correlati

³ In estrema sintesi, è un sistema costituito da una piattaforma parzialmente annegata all'interno del marciapiede e all'interno della quale sono installati dei sensori di pressione, e da una serie di luci a *LED* installate sul manto stradale o montate su delle colonnine poste all'estremità dell'attraversamento pedonale e ciclabile. I sensori di pressione, dopo aver rilevato la presenza di pedoni e ciclisti, comandano l'accensione delle luci a *LED*, che avvertono gli automobilisti, in prossimità dell'attraversamento pedonale e ciclabile, di rallentare.

al punto in cui si attraversa la strada, così come alla presenza di altre persone (specie in condizioni di sovraffollamento) che, nello stesso momento, intendono raggiungere l'altro lato del marciapiede [67].



Figura 22 - Esempio di strisce pedonali Starling Crossings.
Fonte: www.umbrellium.co.uk/projects/starling-crossing.

1.16.2 Vantaggi e svantaggi

Le strisce pedonali *Starling Crossings*, sviluppate in collaborazione con la Compagnia assicurativa *Direct Line*, nascono con lo scopo di diminuire il numero degli incidenti stradali che avvengono durante l'attraversamento della strada da parte dei pedoni o dei ciclisti e che spesso sono causati dalla disattenzione dei conducenti dei veicoli o dalla poca visibilità dell'attraversamento pedonale e ciclabile. Questa soluzione, infatti, consente di [67]:

- migliorare la visibilità e la sicurezza degli attraversamenti pedonali e ciclabili;
- attirare l'attenzione dei pedoni che attraversano la strada in maniera distratta, ad esempio guardando il cellulare;
- migliorare il deflusso dei pedoni in prossimità di scuole e ospedali, specialmente nelle ore di punta;
- avvisare adeguatamente i conducenti dei veicoli della presenza di ciclisti e pedoni intenti ad attraversare la strada e, di conseguenza, della necessità di rallentare;
- migliorare la fluidità del traffico veicolare nelle fasce orarie in cui la presenza di pedoni e ciclisti è minima o nulla.

Tuttavia, essendo ancora una nuova tecnologia in fase sperimentale e sviluppo, i costi per implementare questo dispositivo sono ancora molto alti [68].

1.16.3 Esempi di applicazione

La tecnologia delle strisce pedonali adattive *Starling Crossings* è ancora in fase di sperimentazione ed è stata testata in corrispondenza di un attraversamento pedonale nel sud di Londra, a Mitcham [69].

1.17 Air Crosswalk

1.17.1 Descrizione

La soluzione conosciuta col nome di “*Air Crosswalk*” è stata proposta dall’*Art Lebedev Studio* e consiste in una serie di strisce luminose poste al di sopra della pavimentazione stradale, parallelamente alle strisce pedonali, in modo da creare una sorta di doppio attraversamento. In questo modo, anche grazie all’impiego di sensori che rilevano la presenza dei pedoni in procinto di attraversare la strada, in ambito notturno le strisce si illuminano, rendendo così l’utente più visibile ai conducenti che sopraggiungono in prossimità dell’attraversamento pedonale [70]. L’illuminazione può essere fornita da lampade a scarica o tramite luci *laser* [71].



Figura 23 - Esempio di strisce pedonali *Starling Crossings*. Fonte: www.artlebedev.com.

1.17.2 Vantaggi e svantaggi

I principali vantaggi derivanti dall’impiego di questa tecnologia risultano [71]:

- l’illuminazione dall’alto garantisce la sicurezza dei pedoni, in quanto invita i conducenti a prestare attenzione e a rallentare in prossimità dell’attraversamento pedonale;
- tramite questo tipo di illuminazione, le strisce pedonali possono essere viste da lontano, il che è particolarmente importante per le strade poco illuminate fuori città, dove i conducenti spesso non si aspettano la presenza di pedoni;
- le strisce luminose poste sopra la strada costituiscono un segnale facilmente visibile e riconoscibile per un attraversamento pedonale, anche nei casi in cui la segnaletica orizzontale è assente, rovinata o coperta di neve durante l’inverno.

Tra gli svantaggi di questa soluzione innovativa, figura, analogamente ad altre, l'esigenza di collocarla in aree servite da infrastrutture per la redistribuzione o impianti d'approvvigionamento energetici. Altro svantaggio, dovuto alle peculiarità tecnologiche, potrebbe essere rivestito da violente circostanze meteorologiche, quali eventi eolici estremi, peraltro sempre meno rari anche alle latitudini italiane, che potrebbero gravemente danneggiare i dispositivi di illuminazione pensili, ecc.

1.17.3 Esempi di applicazione

L'*Air Crosswalk* è stato sperimentato per la prima volta in Russia, nella città di Tumen, in seguito all'approvazione da parte del Dipartimento della polizia locale [71].

1.18 Segnaletica orizzontale "salvamotociclisti"

1.18.1 Descrizione

La segnaletica orizzontale "salvamotociclisti" è costituita da strisce, di lunghezza variabile, perpendicolari alla linea di mezzieria che divide le due corsie della strada. La disposizione delle strisce è pensata per segnalare e delimitare l'area nella quale il busto e la testa del motociclista invaderebbero la corsia opposta, mentre le ruote restano nell'altra parte della carreggiata. Questa tipologia di segnaletica è funzionale solamente per le curve a sinistra, considerato che nelle curve a destra il motociclista non si sporge verso il limite della carreggiata [73].



Figura 24 - Esempio di segnaletica orizzontale "salvamotociclisti". Fonte: www.inmoto.it.

1.18.2 Vantaggi e svantaggi

Il vantaggio principale derivante dall'impiego della segnaletica orizzontale "salvamotociclisti" è la riduzione degli incidenti che si verificano tra i motociclisti e i veicoli che arrivano in direzione opposta, in corrispondenza delle curve a sinistra, nelle quali la visuale è limitata. Questo tipo di segnaletica,

infatti, invita i motociclisti a rimanere al centro della propria corsia, evitando di avvicinarsi troppo alla linea di mezzzeria e, di conseguenza, di invadere la corsia opposta con la testa e col busto. Un altro aspetto che va a favore di questa soluzione è il basso costo necessario per la realizzazione. L'unica problematica connessa alla segnaletica "salvamotociclisti" riguarda il livello di aderenza fornito dalla vernice con cui vengono realizzate le strisce, perpendicolari alla linea di mezzzeria, specialmente in condizioni di strada umida o bagnata. Per aumentare il livello di aderenza, è possibile usare come materiale per le strisce, al posto della vernice, plastica a sfregamento a freddo con l'aggiunta di agenti antiscivolo [73].

1.18.3 Esempi di applicazione

La soluzione della segnaletica orizzontale "salvamotociclisti" è stata sperimentata per la prima volta in Austria, nel 2016. Da quando è stata adottata questa soluzione, non si sono più registrati incidenti stradali gravi nelle zone scelte per la sperimentazione. Anche negli ultimi anni gli incidenti sono diminuiti: nel 2022 sono state prese in analisi alcune curve delle strade in Tirolo, dove il numero di cadute, in sette curve, è passato da 16 a 7, nello stesso periodo, rispetto all'anno precedente. Nel confronto con il 2019, inoltre, gli incidenti sono diminuiti dell'80% [73]. La sperimentazione ha poi raggiunto il Lussemburgo, nel 2018, su un tratto di strada montuoso tra la N25 e Wiltz Kautenbach. Tramite l'ausilio di telecamere, sulle strade lussemburghesi si è osservato come, prima dell'applicazione della nuova segnaletica, il 12% dei motociclisti passava abitualmente nella zona più vicina alla linea di mezzzeria. Dopo l'introduzione della nuova segnaletica orizzontale, l'analisi dei dati raccolti ha mostrato un drastico calo del passaggio dei motociclisti nella zona vicino alla linea di mezzzeria, abbassandosi da una percentuale del 12% fino all'1% [74]. Infine, dopo anni, la segnaletica orizzontale "salvamotociclisti" viene testata anche in Germania, a partire da maggio 2023, nel circondario di Düren, nella parte occidentale della Renania Settentrionale-Vestfalia [73].

1.19 Sistema *Salva Pedone*®

1.19.1 Descrizione

Il sistema *Salva Pedone*® utilizza un'innovativa tecnologia intelligente, definita *Smart Street*, che consente di porre in sicurezza gli attraversamenti pedonali, ciclabili e ciclo-pedonali non regolati da impianti semaforici: risulta personalizzabile in funzione del contesto urbano nella quale debba essere inserita, alla geometria ed alla pericolosità, in particolare al livello di rischio dell'attraversamento pedonale. I componenti nei quali si articola il sistema *Salva Pedone*® si suddividono tra i dispositivi che costituiscono il sistema di rilevazione e gli accessori: questi ultimi possono essere implementati per ampliare l'efficacia dell'impianto stesso.

Smart street stone® è un impianto brevettato che consiste in una piattaforma sensibile luminosa inserita nella pavimentazione del marciapiede, che si accende rilevando la presenza su di essa del pedone e/o del ciclista in procinto di transitarvi. Questa tecnologia si basa sullo sviluppo della sensoristica intelligente, concepita e perfezionata per aumentare la sicurezza delle strade urbane.

L'innovativa piattaforma realizzata in cemento armato è dotata di una barra a led bianco/rossi e di particolari sensori passivi, anch'essi brevettati, adeguati per rilevare sia la variazione di pressione quando soggetta a calpestio, sia i passi dei pedoni, distinguendoli. Attraverso i segnali inviati ed elaborati dalla centralina elettrica, tutti gli altri elementi che compongono il sistema, allertano i veicoli in arrivo della presenza di pedoni o ciclisti in fase di attraversamento.

Il citato dispositivo si articola nei seguenti sottosistemi di rilevazione:

- **CB - Cross-Bike.** Coppia di colonnine luminose in acciaio inox in grado di rilevare pedoni e/o ciclisti in procinto di attraversare la strada, andando così ad attivare gli altri elementi che compongono il sistema, che avvertiranno gli automobilisti della presenza in carreggiata di altri utenti. Ciascuna colonnina si struttura su un sensore, due led lampeggianti ambra orientati verso la carreggiata stradale gli automobilisti, due barre a led bianche orientate verso le strisce zebra (che rendono maggiormente visibile il pedone o il conducente del velocipede o veicoli affini), e una corona a led bianco/rossa con diffusore opalino che avvisa della presenza di un sistema Salva Pedone® quando esso è in *stand by*.
- **Cross Bike (CB) bifacciali.** Coppia di colonnine luminose in acciaio *inox* a doppia illuminazione bianca verticale, inserite nello spartitraffico centrale, quando presente, composte e rivestenti le stesse funzioni delle colonnine *CB* ordinarie. Questa soluzione è in grado pertanto di rilevare pedoni e/o ciclisti e attivarsi quando essi sono in procinto di transitare.
- **PCB - Pre Cross Bike®.** Due coppie di mini-colonne luminose, il cui funzionamento è identico a quello delle colonnine del sistema *CB*, così come le funzioni che svolge.

Elementi accessori del sistema risultano:

- **Smart Street Eye®.** Dispositivo di segnalazione stradale a *Led* ambra, collocato nella semicarreggiata (i.e., in entrambi i sensi di marcia), almeno 2 ml prima delle zebra: lampeggia al fine d'avvisare i conducenti degli autoveicoli della presenza di pedoni/ciclisti in fase di attraversamento oppure di altri ostacoli o pericoli sulla carreggiata. Il *marker* stradale *Smart Street Eye®*, può essere integrato alla piattaforma sensibile *Smart Street Stone®* oppure alle colonnine luminose *Cross Bike*, garantendo un alto livello di sicurezza nella circolazione stradale.
- **LCW - Led Crosswalk.** La composizione materica del manufatto è Magma e cemento pozzolanico, inserito nella carreggiata all'interno delle zebra, caratterizzato da carrabilità di 40 t e dotato di barra a *Led* bianchi che garantisce la maggiore visibilità degli utenti delle strisce pedonali, illuminandoli dal basso.
- **Sign NP.** Segnale verticale indicante attraversamento pedonale, conforme al Codice della Strada, in quanto catarifrangente di categoria 2 catarifrangente. Posizionato sul marciapiede, si illumina (essendo retroilluminato con pannelli a *Led* posti all'interno di una cassa in acciaio), e lampeggia quando l'impianto viene attivato per attirare l'attenzione dei conducenti. Nella scossa sono alloggiati anche lampeggianti bianco/ambra, che si attivano insieme all'impianto e al cartello: l'insegna e i *Led* sono posizionati su entrambi i lati del cartello, permettendo così una visibilità in entrambi i sensi di marcia. Il cartello è visibile nelle ore notturne e diurne; in caso di necessità può anche essere a bandiera.
- **Dispositivo di rilevazione della velocità o SC - Speed Control.** Dotato di *display* dinamico con possibilità di indicare la velocità rilevata e di visualizzare un messaggio specifico in base alla velocità del mezzo, il dispositivo viene collocato sul marciapiede almeno 20 metri prima dell'attraversamento. Equipaggiato con barra a *Led* rossa, che si attiva, unitamente ai messaggi sul display, quando il veicolo in arrivo procede a velocità eccessivamente sostenuta, mettendo a rischio la sicurezza nell'attraversamento. Il dispositivo invia inoltre un messaggio di pericolo

o di ringraziamento al conducente in base alla sua velocità, includendo un sistema che monitora il traffico in entrambi i sensi di marcia (velocità medie e massime e numero di veicoli).

- *Led Crosswalk (LCW)* doppia. Realizzato con composto in Magma e cemento pozzolanico, come il LCW ordinario è caratterizzato da una carrabilità di 40 t, è un dispositivo dotato di una barra a Led bianca, che illumina il pedone o il ciclista dal basso, favorendone la visibilità, e di una barra a Led rossa, che avvisa il pedone o il ciclista del sopraggiungere di un veicolo a velocità sostenuta o di altri rischi o pericoli.
- *Sign 303-DND*. Segnale verticale catarifrangente (cat. 2), retroilluminato con pannelli a Led posti all'interno di una cassa in acciaio, indicante attraversamento ciclabile. Nella scocca sono installati anche Led lampeggianti bianco/ambra che si attivano assieme all'impianto e al cartello. L'insegna e i Led sono posizionati sia anteriormente sia posteriormente al cartello, permettendo la visibilità da sensi di marcia: in caso di necessità può anche essere installato il segnale *Sign 303-DND* a bandiera.

1.19.2 Vantaggi e svantaggi

I vantaggi degli eterogenei dispositivi fin qui descritti sono molteplici, conformemente alle loro caratteristiche ed alle loro funzioni. Alcuni di essi, in particolare, risultano molto utili per il contenimento dei costi di installazione degli impianti semaforici. Le peculiarità stesse dei diversi sensori analizzati corrispondono ai loro principali vantaggi che li rendono apparecchiature efficienti ed efficaci. Le citate caratteristiche riguardano la tipologia dei diversi dispositivi considerati, le molteplici distinte funzioni di uno stesso sensore o di molteplici sensori. Peculiarità utilissime che comprendono gli standard dimensionali rilevabili dai sensori (quali la distanza dal cordolo del marciapiede ribassato, all'imbocco delle strisce pedonali, oppure la larghezza dell'area rilevabile), la presenza di pedoni o ciclisti fermi o in fase di spostamento, la velocità dei veicoli rilevati, il possibile posizionamento di taluni sensori sfruttando infrastrutture preesistenti, ecc. *Smart Street Stone*[®], in particolare, consente di porre in sicurezza gli attraversamenti pedonali, ciclabili e ciclo-pedonali precedentemente non regolamentati.

Tra gli svantaggi di questi sensori, figurano, analogamente ad altre, l'esigenza di collocarli preferibilmente in aree servite da infrastrutture per la redistribuzione o impianti d'approvvigionamento energetici. Altri svantaggi sono rilevabili nelle avarie e nei malfunzionamenti soprattutto endogeni o esogeni, dovuti ad eventuali avarie sistemiche, cali di tensione, black-out, ecc.

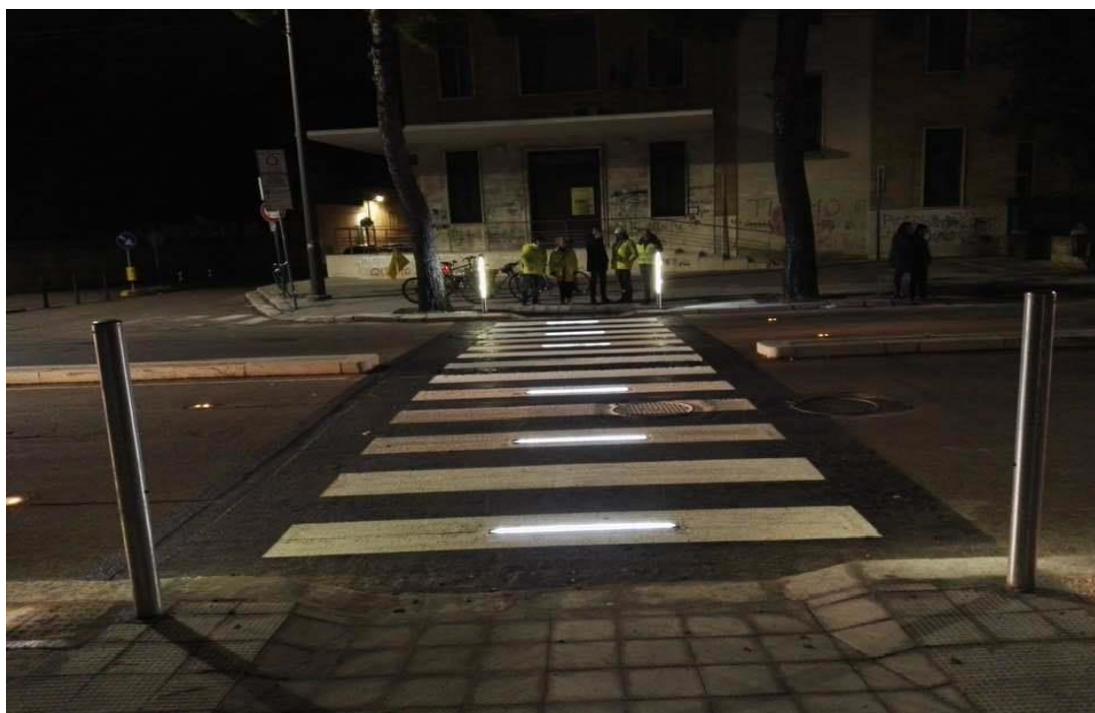


Figura 25 - Esempio di sistema "salva pedone". Fonte: www.infocilento.it.

1.19.3 Esempi di applicazione

Il sistema *Salva Pedone*[®] è stato già applicato ad Altamura (BA), Busto Arsizio (VA), Calolziocorte (LC), Cantello (VA), Cerro al Lambro (MI), Comun Nuovo (BG), Garlate (LC), Ispra (VA), Lacchiarella (MI), Lainate (MI), Lecce (LE), Legnano (MI), Lissone (MB), Nova Milanese (MB), Olbia (SS), Padula (SA), Parabiago (MI), Pero (MI), Pisa (PI), Ponte Lambro (CO), Portici (NA), Roma, San Giuliano Milanese (MI), Sant'Angelo Lodigiano (LO), Seclì (LE), Sesto San Giovanni (MI), Troia (FG), US Naval Support Activity Napoli.

Capitolo 2 - Sistemi installati a bordo del veicolo

I sistemi di sicurezza installati a bordo del veicolo, che comunicano con l'infrastruttura stradale, sfruttano la presenza di sensori e telecamere e sono in grado di rilevare la presenza di potenziali pericoli sulla strada, di monitorare e assistere il conducente durante la guida e di intervenire in caso di emergenza. Questo tipo di sistemi può intervenire in due modi:

- in modo passivo, avvisando semplicemente il conducente tramite dei segnali visivi, sonori o mediante la vibrazione del volante o del sedile;
- in modo attivo, agendo sullo sterzo e sull'impianto frenante per prendere parzialmente il controllo del veicolo ed evitare una collisione.

I nuovi sistemi di sicurezza, installati a bordo dei veicoli e che comunicano con le infrastrutture stradali, sono:

5. ISA - *Intelligent Speed Adaptation*;
6. Frenata automatica di emergenza (AEB);
7. LSS - *Lane Support Systems*;
8. Sistema di monitoraggio degli angoli ciechi (BSM);
9. TSR - *Traffic Sign Recognition*.

2.1 ISA - Intelligent Speed Adaptation

2.1.1 Descrizione

L'ISA - *Intelligent Speed Adaptation* è un sistema che consente ai veicoli di limitare automaticamente la propria velocità di marcia e appartiene al gruppo dei cosiddetti ADAS - *Advanced Driver Assistance Systems*⁴, ossia tutti quei sistemi elettronici che supportano il conducente di un veicolo in diverse

⁴ L'avvento di tecnologie innovative come l'Intelligenza Artificiale (AI), l'IoE - Internet of Everything e i protocolli di comunicazione wireless come il LoRaWAN – Long Range Wide Area Network, stanno rivoluzionando il modo in cui affrontiamo la sicurezza stradale. Con l'aumento del numero di veicoli in circolazione, è più importante che mai utilizzare queste tecnologie per migliorare la sicurezza sulle nostre strade. I sistemi ADAS e la guida autonoma rappresentano un notevole passo in avanti per la sicurezza dei veicoli. La loro efficienza, tuttavia, dipende in gran parte dalla qualità delle infrastrutture stradali e dalle condizioni di guida, comprese le condizioni atmosferiche. Pertanto, l'implementazione di sensori stradali per monitorare e segnalare eventuali pericoli diventa essenziale per il corretto funzionamento di queste tecnologie. LoRaWAN e altri protocolli di comunicazione wireless potrebbero fornire il mezzo per la raccolta e la trasmissione di dati da sensori stradali su vaste aree geografiche, contribuendo a creare una rete di sicurezza stradale intelligente. Questo potrebbe consentire un monitoraggio e una risposta in tempo reale ai cambiamenti delle condizioni stradali e potrebbe integrarsi con i sistemi di bordo dei veicoli per fornire agli automobilisti avvisi tempestivi. È importante ricordare tuttavia che queste tecnologie non sono una panacea. Mentre possono aiutare a ridurre il rischio di incidenti, la sicurezza stradale dipende ancora in gran parte dal comportamento dei conducenti. La consapevolezza della sicurezza, la formazione e la responsabilità dei conducenti rimangono fondamentali per la sicurezza stradale. In definitiva, l'intelligenza artificiale, l'IoE e la comunicazione wireless rappresentano strumenti preziosi. Tuttavia, il loro potenziale può essere realizzato solo attraverso un'implementazione e un utilizzo corretti, e dovrebbero essere visti come parte di una soluzione più ampia che coinvolge infrastrutture stradali sicure, veicoli sicuri e conducenti responsabili. Il LoRaWAN è un protocollo di comunicazione wireless ad alta efficienza energetica progettato per lo IoT – Internet of Things che consente a dispositivi a bassa potenza di comunicare con server IoT attraverso reti di lungo raggio, rendendo possibile la raccolta e la gestione dei dati da sensori e dispositivi distribuiti su vaste aree geografiche. Risulta particolarmente efficace per applicazioni che richiedono dispositivi con lunga durata della batteria e bassi costi operativi, come il monitoraggio ambientale, la *smart agriculture* e il tracciamento degli asset. Quindi, tramite sensori di ingombro che rilevano veicoli fermi e/o individui presenti all'uscita di una curva cieca è possibile segnalare la presenza.

situazioni, che possono riguardare la normale guida fino ai momenti di pericolo o emergenza. Il dispositivo ISA si basa su una serie di sensori e una telecamera posizionata sulla parte anteriore del veicolo, che a sua volta è collegata ad un segnale GPS che imposta i limiti di velocità in base alla segnaletica stradale riconosciuta dalla videocamera.

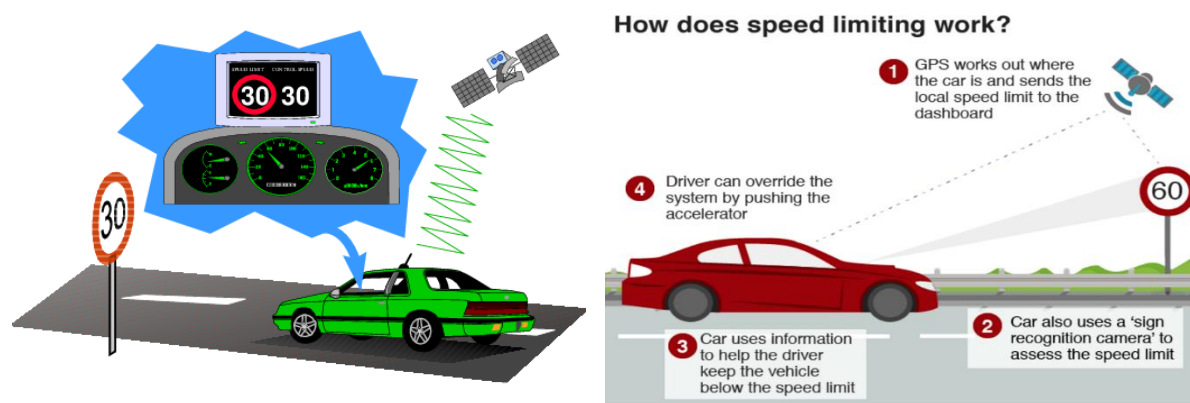


Figura 26 - A sinistra Concept-of-autonomous-ISA-system; a destra Funzionamento del sistema ISA. Fonte: <https://makerfairerome.eu>; www.industryeurope.com

Esistono diverse tipologie più o meno evolute di ISA, che si distinguono fra loro in base a determinate caratteristiche. Un sistema ISA può essere di tipo attivo o passivo. I dispositivi attivi intervengono automaticamente sulla velocità del veicolo, regolandola in base al limite imposto dalla segnaletica. I sistemi ISA di tipo attivo possono limitare la velocità del veicolo agendo sulle prestazioni del motore, una volta raggiunto un determinato limite di velocità, tramite la riduzione della coppia o del numero di giri del motore. Il conducente, tuttavia, può disattivare il sistema accelerando fino a superare il limite di velocità in questione.

I dispositivi ISA di tipo passivo, invece, si limitano ad avvisare il conducente del superamento dei limiti di velocità, ma non intervengono direttamente per ridurre la velocità del veicolo, il cui controllo rimane totalmente all'autista. In questo caso, il sistema può avvisare il conducente in diversi modi:

- tramite segnali sonori o visivi, come per esempio dalle spie sul cruscotto;
- mediante la vibrazione del pedale dell'acceleratore;
- con il cosiddetto pedale aptico, ossia un pedale dell'acceleratore in grado di diventare più rigido e opporre maggiore resistenza alla pressione del piede del conducente, una volta che il veicolo ha oltrepassato il limite di velocità.

Ciò che accomuna tutte le varie tipologie di dispositivi ISA è la possibilità di essere disattivati dal conducente del veicolo [75].

2.1.2 Vantaggi e svantaggi

Il principale vantaggio dei dispositivi ISA di adattamento intelligente della velocità è la riduzione della velocità dei veicoli, con la conseguente diminuzione del rischio di incidenti e il miglioramento della sicurezza stradale. È stato stimato che circa il 30% degli incidenti mortali sono causati dalla velocità troppo elevata e che la percentuale dei conducenti che superano i limiti di velocità varia da un minimo del 40% a un massimo del 60%. Vari studi hanno inoltre dimostrato che, riducendo la velocità media anche solo di 1 km/h, può portare a diminuire gli incidenti mortali del 5% [76].

Numerosi studi affermano che i sistemi ISA di tipo attivo hanno il potenziale per [77]:

Analisi delle nuove tecnologie
per il miglioramento della sicurezza stradale

- ridurre gli incidenti mortali del 46%;
- ridurre gli incidenti con feriti meno gravi del 34%.

Intelligent speed assistance: how it works

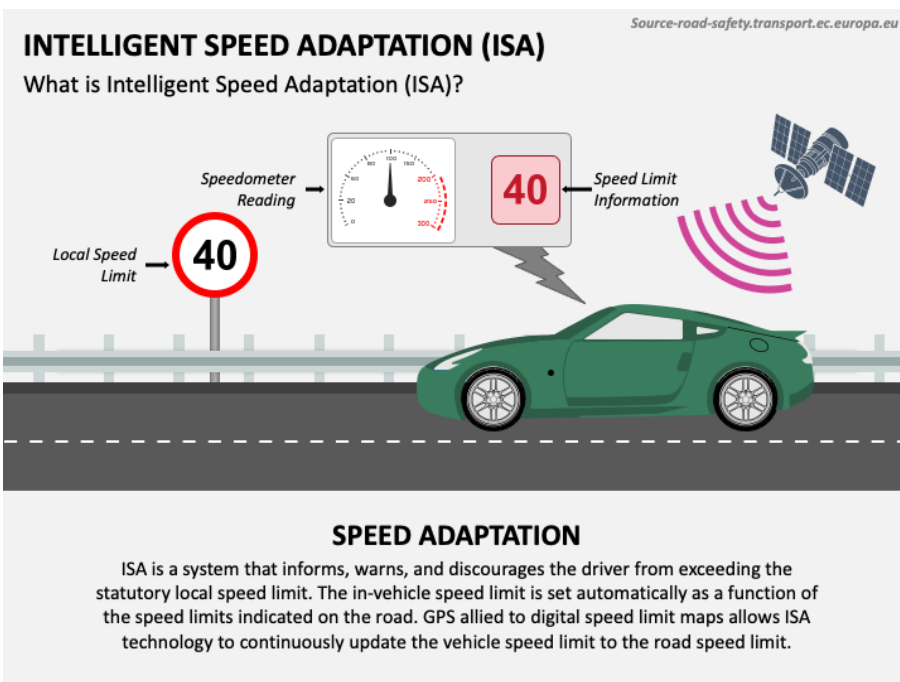
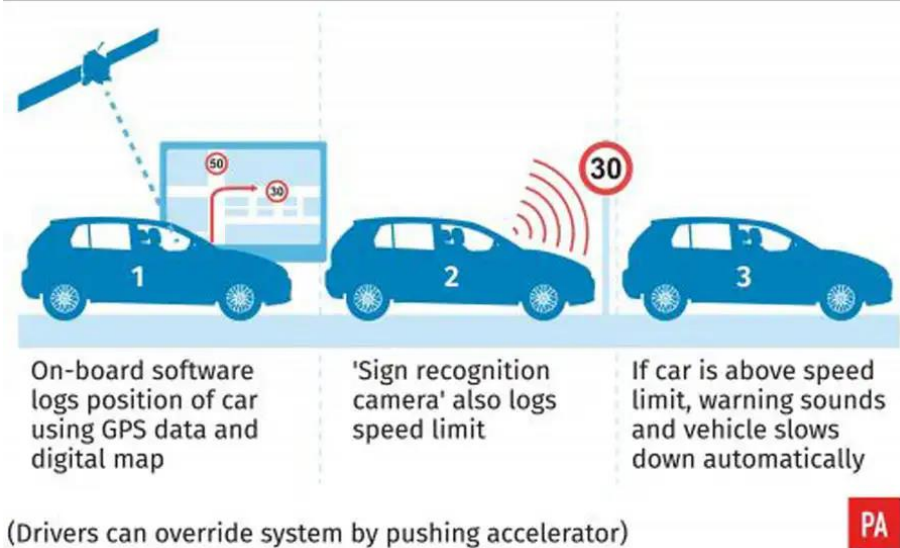


Figura 27 - Schema ISA. Fonte: www.autocar.co.uk; [road safety transport.ec.europa.eu](http://road-safety.transport.ec.europa.eu)

I sistemi ISA di tipo passivo, invece, risultano in grado di:

- ridurre gli incidenti mortali del 21%;
- ridurre gli incidenti con feriti meno gravi del 14%.

Va anche considerato che, più viene permesso al sistema di intervenire attivamente nella guida, tanto maggiore è il guadagno in termini di sicurezza. Inoltre, è stato notato che i vantaggi in termini di miglioramento della sicurezza stradale sono più evidenti nelle strade urbane rispetto a quelle periferiche. Un altro aspetto positivo dei dispositivi ISA è che promuovono uno stile di guida più

costante, poiché in parte evita le manovre di frenata e accelerazione, favorendo quindi la riduzione dei consumi e delle emissioni da parte dei veicoli.

Tuttavia, l'utilizzo dei sistemi di adattamento intelligente della velocità richiede particolare attenzione e potrebbe perdere la sua efficacia in situazioni particolari, quali [77]:

- in caso di guida alternata rispetto al veicolo che precede;
- in caso di cambi di corsia;
- quando si svolta o si percorrono curve strette;
- nel caso si debbano riconoscere pedoni e ciclisti;
- nel caso si debbano riconoscere veicoli fermi o che sorraggiungono in direzione opposta;
- quando i sensori o la telecamera montati sul veicolo sono sporchi;
- in presenza di cartelli stradali sporchi o rovinati;
- vicino ai cantieri;
- in caso di fitta nebbia, forte pioggia o nevicata intense.

Il Consiglio Europeo per la Sicurezza dei Trasporti (ETSC) ha evidenziato altre problematiche relative all'installazione di questo tipo di dispositivi sui veicoli, quali [78]:

- la possibilità per i costruttori automobilistici di installare dei sistemi in grado di avvisare i conducenti solo dopo aver superato i limiti di velocità, al posto di dispositivi che mantengono la velocità dei veicoli al di sotto del limite, agendo sulle prestazioni del motore;
- il rischio che i sistemi ISA possano identificare dei limiti di velocità errati;
- la possibilità per i conducenti di disattivare troppo facilmente i dispositivi ISA, riducendo quindi la loro efficacia.

2.1.3 Esempi di applicazione

I sistemi ISA sono stati testati in vari paesi europei, come Olanda, Danimarca, Svezia, Belgio, Spagna, Ungheria, Regno Unito e Francia, e in Australia. In seguito ai test svolti, nell'ambito del programma "Vision Zero", che ha l'obiettivo di ridurre a zero le vittime della strada entro il 2050, l'Unione Europea ha approvato nel 2019 il Regolamento Generale sulla Sicurezza (GSR), il quale prevede l'obbligo di installazione dei sistemi ISA, insieme ad altri dispositivi di sicurezza, su tutti i veicoli di nuova omologazione a partire dal 6 Luglio 2022 e su tutte le nuove auto che saranno vendute a partire da Luglio 2024 [79].

I dispositivi di adattamento intelligente della velocità saranno resi obbligatori anche in Svizzera e Norvegia [80].

2.2 Frenata automatica di emergenza (AEB)

2.2.1 Descrizione

Il sistema di frenata automatica di emergenza, conosciuto in inglese come l'AEB - *Autonomous Emergency Braking*, appartenente al gruppo dei sistemi ADAS - *Advanced Driver Assistance Systems*, è un dispositivo installato a bordo dei veicoli, in grado di evitare una collisione con un pedone, un ciclista o un altro veicolo oppure di mitigarne le conseguenze, azionando automaticamente i freni [81]. Il compito principale del sistema AEB, infatti, è di monitorare lo spazio circostante al veicolo e rilevare gli ostacoli sul suo percorso. Il sistema è progettato per prevenire o ridurre la gravità delle collisioni

frontali con veicoli in sosta o in movimento, con pedoni e ciclisti che si muovono nella stessa corsia e nella stessa direzione o che arrivano dalla direzione opposta o di lato rispetto al veicolo [82].

Il sistema agisce in due modi:

1. quando vi è il pericolo imminente di urtare un pedone, un ciclista o un altro veicolo, il conducente viene avvisato tramite una spia luminosa sul cruscotto e un segnale acustico;
2. se il conducente non interviene per evitare la collisione, si attiva automaticamente la frenata d'emergenza che arresta il veicolo.



Figura 28 - AEB. Fonte: www.fleetmagazine.com

Questo dispositivo funziona tramite diversi sensori montati a bordo del veicolo:

- una serie di telecamere posizionate nella parte superiore del parabrezza;
- dei sensori radar montati sia sulla parte anteriore del veicolo, in corrispondenza della griglia del radiatore, sia su quella posteriore, in corrispondenza del paraurti;
- dei sensori laser, chiamati LIDAR - *Light Detection And Ranging*⁵, installati sulla zona superiore del parabrezza che sono in grado di calcolare la distanza da un oggetto tramite l'emissione di raggi laser.

Il sistema, inoltre, acquisisce informazioni e dati relativi al comportamento del conducente tramite:

- un sensore di posizione del comando dell'acceleratore;
- un sensore di posizione del pedale del freno o un sensore di pressione del circuito idraulico dei freni;
- un sensore dell'angolo di sterzata;
- la centralina di controllo ESP [83].

⁵ Le case automobilistiche stanno investendo sempre di più sull'installazione di sistemi avanzati di assistenza alla guida (ADAS) a bordo dei propri veicoli, ovvero di sensori per il mantenimento della traiettoria, il rilevamento di angoli morti durante il sorpasso, la frenata automatica di emergenza, il rilevamento dei pedoni e tanti altri sistemi che possano aumentare gli standard di sicurezza alla guida. Il dispositivo che è alla base del funzionamento di molti ADAS è il LiDaR - *Light Detection and Ranging*, uno strumento che, grazie ad impulsi laser, è in grado di mappare tutti gli ostacoli al moto della vettura. Il principio di funzionamento del LiDaR è di facile comprensione e del tutto simile a quello del radar: un sensore emette un laser a lunghezza d'onda nota in un istante prefissato. Un altro sensore cattura l'onda riflessa e, calcolando il *time-of-flight*, si può misurare la distanza dell'oggetto colpito dal laser incidente generato dal sensore di partenza. Utilizzando radiazioni elettromagnetiche con una lunghezza d'onda tipicamente di 905 o 1500 nm, si è in grado di acquisire immagini d'ottima risoluzione, a patto che gli impulsi vengano generati a frequenze dell'ordine dei MHz. Da un punto di vista elettronico questo si traduce nella necessità di un circuito in grado di pilotare/gestire un'elevata potenza istantanea (corrente), grazie all'elevata velocità del sistema su comunicazione che utilizza collegamenti telematici temporanei, permettendo lo scambio di informazioni tra utenti grazie a stazioni intermedie (*switching* celere). Tale richiesta può essere soddisfatta grazie all'implementazione di driver mediante tecnologia al nitruro di gallio (GaN). I transistor in GaN risultano molto più adatti e performanti dei MOSFET al Silicio, quindi preferibili e preferiti in questo campo di applicazioni.

Il dispositivo della frenata automatica di emergenza opera in un range di velocità compreso tra 5 e 250 km/h e l'intervento del sistema può essere interrotto premendo il pedale dell'acceleratore o muovendo con decisione il volante [82].

2.2.2 Vantaggi e svantaggi

Numerosi studi hanno confermato l'elevata efficacia dei dispositivi di frenata di emergenza AEB nel ridurre il rischio di incidenti stradali che vedono coinvolti pedoni e ciclisti, contribuendo a rendere le strade più sicure. Secondo i dati riportati dall'IIHS - *Insurance Institute for Highway Safety*, un veicolo dotato del sistema AEB ha il 27% in meno di possibilità di essere coinvolto in un incidente con pedoni, mentre gli incidenti con lesioni calerebbero addirittura del 30% [84]. Il sistema AEB si rivela essere molto efficace anche nella riduzione degli incidenti che coinvolgono i ciclisti. Il suo impiego, infatti, porterebbe a [82]:

- una riduzione percentuale degli incidenti fatali compresa tra un minimo del 35% e un massimo del 49%;
- una riduzione percentuale degli incidenti con lesioni gravi compresa tra un minimo del 14% e un massimo del 54%;
- una riduzione percentuale degli incidenti con lesioni meno gravi compresa tra un minimo dell'11% e un massimo del 42%.

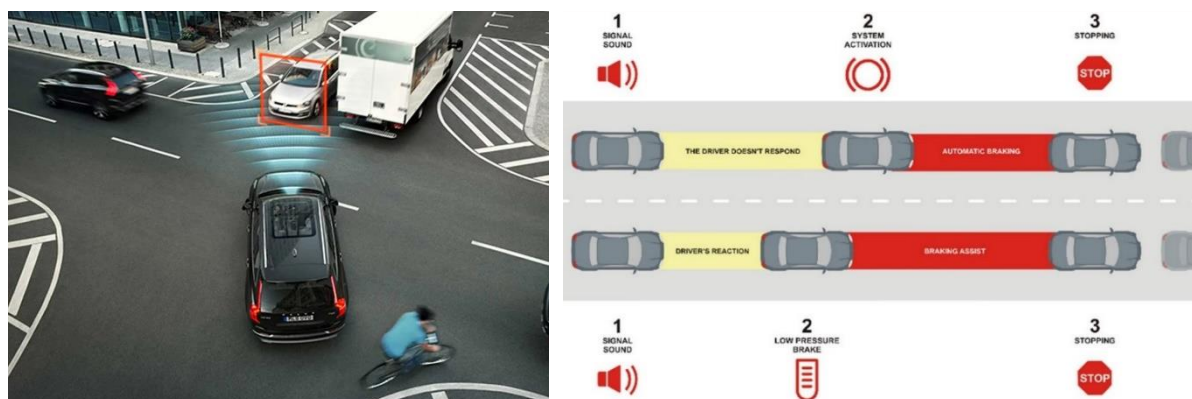


Figura 29 - A sinistra Frenata d'emergenza automatica; a destra Principio di funzionamento del sistema AEB. Fonte: www.fleetmagazine.com; Ucińska, Monika and Pełka, Małgorzata. "The effectiveness of the AEB system in the context of the safety of vulnerable road users" *Open Engineering*, vol. 11, no. 1, 2021.

Nel caso, invece, degli incidenti che riguardano il tamponamento tra due o più veicoli, i dispositivi AEB sono in grado di ridurli del 38% [85].

Tuttavia, va considerato che l'efficacia dei sistemi di frenata di emergenza dipende notevolmente dalla velocità del veicolo: a una velocità compresa tra 10 e 30 km/h i dispositivi AEB sono in grado di fermare completamente il veicolo davanti a un ostacolo, mentre, a velocità superiori, il sistema è capace solamente di ridurre gli effetti della collisione, riducendo la velocità. Questo dispositivo, infatti, è stato sviluppato per basse velocità e in molti modelli di veicoli il sistema AEB nemmeno interviene a velocità che superano i 100 km/h. Il sistema potrebbe non funzionare anche quando si affrontano curve strette e interviene il controllo elettronico della stabilità [82]. Inoltre, l'efficacia dei dispositivi AEB diminuisce notevolmente nelle ore notturne su strade prive di illuminazione. In queste condizioni, il rischio di incidenti risulta pari sia per i veicoli dotati del sistema AEB, sia per quelli che non lo montano [84].

Analisi delle nuove tecnologie
per il miglioramento della sicurezza stradale

Anche la presenza di condizioni climatiche avverse e la sporcizia dei sensori e delle telecamere si rilevano essere dei problemi per il corretto funzionamento di questa tecnologia [83].

2.2.3 Esempi di applicazione

Nel 2019, in seguito all'approvazione da parte dell'Unione Europea del Regolamento Generale sulla Sicurezza (GSR), l'installazione dei dispositivi di frenata automatica di emergenza AEB è diventata obbligatoria su tutti i veicoli di nuova omologazione a partire dal 6 Luglio 2022 e su tutte le nuove auto che saranno vendute a partire da Luglio 2024 [79].

2.3 LSS - Lane Support Systems

2.3.1 Descrizione

Gli LSS, acronimo di *Lane Support Systems*, rappresentano un gruppo di dispositivi di sicurezza sempre più diffusi, che rientrano nella categoria dei sistemi di assistenza alla guida avanzati ADAS - *Advanced Driver Assistance Systems*, progettati e sviluppati con lo scopo di mantenere i veicoli sulla traiettoria ideale, all'interno della propria corsia di marcia. I sistemi LSS sono in grado di rilevare e riconoscere la segnaletica stradale orizzontale presente sulla strada, comprese le linee continue e tratteggiate, individuando la corsia di marcia percorsa dal veicolo. Quando la vettura tende a divergere dalla traiettoria ideale, dando l'idea ai sensori installati sul veicolo che si stia verificando un'uscita non segnalata dalla corsia, il sistema interviene prontamente. Alcuni sistemi avvisano semplicemente il conducente con un segnale acustico o con una vibrazione del volante o del sedile, altri sono in grado anche di intervenire attivamente, inviando input allo sterzo e all'impianto frenante, per riportare il veicolo sulla traiettoria corretta, al centro della sua corsia [86]. Esistono, inoltre, sistemi LSS dotati della tecnologia di rilevamento del bordo stradale, capaci di intraprendere azioni correttive per evitare che il veicolo esca fuori strada.

La tipologia più semplice di sistema LSS è comunemente nota come LDW - *Lane Departure Warning*. Questi dispositivi utilizzano generalmente una telecamera rivolta in avanti e montata dietro il parabrezza. La telecamera è collegata a un computer che utilizza algoritmi di *machine learning* per riconoscere le linee continue e tratteggiate che delimitano la corsia di marcia percorsa dal veicolo. Se il sistema rileva che il veicolo sta uscendo dalla sua corsia, viene emesso un segnale acustico per avvisare il conducente, senza però intraprendere alcuna azione correttiva. Il conducente può anche essere avvisato tramite la vibrazione del volante o del sedile.

Un altro tipo di sistema LSS è il LKA - *Lane Keeping Assist*, basato sulle funzionalità caratteristiche dei sistemi LDW. In questo caso, oltre a fornire avvisi sensoriali per avvertire il conducente sull'uscita del veicolo dalla propria corsia, i dispositivi LKA sono integrati con il servosterzo o col sistema ESP, potendo quindi intervenire attivamente per riportare il veicolo sulla traiettoria ideale. Questo avviene attivando i freni su una delle ruote anteriori oppure agendo direttamente sul motore elettrico del servosterzo.

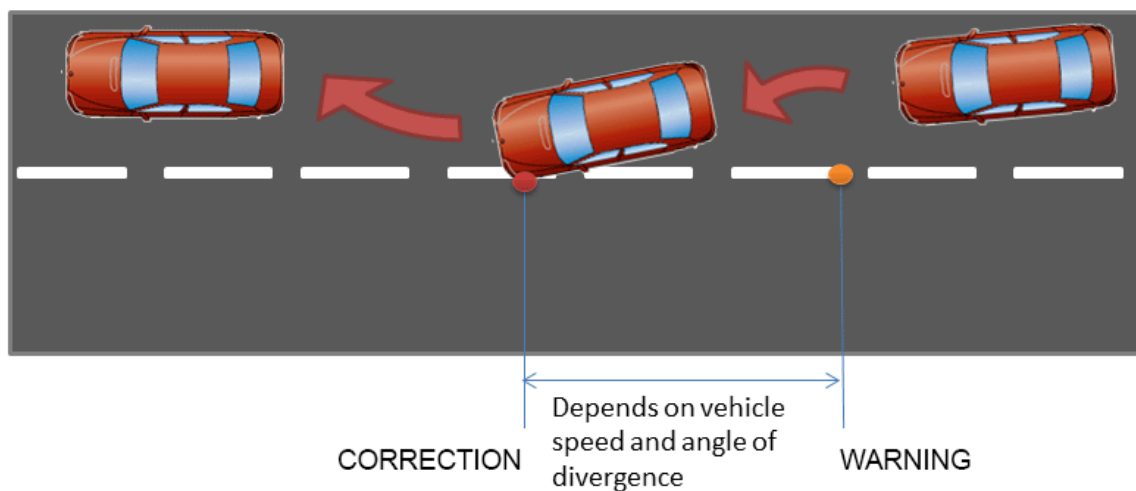


Figura 30 - Principio di funzionamento del sistema LKA. Fonte: www.carexpert.com.au

Un sistema LKA più avanzato è l'ELK - *Emergency Lane Keeping*, che interviene in situazioni più critiche e può anche utilizzare sensori radar installati attorno al veicolo. L'ELK, generalmente, agisce sullo sterzo in maniera più aggressiva nelle situazioni in cui il rischio di incidente è elevato, compresi i casi in cui il veicolo rischia di uscire fuori strada, grazie alla presenza di sensori che riconoscono i bordi della strada, o quando il veicolo sta per deviare nel traffico in sorpasso sulla corsia adiacente o in arrivo nella direzione opposta, grazie ai sensori radar presenti sul veicolo.

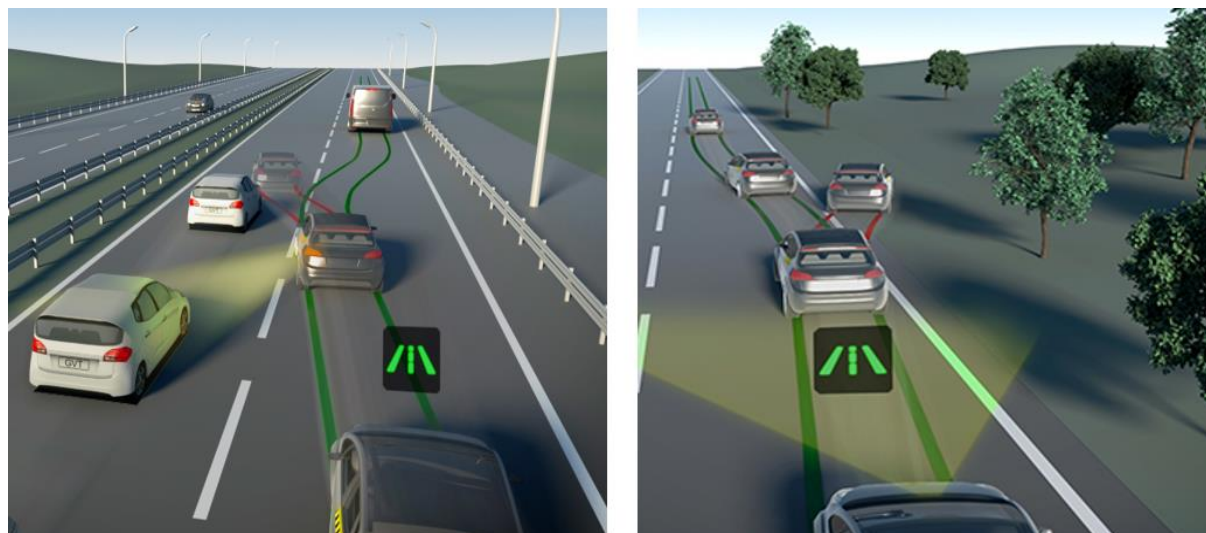


Figura 31 - Principio di funzionamento del sistema ELK. Fonte: www.carexpert.com.au

Un dispositivo LSS più recente è il *Lane Centering Assist (LCA)*⁶. A differenza degli altri sistemi, nei quali viene impedito al veicolo di lasciare la sua corsia, riducendo così il rischio di incidente, il dispositivo LCA funziona in modo tale da mantenere il veicolo posizionato sempre al centro della sua corsia di marcia.

⁶ O semplicemente Lane Assist. Il Front Assist, invece, può rilevare una potenziale collisione con un altro veicolo o con un pedone davanti, agendo automaticamente sui freni se necessario.

Le velocità alle quali i sistemi LSS sono operativi variano in base allo specifico modello di auto e alla funzionalità del sistema stesso; tuttavia, la maggior parte degli LSS non funziona a velocità inferiori a 50 km/h. Questi dispositivi, inoltre, si disattivano quando il conducente segnala tramite gli indicatori di direzione il cambio di corsia [87].

2.3.2 Vantaggi e svantaggi

I sistemi LSS concorrono nel loro complesso a migliorare la sicurezza stradale e a ridurre il rischio di incidenti. Infatti, l'invasione di un'altra corsia e lo sbandamento sono tra le principali cause di incidenti stradali e la funzione dei sistemi di mantenimento della corsia attuali è proprio quella di prevenire qualsiasi rischio di collisione, avvertendo il conducente del veicolo o intervenendo esso stesso per riportare il veicolo sulla traiettoria ideale. Questi dispositivi si rivelano molto utili e convenienti soprattutto se si viaggia spesso in autostrada e per lunghi periodi di tempo, ovvero nelle situazioni in cui è più facile avvertire la stanchezza o perdere la concentrazione alla guida [88]. Tuttavia, essendo sistemi basati sull'impiego di telecamera, gli LSS disponibili oggi sono tutt'altro che infallibili. Infatti, potrebbero non funzionare in condizioni meteorologiche avverse, come in presenza di pioggia battente, nebbia o anche in pieno sole, il quale potrebbe abbagliare la telecamera frontale montata sul parabrezza. Un altro problema consiste nel fatto che, se le linee di demarcazione della corsia sulla strada sono sbiadite o coperte di fango, polvere, neve o ghiaccio, o la telecamera installata sul parabrezza è sporca, i sistemi LSS non funzionano correttamente [87]. Infine, in certe situazioni, i sistemi di mantenimento della traiettoria possono agire troppo bruscamente, andando ad aumentare il rischio di avere una collisione [88].

2.3.3 Esempi di applicazione

Il primo sistema di mantenimento della corsia è stato installato in un'auto nel 1992 dalla Mitsubishi, che però non lo ha successivamente esportato all'estero. In Europa, il sistema LSS è stato adottato per la prima volta nel 2000, a bordo del Mercedes Actros, mentre sulle auto vere e proprie il sistema ha debuttato nel 2005, a bordo dei modelli Citroën. Si trattava ancora di un sistema molto semplice, che non era in grado di intervenire sullo sterzo o sull'impianto frenante. La sua funzione essenziale era quella di segnalare all'automobilista lo spostamento della direzione di marcia, avvalendosi di sensori montati sotto il paraurti, in grado di segnalare il problema quando la ruota era già sulla linea di demarcazione della corsia. Spettava quindi all'automobilista correggere la traiettoria del veicolo. Il primo dispositivo capace di correggere la traiettoria del veicolo in automatico risale al 2013, mentre nel 2015 è stato adottato da tutte le case automobilistiche. In seguito all'approvazione da parte dell'Unione Europea del Regolamento Generale sulla Sicurezza (GSR), i dispositivi LSS sono diventati obbligatori a partire dal 6 Luglio 2022 su tutte le auto di nuova immatricolazione, mentre da Luglio 2024 l'obbligo vigerà anche sulle auto di prima immatricolazione [88].

2.4 Sistema di monitoraggio degli angoli ciechi (BSM)

2.4.1 Descrizione

Il sistema di monitoraggio degli angoli ciechi di un veicolo, noto anche come BSM - *Blind Spot Monitoring*, appartenente al gruppo dei sistemi di assistenza alla guida avanzati (ADAS)⁷, è un dispositivo progettato per aumentare la sicurezza stradale, in grado di avvisare il conducente della presenza di veicoli, ciclisti e pedoni in corrispondenza dei punti ciechi. I punti ciechi di un veicolo, noti anche come angoli ciechi o morti, sono zone inaccessibili al campo visivo del conducente. Essi possono dipendere dal tipo del veicolo, ma i più evidenti sono la zona dei lati posteriori e quella dietro i montanti del parabrezza. L'angolo cieco è quindi una porzione dello spazio circostante il veicolo che risulta invisibile negli specchietti retrovisori [89].

I dispositivi BSM utilizzano dei sensori radar o a ultrasuoni, installati all'interno del paraurti posteriore su entrambi i lati, e delle telecamere montate sui supporti degli specchietti retrovisori laterali che rilevano la presenza di altri veicoli, ciclisti e pedoni nelle aree monitorate. Il sistema BSM si attiva al di sopra di una certa velocità (10-15 km/h) e quando un veicolo in transito, un ciclista o un pedone entra in un angolo cieco, monitorato dai sensori e dalle telecamere, emette un segnale per avvertire il conducente. Solitamente il sistema invia un segnale luminoso, sotto forma di spia lampeggiante, posta nello specchietto retrovisore o sul quadro del cruscotto. Il segnale visivo è spesso accompagnato da un avviso acustico, sotto forma di segnale sonoro ripetuto. Alcuni dispositivi BSM avvisano il conducente della presenza di veicoli, ciclisti o pedoni in un angolo cieco anche tramite la vibrazione del volante o del sedile, indipendentemente dall'impiego degli indicatori di direzione per indicare l'intenzione di svoltare o cambiare corsia.

Sono anche presenti sistemi BSM più sofisticati, che sono in grado di intervenire attivamente per evitare una collisione, agendo sullo sterzo e sull'impianto frenante del veicolo. Tuttavia, in questo caso, il conducente mantiene il controllo assoluto del mezzo e può disattivare l'intervento attivo del sistema. Dispositivi BSM ancora più recenti utilizzano la tecnologia delle telecamere per fornire al conducente il video che mostra il lato del veicolo, l'angolo cieco e la corsia adiacente, quando vengono azionati gli indicatori di direzione per segnalare l'intenzione di cambiare corsia [90].

⁷ Cfr. N. II.

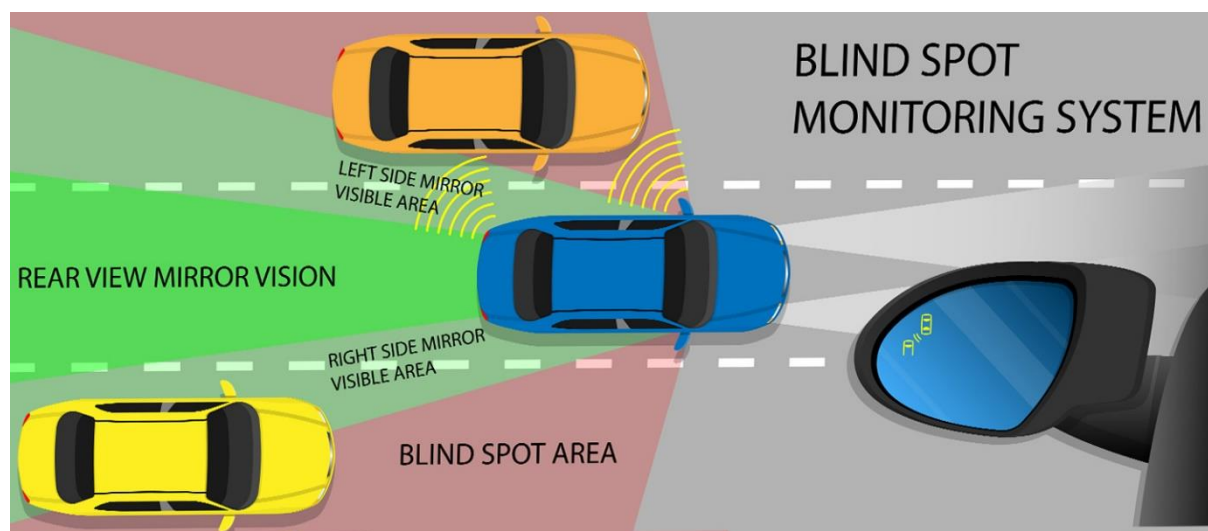


Figura 32 - Angoli ciechi di un veicolo ed esempio di segnale visivo inviato dal BSM. Fonte: www.dubizzle.com.

2.4.2 Vantaggi e svantaggi

I sistemi di monitoraggio degli angoli ciechi aiutano ad evitare potenziali incidenti con mezzi pesanti, auto, ciclisti e pedoni, che sopraggiungono da dietro, rimanendo fuori dal campo visivo dell'automobilista. Secondo i dati riportati dall'IIHS - *Insurance Institute for Highway Safety*, infatti, i dispositivi BSM sono in grado di ridurre del 14% gli incidenti che si verificano in seguito al cambio di corsia e del 23% gli infortuni causati da questa tipologia di incidente [91].

Nonostante la loro efficacia ed affidabilità, i sistemi BSM presentano anche alcuni problemi e svantaggi. Infatti:

- il loro utilizzo è ideale nelle autostrade, dove le velocità sono più elevate, mentre la loro utilità ed efficacia può essere limitata nelle strade urbane;
- non sempre sono in grado di rilevare la presenza negli angoli ciechi di veicoli con un'andatura significativamente più veloce;
- i sensori installati nel paraurti posteriore e le lenti delle telecamere montate sui supporti degli specchietti retrovisori devono essere tenuti puliti e liberi da ostacoli, altrimenti il sistema non funzionerà correttamente;
- i sistemi BMS non sempre riconoscono i motocicli e gli altri oggetti di dimensioni simili presenti sulla strada.

Va sempre tenuto in considerazione che i dispositivi BMS rappresentano solamente un aiuto nella guida e che il conducente del veicolo è l'unico responsabile per una guida sicura [90].

2.4.3 Esempi di applicazione

I sistemi di monitoraggio degli angoli ciechi sono stati ormai adottati dalla maggior parte dei costruttori di auto e sono diventati obbligatori a partire dal 6 Luglio 2022, insieme agli altri dispositivi di sicurezza ADAS, su tutte le auto, i furgoni e i mezzi pesanti di nuova omologazione, e dal 2024 anche per i veicoli già in circolazione [92].



Figura 33 - Il BSM, sistema solutorio del problema dell'angolo cieco. Fonte: <https://lcpshop.net>.

2.5 TSR - Traffic Sign Recognition

2.5.1 Descrizione

Il sistema di rilevamento della segnaletica stradale, in inglese conosciuto come TSR - *Traffic Sign Recognition*, fa parte dei sistemi di assistenza alla guida avanzati (ADAS), presenti sui veicoli di ultima generazione, ed è un dispositivo in grado di riconoscere le informazioni contenute nei cartelli stradali e di riportarle al conducente del veicolo sul display del quadro strumenti e sullo schermo dell'infotainment [93].

Il sistema TSR funziona grazie a una telecamera frontale, installata sul parabrezza, subito dietro lo specchietto retrovisore interno, che scansiona tutta la porzione di strada di fronte al veicolo. Le immagini così raccolte vengono poi esaminate continuamente e in tempo reale da un software di intelligenza artificiale, il quale, istruito mediante specifici algoritmi, riesce a riconoscere i cartelli stradali e a classificare le informazioni in essi contenute [94]. I dati raccolti vengono poi confrontati con le informazioni del sistema di navigazione e, successivamente, riportati al conducente del veicolo sul display del quadro strumenti o sullo schermo dell'*infotainment*, sotto forma di un'icona o di una rappresentazione grafica del segnale stradale rilevato. Il sistema, inoltre, è in grado di avvertire il conducente con un allarme sonoro e visivo, nel caso in cui le indicazioni dei segnali non vengano rispettate.

La maggior parte dei sistemi TSR è capace di identificare i segnali stradali relativi ai limiti di velocità, ai divieti di accesso e di sorpasso, i segnali di stop e quelli provvisori presenti in prossimità dei cantieri, mentre i dispositivi più sofisticati sono in grado di riconoscere anche altri tipi di cartelli [95]. Alcuni dispositivi di rilevamento della segnaletica stradale, inoltre, funzionano in combinazione con l'ACC, *Adaptive Cruise Control*, che viene impostato per mantenere sempre una velocità inferiore ai limiti di velocità rilevati⁸, lungo il percorso dal sistema TSR: se, ad esempio, un'autovettura procede con il

⁸ Regolandola, si da mantenere sempre una distanza di sicurezza.

cruise control attivo e la velocità impostata è superiore al nuovo limite, il sistema adatterà automaticamente la velocità della vettura per rispettare il segnale stradale [96].

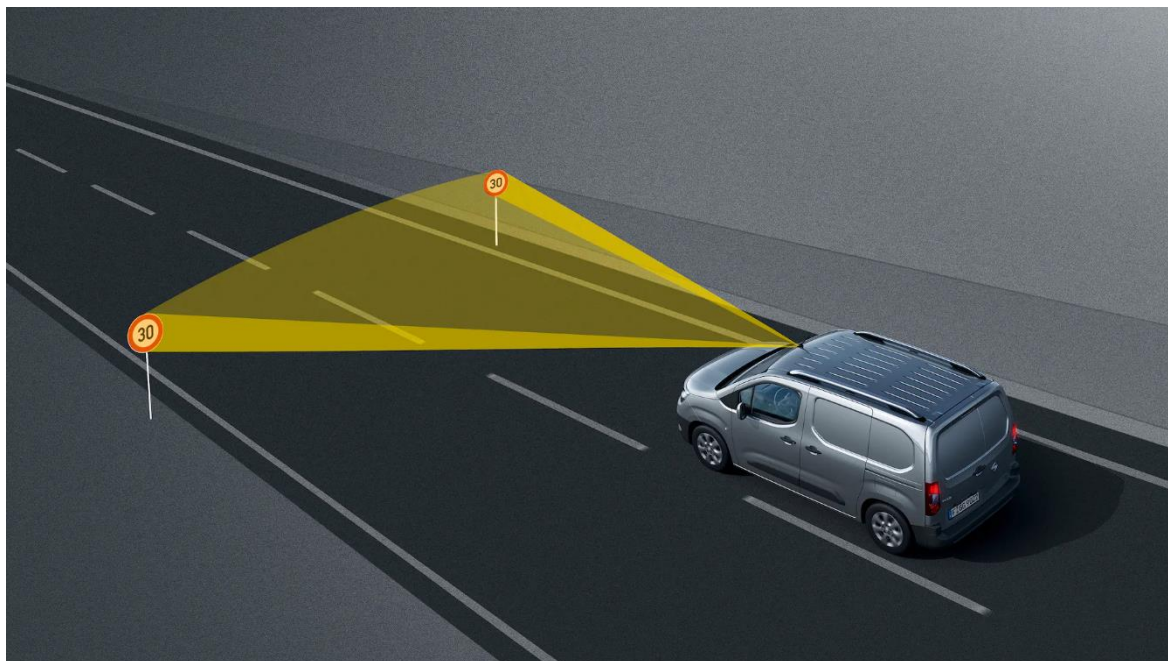


Figura 34 - Sistema di rilevamento della segnaletica stradale (TSR). Fonte: www.openpr.com

2.5.2 Vantaggi e svantaggi

I sistemi di rilevamento della segnaletica stradale tengono informati al meglio i conducenti sulle indicazioni fornite dai cartelli stradali presenti sul percorso, specialmente quelle relative ai limiti di velocità, ai divieti di accesso e di sorpasso, aumentando di conseguenza la sicurezza stradale e riducendo il rischio di incidenti causati dal mancato rispetto della segnaletica verticale [97].

Tuttavia, l'attuale tecnologia dei dispositivi TSR non è ancora in grado di riconoscere tutti i segnali stradali in qualsiasi condizione. Esistono, infatti, diverse circostanze che limitano notevolmente l'efficacia di questi sistemi, tra cui:

- scarsa visibilità in presenza di condizioni climatiche avverse, come pioggia intensa, nebbia e neve;
- fari sporchi o regolati male;
- parabrezza appannato;
- cartelli stradali sbiaditi, rovinati e deformati;
- inclinazione del veicolo dovuta a un carico pesante [95].

Ad oggi, il sistema di rilevamento della segnaletica stradale si rivela essere solamente un dispositivo di assistenza alla guida, sul quale i conducenti non devono fare completamente affidamento per una guida sicura.

2.5.3 Esempi di applicazione

La prima automobile dotata della tecnologia di rilevamento della segnaletica stradale TSR è stata la Opel Insignia, nel 2008. L'anno seguente il sistema TSR ha fatto la sua comparsa sulla BMW Serie 7 e sulla Mercedes Classe S. In seguito, questa tecnologia è stata pian piano adottata da tanti altri

produttori, a partire da Volvo, Volkswagen e Saab [94]. Con l'approvazione da parte dell'Unione Europea del Regolamento Generale sulla Sicurezza (GSR), avvenuta nel 2019, i dispositivi di rilevamento della segnaletica stradale, così come gli altri sistemi di sicurezza ADAS, sono diventati obbligatori a partire dal 6 Luglio 2022 su tutte le auto di nuova immatricolazione, mentre da luglio 2024 diventeranno obbligatori anche sulle auto di prima immatricolazione. Nella Tabella 3 vengono riportati i costi per un singolo veicolo dei sistemi installati a bordo appena descritti, facendo riferimento a uno studio dell'Università del Texas a Austin [98]. I costi vengono stimati su un arco temporale di 25 anni, considerando un tasso di riduzione annuale del costo pari al 5%.

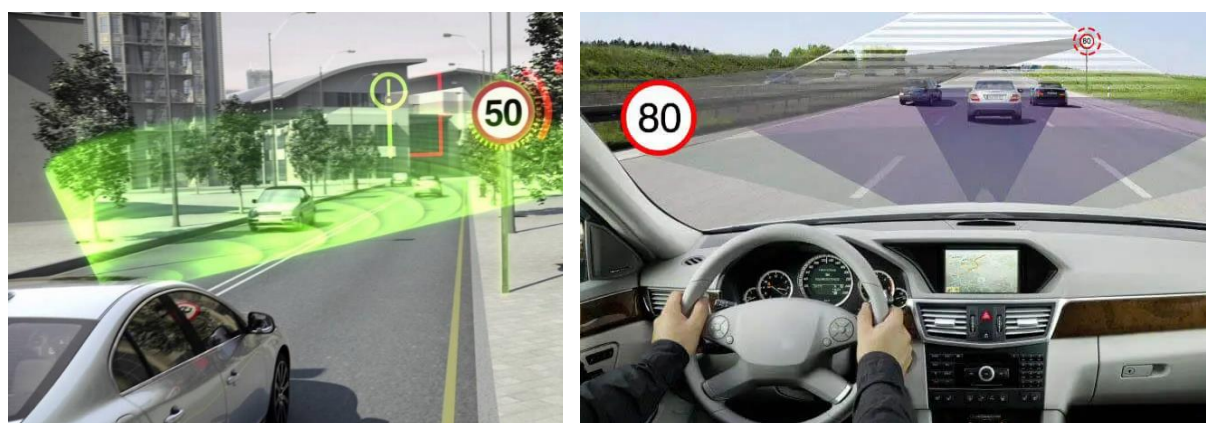


Figura 35 - Funzionamento sistema TSR. Fonte: www.dealerlink.it; www.eetindia.co.in.

Tabella 3 - Costi dei sistemi basati sul veicolo e che comunicano con l'infrastruttura.

Tecnologia	2020	2025	2030	2035	2040	2045
Intelligent Speed Adaptation (ISA)	\$310	\$240	\$185	\$143	\$111	\$86
Autonomous Emergency Braking (AEB)	\$348	\$269	\$209	\$161	\$125	\$97
Lane Support Systems (LSS)	\$735	\$569	\$440	\$341	\$264	\$204
Blind Spot Monitoring System (BSM)	\$310	\$240	\$185	\$143	\$111	\$86
Traffic Sign Recognition (TSR)	\$348	\$269	\$209	\$161	\$125	\$97

2.6 Pedestrian protection system Bosch

2.6.1 Descrizione

I pedoni coinvolti in sinistri stradali vengono nella maggior parte dei casi investiti con la parte anteriore del veicolo. Essendo giustificabilmente divenuti più rigorosi, negli ultimi anni, i requisiti giuridici e i test di protezione dei consumatori per la protezione dei pedoni, ciò presenta notevoli sfide per le apparecchiature a sensore, che devono rilevare in modo affidabile un impatto tra il veicolo ed un pedone. Il sistema elettronico Bosch⁹ per la protezione antiurto dei pedoni è una soluzione economica

⁹ In riferimento alla nota industria tedesca, essa produce il *Pedestrian protection system*, integrabile ad altri apparati e dispositivi prodotti dalla stessa industria. Alla luce dei volumi di traffico stradale in costante aumento, i sistemi di assistenza permettono di aumentare la sicurezza stradale:

- permettendo di mantenere gli autoveicoli sulla loro traiettoria (i.e., all'interno della corsia);
- avvertendo il conducente circa la presenza di ostacoli nell'angolo cieco al momento del cambio corsia;

che soddisfa i requisiti legali per la protezione dei pedoni, permettendo alle dotazioni di bordo di prevedere e analizzare un incidente imminente, attivando in 5 secondi le opportune contromisure. Il sistema di protezione dei pedoni si compone di sensori periferici collocati nella parte anteriore del veicolo e dall'unità di controllo dell'airbag¹⁰, che “dialogano” con degli attuatori che possono, ad esempio, sollevare il cofano motore in una frazione di secondo: ciò consente di proteggere il pedone in modo più efficace, minimizzando il rischio di lesioni.

2.6.2 Vantaggi e svantaggi

I pedoni eventualmente investiti rischiano, dipendentemente dalla velocità iniziale del veicolo¹¹, minori lesioni, rispetto a conseguenze ben più gravi, quali la proiezione del corpo e l'impatto sul parabrezza della vettura. Il sistema contempla pure la frenatura automatica di emergenza¹² a beneficio degli utenti vulnerabili della strada, aiutando ad evitare collisioni, in particolare con ciclisti e pedoni. Il sistema è concepito per proteggere anche gli occupanti del veicolo.

Lo svantaggio è correlato alla velocità del veicolo, poiché l'apertura del cofano anteriore potrebbe proiettare il ciclista o il pedone a terra, provocando comunque gravi lesioni o addirittura il decesso.

-
- fornendo un supporto durante l'accesso e l'ingresso dal parcheggio;
 - contribuendo a mantenere la distanza di sicurezza.

per citare solo alcuni esempi. La tecnologia alla base di questi sistemi di assistenza alla guida è stata infatti perfezionata con lo sviluppo di nuove funzioni (quale l'alert utile a coloro che escano dall'abitacolo della vettura), ed i sensori garantiscono di verificare in tempo reale ed in modo sempre più preciso la situazione nell'ambiente circostante all'auto e l'interazione sempre più rapida ed efficiente di queste informazioni con, ad esempio, i sistemi frenanti e di sterzo garantendo non solo la guida rilassata e scevra da stress del conducente. La tendenza è quella di fare confluire le funzioni di assistenza multipla in unico sensore, come dimostrato dal citato alert all'uscita dall'auto. Così come il radar offre costantemente una visuale sopra la spalla, gli MRR, sensori radar a medio raggio monitorano la marcia della vettura, supportando il cambio corsia in autostrada, evitando che i conducenti commettano errori pericolosi in zona urbana. Tra questi la cattiva abitudine dei guidatori di uscire dall'auto parcheggiata senza guardare sopra la propria spalla, comportamento causa di pericolosi rischi di collisione tra ciclisti e gli sportelli delle auto. In tali frangenti, il dispositivo di alert per gli utenti dell'autovettura che vi stiano uscendo può rivelarsi di grande utilità. È una soluzione attiva per tutti gli sportelli delle auto, anche dopo diversi minuti che il quadro di accensione sia stato spento, e avverte le persone a bordo che escono dal veicolo senza prestare attenzione. I sensori montati sia a sinistra sia a destra, nella parte posteriore del veicolo, permettono il monitoraggio del traffico e rilevano la presenza di altri utenti della strada entro un raggio di 20 m, sia che si stiano avvicinando dal retro dell'auto, sia che si trovino già a lato o dietro l'auto, mettendo prontamente in guardia il guidatore prima che si aprano gli sportelli.

¹⁰ L'unità di controllo airbag è flessibile e scalabile con rispetto al numero di cicli di accensione e sensore interfaccia per sensori di crash periferici.

¹¹ Il sistema iBooster della Bosch, tuttavia, permette l'azionamento della massima frenata da una velocità iniziale di 40 km/h in appena 190 millisecondi, ovvero in meno di due battiti di ciglia.

¹² Il radar del sistema di frenata di emergenza o i sensori video rilevano una collisione imminente, rivestendo il ruolo di dispositivi di assistenza elettronica alla guida che, in caso di emergenza, reagiscono con maggiore prontezza rispetto a quanto possano fare le persone sia a bordo (conducente e passeggeri), sia esterne al veicolo (pedoni e ciclisti, ecc.), fornendo in particolare supporto all'autista nel momento di massima necessità e/o in un contesto di traffico urbano intenso: quello che permette l'arresto d'emergenza, è uno dei sistemi di assistenza più utili, in particolare quando sono coinvolti ciclisti e pedoni ovvero gli utenti della strada più vulnerabili, riducendo la distanza di frenata di alcuni centimetri cruciali. Il programma europeo di valutazione dei nuovi modelli di automobili o *Euro NCAP*, ha da tempo riconosciuto l'importanza dei sistemi di frenata di emergenza e, a partire dal 2018, i criteri di classificazione dell'organizzazione di protezione consumatori comprendono la frenata di emergenza connessa agli apparati di rilevamento ciclisti. I sistemi di frenata di emergenza con rilevamento pedoni sono stati integrati nel sistema di classificazione già dal 2016.

2.6.3 Immagini esemplificative

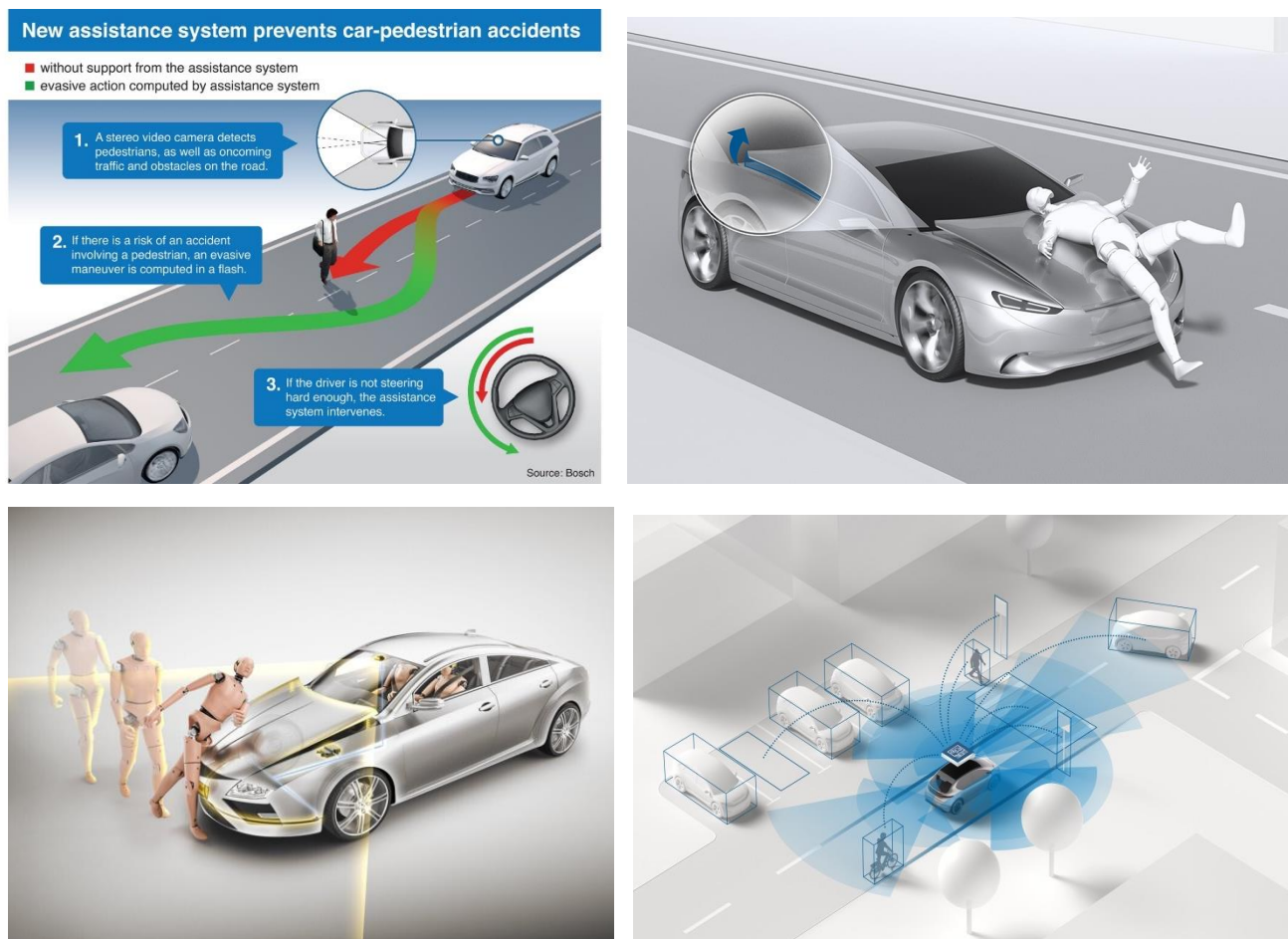


Figura 36 - Pedestrian protection system Bosch – A partire dall'angolo in alto a sinistra - <https://www.bosch-press.it/pressportal/be/en/press-release-594.html>; <https://www.drive.com.au/news/volvo-global-pedestrian-brake-demonstration-goes-bad/>; <https://www.linkedin.com/pulse/automotive-pedestrian-protection-systems-pps-market-report-vhanmane>; <https://www.safetywissen.com/object/A11/A11.sjy738811dz8xpy50nf34655n1sdaa63833218655/safetywissen?prev=%2Fnews%2FSAFETYNEWS%2F>

2.7 Fatigue detection

2.7.1 Descrizione

Il sistema permette di riconoscere le condizioni del conducente in merito al suo stato di affaticamento mediante la lettura oftalmica. La forma fisica del guidatore è monitorata analizzando attentamente il suo stato di veglia, attraverso un'integrazione di hardware e software. Il Gruppo Volkswagen utilizza:

- un sensore video, ovvero una telecamera, in grado di fornire un'immagine del conducente in tutte le condizioni di illuminazione e con una risoluzione sufficientemente nitida. Il software d'elaborazione delle immagini, facente parte della telecamera, identifica parametri come l'apertura della palpebra, la posizione della testa e lo sguardo;

- un algoritmo di previsione che stima la forma fisica del conducente in base ai dati sulla lettura oftalmica;
- una spia posizionata sul cruscotto che notifica la necessità di una pausa.

L'approccio del Gruppo Volkswagen consiste dunque nel trasferire questa capacità di valutazione a un sistema tecnico, che verifica se il conducente risulta vigile, monitorandone il volto e gli occhi per rilevare condizioni e movimenti che potrebbero risultare indicatori di stanchezza.

Il monitoraggio dello stato di veglia del conducente può essere considerato una misura di sicurezza attiva, poiché l'obiettivo è valutare preventivamente la sua situazione, aiutandolo a prendere decisioni migliori. Abbinato ad altri sistemi d'assistenza alla guida, come *Lane Assist* o *Forward Collision Warning*, il sistema può avvisare il conducente in modo più tempestivo, fornendogli la possibilità d'ottenere più tempo per reagire. *Fatigue Detection* è, in conclusione, un sistema progettato per aiutare i conducenti a gestire correttamente le proprie risorse fisiche e mentali quando sono al volante.

2.7.2 Vantaggi e svantaggi

Quando si è alla guida, l'errore umano è il principale fattore che causa i molti incidenti. Spesso si sbaglia ad interpretare le informazioni relative alla strada, nel processo decisionale o nell'esecuzione di un'azione, così come spesso è la scarsa attenzione dovuta a stanchezza o affaticamento che induce all'errore. Le risorse fisiche del conducente influenzano in maniera determinante le prestazioni alla guida: l'ADAS *Fatigue Detection* è stato concepito proprio per monitorare le condizioni del guidatore; si tratta di un assistente per rilevare la stanchezza del conducente e verificare che il veicolo venga guidato in tutta sicurezza. Gli svantaggi che la limitano sono costituiti dalle motivazioni cui siano riconducibili colpi di sonno, stati di incoscienza, disattenzione, ecc. del conducente, dovuti a malori, a stati di alterazione alcolica o all'assunzione di sostanze pericolose, ecc., che possano causare malfunzionamenti o riduzione delle funzionalità del sistema. Altri svantaggi possono essere costituiti da eventuali avarie.

2.7.3 Immagini esemplificative



Figura 37 - Fatigue detection system. Fonte: <https://myportservicesindia.com>; www.faststreamtech.com; www.carandbike.com

Capitolo 3 - Altri dispositivi

3.1 Digital twin dell'infrastruttura stradale

3.1.1 Descrizione

Il digital twin, o gemello digitale, può essere definito come una rappresentazione virtuale di un oggetto o di un sistema che copre il suo intero ciclo di vita ed è in grado di fornire dati in tempo reale, riguardanti le sue condizioni presenti e future. Il digital twin è costituito, fundamentalmente, da tre elementi [42]:

1. un bene fisico o un insieme di beni che interagiscono tra di loro nel mondo reale per garantire un servizio;
2. la rappresentazione virtuale dell'entità fisica, costruita tramite i dati, raccolti da sensori radar e telecamere ed elaborati tramite degli algoritmi;
3. un canale di comunicazione che consente un continuo scambio di dati tra l'entità del mondo reale e la sua rappresentazione virtuale, permettendo, in questo modo, di monitorare in tempo reale lo stato del bene fisico e di simulare eventuali scenari futuri.

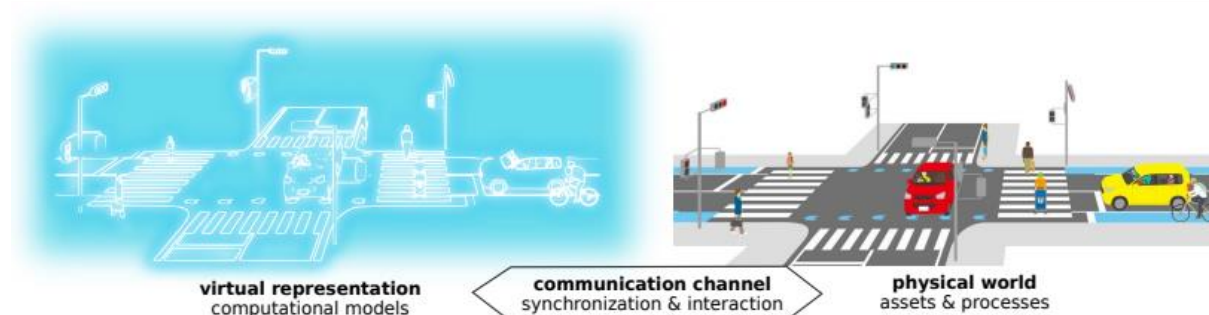


Figura 38 - Rappresentazione concettuale di un Digital Twin. Fonte: Víctor M. G. Martínez, Moises R. N. Ribeiro, Divanilson R. Campelo (2022). "Intelligent Road Intersections: A Case for Digital Twins"

Il digital twin di un'infrastruttura stradale è definito come la rappresentazione digitale dei componenti che la costituiscono e simula le interazioni tra di essi [43].

In questo caso, infatti, il digital twin è costituito dai modelli virtuali relativi a:

1. l'infrastruttura vera e propria, ovvero la strada, i semafori, la segnaletica stradale e i vari elementi presenti a bordo strada, ecc.;
2. tutti gli utenti della strada come veicoli, ciclisti e pedoni;
3. i flussi di traffico, tra cui i punti di partenza, di arrivo e i percorsi degli utenti della strada;
4. l'ambiente circostante, comprese le condizioni meteorologiche.

3.1.2 Vantaggi e svantaggi

Il digital twin di un'infrastruttura stradale permette di aggiornare in tempo reale il modello virtuale dell'entità fisica, in base ai dati raccolti dai sensori e dalle telecamere. Ciò permette al digital twin di poter essere utilizzato nella gestione del traffico. Infatti, combinando i modelli virtuali con i dati raccolti

sul traffico in tempo reale, si riesce a ottenere uno strumento efficace per ottimizzare e controllare il traffico e il trasporto. Ad esempio, se si verifica un incidente o sono presenti dei lavori in corso, il sistema è in grado di suggerire diverse opzioni, a seconda della criticità da risolvere, come la chiusura della strada o la deviazione. In questo modo si riducono gli impatti negativi sulla rete stradale, migliorando il flusso e la capacità del traffico, ma aiutando anche ad aumentare la sicurezza stradale e ridurre le emissioni dei veicoli [44]. Tramite il digital twin è anche possibile effettuare previsioni e simulare scenari relativi al traffico e a possibili incidenti e criticità che si possono presentare su un tratto di strada o su un incrocio, in modo da individuare in anticipo eventuali azioni correttive, volte a ridurre il rischio di incidenti e aumentare la sicurezza dell'infrastruttura stradale [43]. Inoltre, grazie all'utilizzo dei modelli virtuali del digital twin, che vengono costantemente aggiornati, è possibile monitorare lo stato dell'infrastruttura stradale, riducendo i costi e i tempi delle ispezioni e permettendo di programmare in anticipo gli interventi di manutenzione [42].

Il problema fondamentale di un digital twin è la possibile presenza dei falsi positivi e dei falsi negativi. Si è in presenza di un falso positivo quando un comportamento del gemello digitale non corrisponde ad uno del sistema reale. Si parla, invece, di falso negativo quando il modello non rileva e non riproduce un comportamento del sistema reale. Potenzialmente, un falso negativo è più pericoloso, in quanto non permette di individuare eventuali situazioni critiche [45]. Anche gli elevati costi rappresentano uno svantaggio dell'utilizzo dei digital twins, specialmente quelli connessi alla sensoristica per la raccolta dei dati e per i costanti aggiornamenti di sistema [46].

3.1.3 Esempi di applicazione

Nel 2021, la Società statale britannica *Highway England* ha annunciato il progetto per sviluppare un digital twin della rete stradale strategica del Regno Unito, per migliorare il monitoraggio delle infrastrutture stradali e la loro manutenzione, ridurre i tempi e i costi delle ispezioni in loco e ridurre le emissioni del 50% [39]. Un'altra città che ha investito sui digital twins è Singapore, che dal 2018 dispone di un modello digitale per aiutare gli spostamenti delle persone con mobilità ridotta grazie, per esempio, alla simulazione per eliminare le barriere architettoniche [43]. Il CNR ha sviluppato all'inizio del corrente decennio il gemello digitale di diverse città italiane, tra le quali quello di Matera.

3.2 Pesatura dinamica dei veicoli (WIM)

3.2.1 Descrizione

I sistemi di pesatura dinamica dei veicoli, conosciuti anche come WIM - *Weigh In Motion*, consentono di rilevare il peso dei mezzi in transito su un tratto stradale o su un ponte, senza che i veicoli si fermino e senza alcuna interruzione alla viabilità [9].

Il peso degli assi e il peso lordo del veicolo vengono misurati tramite dei sensori in fibra ottica o piezoelettrici, collocati al livello stradale. I sensori possono essere inseriti in piastre d'acciaio molto resistenti, installate sulla superficie stradale senza produrre rilievi significativi e in grado di flettersi sotto l'azione del carico in transito. In questo modo, al passaggio del mezzo pesante, i sensori all'interno della piastra meccanica rilevano la flessione massima al transito, misurando la deformazione proporzionale alla distanza dal punto di contatto [10]. I sensori possono anche essere

posizionati all'interno di nastri sottili, detti "strip", collocati all'interno di una scanalatura intagliata nell'asfalto, con una profondità di 2 o 3 cm.

I sensori rilevano il peso del veicolo quando questo ci passa sopra e i dati e le informazioni raccolte vengono poi inviate a una piattaforma di acquisizione ed elaborazione dati [9].



Figura 39 - Piastra meccanica collocata al livello stradale. Fonte: www.teknoiring.com.

Oltre alla pesatura in tempo reale dei veicoli in transito, il sistema WIM permette anche di [9]:

- monitorare i volumi di traffico;
- rilevare automaticamente i sovraccarichi dei veicoli generando eventi di allarme;
- identificare automaticamente carichi e sovraccarichi per fascia oraria, direzione di marcia e corsia di percorrenza;
- classificare i veicoli in transito per tipologia di mezzo, numero di assi, peso complessivo e sui singoli assi;
- acquisire dati sull'effettivo stato di usura delle infrastrutture stradali per poi programmare interventi di manutenzione.

3.2.2 Vantaggi e svantaggi

La pesatura dinamica è particolarmente utile negli snodi viari in cui circola una grande quantità di mezzi pesanti, che per le proprie caratteristiche possono mettere in pericolo la sicurezza stradale deteriorando le caratteristiche prestazionali dell'infrastruttura. I mezzi pesanti che superano i limiti di peso regolamentari possono infatti aumentare il rischio di incidenti e di danni alle infrastrutture. Infatti, uno dei vantaggi del sistema di pesatura dinamica è che permette di individuare in tempo reale eventuali pericoli derivanti dal transito di mezzi pesanti in sovraccarico. Il monitoraggio, inoltre, avviene mentre i veicoli sono in movimento, evitando così di rallentare il flusso del traffico.

Un altro vantaggio consiste nel fatto che, grazie al notevole numero di rilevazioni compiute su un determinato tratto viario, è possibile costruire un importante patrimonio informativo, utile a ridefinire le strategie di gestione e di manutenzione delle infrastrutture stradali. Inoltre, combinati con dispositivi per il riconoscimento automatico delle targhe, i sistemi WIM permettono di monitorare costantemente il traffico, aiutando a far rispettare il Codice della Strada e assicurando maggiori livelli di sicurezza per le infrastrutture e gli automobilisti.

La tecnologia della pesatura dinamica può inoltre essere inserita in sistemi per la riscossione di pedaggi diversificati in base al carico trasportato o per l'ispezione degli accessi in aree logistiche, dogane, stabilimenti industriali, siti di smaltimento rifiuti o scali marittimi, favorendo il controllo dei veicoli e delle merci in transito e il contrasto di eventuali illeciti.

Gli svantaggi connessi all'impiego dei sistemi di pesatura dinamica sono principalmente tre [11]:

- costi di installazione e manutenzione elevati;
- i carichi sugli assi del veicolo non sono costanti, ma dipendono dalla velocità e dal movimento delle sospensioni del veicolo;
- i conducenti dei mezzi pesanti in sovraccarico possono seguire percorsi alternativi per evitare i sistemi di pesatura dinamica, favorendo il danneggiamento delle infrastrutture presenti nelle strade alternative che spesso non sono adatte al transito di mezzi pesanti, mettendo quindi a rischio la sicurezza degli altri automobilisti.

I costi per i sensori adottati nei sistemi di pesatura dinamica, escludendo i costi di installazione, sono riportati nella Tabella 4. Per una strada a due corsie, i costi di installazione possono variare tra \$20500 e \$56500 [12].

Tabella 4 - Costi per i sensori impiegati per i sistemi WIM.

Tipo di sensore	Vita utile	Costo del sensore	Costi annui di sostituzione
Sensore piezoelettrico in polimero	2-3 anni	\$4000 - \$6400	\$4300
Sensore piezoelettrico in quarzo	3-5 anni	\$16000 - \$24000	\$10600
Estensimetro	3-5 anni	\$16000 - \$24000	\$10600
Piastra a flessione	6-8 anni	\$18000 - \$28000	\$7000
Cella di carico	10-12 anni	\$44000 - \$53000	\$9000

3.2.3 Esempi di applicazione

La tecnologia della pesatura dinamica dei veicoli è stata ad esempio adottata da Autostrade del Brennero S.p.A. per monitorare un tratto dell'autostrada A22 [9]. È anche in programma l'installazione e la sperimentazione di questo tipo di sistemi sull'autostrada A2, tra il km 0 e il km 7, e su altri nodi dell'infrastruttura stradale, che per caratteristiche altimetriche, ambientali o climatiche possono essere considerati critici [10]. Un sistema WIM è stato installato anche per monitorare in tempo reale il peso dei mezzi in transito sulle quattro corsie del nuovo ponte San Giorgio a Genova [13].

3.3 LETISmart, il bastone intelligente per non vedenti e ipovedenti

3.3.1 Descrizione

Il progetto e la sua applicazione concreta sono nati dalla costante osservazione delle difficoltà e dei rischi che le persone non vedenti o ipovedenti affrontano nel muoversi autonomamente nel contesto del traffico pedonale urbano, ambiente caratterizzato da inquinamento acustico (che limita l'orientamento), barriere architettoniche, ecc. Tutti questi fattori rivestono veri e propri rischi, impedendo ed insidiando la mobilità dei concittadini non vedenti o ipovedenti, obbligati dunque a scegliere percorsi alternativi, non sempre conosciuti: percorsi soggetti a condizioni di scarsa visibilità, specie nelle ore serali o notturne, con strade poco illuminate, dove il non vedente o l'ipovedente

rischiano di non essere visti o di essere investiti. *LetiSmart* è stato ideato dall'Ing. Marino Attini, Presidente della Sezione di Trieste dell'Unione Italiana dei Ciechi e degli Ipovedenti, esperto di multimedialità ed elettronica, ipovedente e da molti anni impegnato nella ricerca di soluzioni tecnologiche che possano agevolare ciechi e ipovedenti nella loro preziosa autonomia. Il sistema è stato progettato e sviluppato dalla SCEN S.r.l., azienda triestina che lavora da anni in tutto il mondo nel settore della microelettronica, tanto da essere considerata una delle aziende italiane più all'avanguardia nella miniaturizzazione elettronica. Il sistema è stato sviluppato con l'obiettivo di mettere a disposizione del non vedente, che utilizza il bastone bianco, una serie di funzioni aggiuntive di grande rilievo per la propria autonomia. La prima condizione che è stata esaminata riguarda l'esigenza di attraversare la strada, specialmente in condizioni di scarsa visibilità da parte dell'automobilista, che causa non pochi investimenti di cittadini ciechi o ipovedenti. Il frangente esaminato, unito ad altrettante numerose situazioni di difficoltà, hanno portato allo sviluppo della soluzione *LETIsmartLUCÉ*, prima soluzione al mondo che, senza alterare l'ergonomia e l'efficienza del bastone bianco (strumento di precisione), lo integra munendolo di una segnalazione luminosa a 360°, rivolta verso terra (per non disturbare l'utilizzatore ipovedente), basata sulla tecnologia LED, che s'attiva automaticamente in situazioni di scarsa luminosità, generando un fascio luminoso pulsante sul segmento superiore (vicino alla punta) del bastone.

Il cieco o l'ipovedente dotati di bastone bianco risulta così visibile da tutti gli altri pedoni e dai conducenti di veicoli (ciclisti, automobilisti, ecc.).

LETIsmartLUCÉ è un circuito piccolissimo, del peso di qualche grammo, nascosto nella parte terminale del bastone. Il tubolare che lo racchiude è realizzato in un particolare materiale polimerico che, oltre alla leggerezza, resiste ad urti, sollecitazioni ed intemperie. L'elevata luminosità, che si attiva automaticamente in particolari condizioni, unitamente alla tonalità bianca freddo ed alle tre pulsazioni al secondo, garantisce un alto livello di visibilità del cieco o dell'ipovedente da parte di tutti gli altri utenti della strada, appiedati o motorizzati, per la loro maggiore sicurezza. Il raggio di luce è uniforme ed un sensore digitale ad alte prestazioni, controllato da un microprocessore, permette di gestire il fascio luminoso in modo completamente automatizzato e di mantenerlo acceso anche se il bastone viene colpito dalla luce dei fari delle automobili. Un controllo della temporizzazione evita spegnimenti improvvisi quando si verificano cambiamenti di luce ambientale e garantisce lo spegnimento automatico quando il bastone viene ripiegato.

Il bastone luminoso è dotato di una microbatteria di alimentazione, facilmente sostituibile, che garantisce oltre 30 ore di operatività.

LETIsmartLUCÉ è stato testato e certificato dall'Unione Italiana dei Ciechi e degli Ipovedenti, dall'I.Ri.Fo.R. - Istituto per la Ricerca, la Formazione e la Riabilitazione nella disabilità visiva e da A.N.I.O.M.A.P. - Associazione Nazionale Istruttori Orientamento Mobilità Autonomia Personale.

Il progetto *LetiSmart* è evoluto in seguito nella realizzazione di *LETIsmartVOCE*, il primo dispositivo capace di fornire al non vedente e all'ipovedente tutte le informazioni vocali necessarie per muoversi in modo autonomo nell'ambiente urbano. *LETIsmartVOCE* rappresenta il primo dispositivo con un manico leggero ed ergonomico in grado di sostituire il bastone bianco convenzionale: risulta collegato via radio a una serie di segnalatori (radiofari, basati su tecnologia LORA), installati sui semafori, sui lampioni stradali, etc. e si può accendere premendo due semplici pulsanti. La voce sintetica viene amplificata tramite un altoparlante posto sulla parte superiore del manico, ma, all'occorrenza, la si può ascoltare collegando il bastone alle cuffie.

Analisi delle nuove tecnologie per il miglioramento della sicurezza stradale

I citati radiofari non richiedono necessariamente né l'allacciamento alla rete di alimentazione elettrica pubblica (ove possibile, tuttavia, rimane preferibile avere a disposizione un allacciamento elettrico per azzerarne la manutenzione), né a reti telematiche. Pertanto, i Comuni interessati a dotarsene non sono obbligati ad investire negli allacciamenti elettrici o cablaggi per il loro utilizzo: questa soluzione riduce al minimo i tempi di installazione, in quanto è sufficiente fissare i radiofari con un morsetto sui pali dei semafori, sul fusto dei lampioni, ecc.

Per quanto riguarda i bus, sono stati realizzati appositi radiofari di piccole dimensioni e certificati automotive collegati all'alimentazione e alla tabella elettronica anteriore del mezzo da dove prelevano in modo automatico l'informazione, normalmente visualizzata, del numero della linea di trasporto collettivo e del senso di marcia.



Figura 40 - In alto, il bastone bianco intelligente LetiSmart; al centro, Pedone ipovedente o non vedente dotato di bastone LetiSmart tra altri passanti che attraversano le strisce pedonali. Fonte: www.letismart.it

I radiofari per i negozi e per gli uffici riproducono il nome dell'esercizio, normalmente visibile, e sono allacciati all'alimentazione elettrica.

Alcuni radiofari indicano e guidano acusticamente il non vedente al pulsante dei semafori sonori: l'integrazione di questi specifici radiofari con il pulsante del bastone intelligente è stata eseguita in collaborazione con *La Semaforica*, ditta produttrice e fornitrice dei citati pulsanti.

3.3.2 Vantaggi e svantaggi

I vantaggi del sistema *Letsmart* sono prima di tutto sociali, garantendo l'autonomia del non vedente o dell'ipovedente; inoltre, basandosi sul funzionamento di radiofari che non necessitano né di allacciamento elettrico, né telematico, come riportato in descrizione, si tratta di un sistema soggetto a costi di installazione (eseguibile sfruttando i pali delle lanterne semaforiche, il fusto dei lampioni stradali, i pilastri della segnaletica verticale a cavallo della carreggiata, ecc.) e manutenzione molto contenuti: i suoi tempi di ammortamento risultano dunque molto celeri.

Il principale vantaggio del bastone intelligente per non vedenti e ipovedenti è rivestito dalla maggiore e più sicura autonomia che il dispositivo concede ai suoi possessori. Autonomia garantita anche dal principio che il citato bastone intelligente permette di attivare la chiamata semaforica pedonale senza necessità di premere il pulsante dell'impianto semaforico stesso. Il dispositivo permette inoltre di individuare la direzione dell'attraversamento, di dialogare con l'impianto, di conoscere la toponomastica, il numero della linea di trasporto collettivo della vettura ed il suo senso di marcia sulla quale l'utente cieco o ipovedente debba salire.

3.3.3 Esempi di applicazione

A Trieste, prima città su cui è stata installata la rete *LETISmart*, il Comune ha messo a disposizione i semafori e i pali della luce per utilizzarli come supporto per i radiofari ed evitare qualsiasi problema burocratico o amministrativo (quali l'installazione su edifici vincolati e non) generatosi durante la fase realizzativa di precedenti progetti. Altre città italiane hanno adottato il progetto dopo Trieste, tra le quali Torino e, in Lombardia, Como e Mantova.

Capitolo 4 - Tabella riassuntiva

La Tabella 5 riassume per ciascuna tecnologia analizzata una descrizione di sintesi. Inoltre, propone per punti i principali e rilevanti vantaggi e svantaggi caratterizzanti le singole tecnologie.

Tabella 5 - Tabella riepilogativa delle tecnologie innovative per la sicurezza stradale.

Tecnologia	Descrizione	Vantaggi	Svantaggi
Semafori intelligenti	Semafori dotati di sensori per la regolazione dei flussi di traffico alle intersezioni semaforizzate	Diminuzione della congestione Riduzione degli incidenti Riduzione dell'inquinamento	Problemi nel caso in cui un semaforo smette di funzionare
Segnaletica fotoluminescente	Segnaletica orizzontale realizzata con materiali fotoluminescenti	Miglioramento della visibilità Risparmio di energia	Scarsa visibilità con condizioni climatiche critiche
Guardrail intelligente "Andromeda"	Barriera composta da una griglia di acciaio zincato e da pannelli in PET	Riduzione dei rischi di lesioni per i motociclisti Miglioramento della visibilità	Costi elevati
Lampioni intelligenti	Lampade a LED dotate di sensori per il monitoraggio del traffico e la regolazione della luminosità	Risparmio di energia Riduzione del rischio di incidenti	Costi elevati Difficoltà di installazione
Sistema Head-up	Sistema di telecamere che monitora i comportamenti dei conducenti alla guida	Riduzione degli incidenti causati da comportamenti imprudenti dei conducenti	Costi elevati Problemi di privacy
Pavimentazione intelligente	Lastre prefabbricate in calcestruzzo dotate di accelerometri e sensori	Monitoraggio della strada Monitoraggio del traffico Facilità di manutenzione	Costi elevati Affidabilità dei sensori
Digital twin dell'infrastruttura	Rappresentazione virtuale di ogni componente dell'infrastruttura stradale	Migliore gestione del traffico Monitoraggio dell'infrastruttura	Costi elevati
Segnaletica luminosa "Flowell"	Pannelli installati sul manto stradale che inglobano luci a LED e sensori	Miglioramento della visibilità Ottimizzazione dello spazio urbano	Costi elevati Scarsa visibilità in certe condizioni
Pedone sicuro 2.0	Sistema costituito da telecamere e fotocellule che rileva e segnala la presenza di pedoni in prossimità dell'attraversamento pedonale	Miglioramento della sicurezza degli attraversamenti pedonali	-
Strisce luminose "Zebrabright"	Strisce pedonali realizzate con una vernice a base di metacrilato di metile (MMA)	Miglioramento della visibilità degli attraversamenti Basso costo	-
Strisce pedonali intelligenti	Sistema costituito da sensori di pressione che attivano l'illuminazione LED delle strisce	Miglioramento della visibilità dell'attraversamento Basso impatto energetico	Costi elevati
Strisce pedonali "Starling Crossing"	Strisce pedonali ottenute tramite dei pannelli a LED in grado di modificare il proprio aspetto (dimensioni, colore)	Miglioramento della visibilità dell'attraversamento Miglioramento della fluidità del traffico	Costi elevati
Air Crosswalk	Serie di strisce luminose poste sopra al di sopra della pavimentazione stradale	Miglioramento della visibilità e della sicurezza degli attraversamenti pedonali	-

Analisi delle nuove tecnologie
per il miglioramento della sicurezza stradale

Tecnologia	Descrizione	Vantaggi	Svantaggi
Segnaletica orizzontale "salvamotociclisti"	Strisce di lunghezza variabile perpendicolari alla linea di mezzzeria che delimitano l'area nella quale il busto e la testa del motociclista invaderebbero la corsia opposta	Riduzione degli incidenti in curva Bassi costi	Basso livello di aderenza delle strisce in determinate condizioni
Intelligent Speed Adaptation	Sistema basato su una serie di sensori in grado di regolare la velocità del veicolo in base alla segnaletica stradale riconosciuta da una videocamera	Riduzione della velocità dei veicoli Riduzione degli incidenti	Efficacia ridotta in determinate situazioni
Frenata automatica di emergenza	Dispositivo che monitora lo spazio circostante il veicolo e attiva automaticamente i freni per evitare collisioni con ostacoli	Riduzione degli incidenti	Efficacia ridotta in determinate situazioni
Lane Support Systems	Sistema in grado di leggere la segnaletica stradale orizzontale e di tenere il veicolo all'interno della propria corsia di marcia	Riduzione degli incidenti, specialmente quelli che si possono verificare in autostrada	Efficacia ridotta in condizioni di scarsa visibilità
Blind Spot Monitoring System	Sistema in grado di segnalare al conducente la presenza di pedoni, ciclisti e altri veicoli in corrispondenza dei punti ciechi	Riduzione degli incidenti con pedoni, ciclisti o veicoli che sorraggiungono da dietro	Efficacia limitata nelle strade di tipo urbano
Traffic Sign Recognition	Dispositivo in grado di riconoscere le informazioni contenute nei cartelli stradali e di riportarle al conducente	Riduzione del rischio di incidenti causati dal mancato rispetto della segnaletica verticale	Efficacia limitata in condizioni di scarsa visibilità
Pesatura dinamica	Sensori in fibra ottica o piezoelettrici collocati al livello stradale che misurano il peso e le dimensioni dei veicoli	Monitoraggio della strada Monitoraggio del traffico	Costi elevati

Elaborazione CeSCAM.

Note e riferimenti bibliografici

- [1]. Kireti.it. "Sicurezza stradale: le tecnologie che renderanno le autostrade più smart e sicure" <https://www.kireti.it/sicurezza-stradale-le-tecnologie-che-renderanno-le-autostrade-piu-smart-e-sicure/>
- [2]. Autoaziendalimagazine.it. "Sicurezza stradale: con intelligenza artificiale e big data si punta all'obiettivo zero morti sulle strade". https://www.autoaziendalimagazine.it/archivio_news/sicurezza-stradale-con-intelligenza-artificiale-e-big-data-si-punta-allobiettivo-zero-morti-sulle-strade/
- [3]. OECD (2003), "Road Safety: Impact of New Technologies", OECD Publishing, Paris <https://doi.org/10.1787/9789264103245-en>
- [4]. Internet4Things.it. "Semafori intelligenti: cosa sono, come funzionano, esempi e vantaggi" <https://www.internet4things.it/smart-city/semaphori-intelligenti-cosa-sono-come-funzionano-esempi-e-vantaggi/>
- [5]. Howstuffworks.com. "Going Nowhere Fast? Smart Traffic Lights Can Help Ease Gridlock" <https://science.howstuffworks.com/engineering/civil/smart-traffic-lights-news.htm>
- [6]. Elettricomagazine.it. "Semafori intelligenti: verdi al passaggio dei veicoli di emergenza" <https://eletttricomagazine.it/smart-tech-tecnologie-intelligenti/semaphori-intelligenti-sicurezza-stradale/>
- [7]. Itskrs.its.dot.gov. "Installation of Adaptive Signal Control Technology systems ranges from \$8,000 to \$35,000 per intersection" <https://www.itskrs.its.dot.gov/its/benecost.nsf/ID/e8025bfc961cc5a185257ee7006f137c>
- [8]. Comune.bologna.it. "Il Sistema semaforico centralizzato" <https://www.comune.bologna.it/servizi-informazioni/sistema-semaforico-centralizzato>
- [9]. Kireti.it. "Pesatura dinamica dei veicoli (WIM): cos'è e come aiuta a migliorare la sicurezza stradale" [https://www.kireti.it/pesatura-dinamica-dei-veicoli-wim-cose-e-come-aiuta-a-migliorare-la-sicurezza-stradale/#:~:text=Valore%20delle%20Informazioni-Pesatura%20dinamica%20dei%20veicoli%20\(WIM\)%3A%20cos'%C3%A8%20e%20come,a%20migliorare%20la%20sicurezza%20stradale&text=I%20sistemi%20di%20pesatura%20dinamica,che%20i%20veicoli%20si%20fermino](https://www.kireti.it/pesatura-dinamica-dei-veicoli-wim-cose-e-come-aiuta-a-migliorare-la-sicurezza-stradale/#:~:text=Valore%20delle%20Informazioni-Pesatura%20dinamica%20dei%20veicoli%20(WIM)%3A%20cos'%C3%A8%20e%20come,a%20migliorare%20la%20sicurezza%20stradale&text=I%20sistemi%20di%20pesatura%20dinamica,che%20i%20veicoli%20si%20fermino)
- [10]. Sicurezzamagazine. "Quando la sicurezza viaggia su strada" <https://www.sicurezzamagazine.it/sentinel-quando-la-sicurezza-viaggia-su-strada/>
- [11]. Ryguła, Artur, Brzozowski, Krzysztof and Maczyński, Andrzej. "Limitations of the effectiveness of Weigh in Motion systems" Open Engineering, vol. 10, no. 1, 2020, pp. 183-196. <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/eng-2020-0020/html>
- [12]. Itskrs.its.dot.gov. "Depending on the sensor type, Weigh-in-Motion sensor cost can range from \$4000 to \$53000 per lane for a two lane site" <https://www.itskrs.its.dot.gov/node/210300>
- [13]. Ediltecnico.it "Il sistema di pesatura dinamica a servizio di ponti e infrastrutture" <https://www.ediltecnico.it/83750/sistema-di-pesatura-dinamica-ponti-infrastrutture/>
- [14]. Seton.it. "Segnaletica fotoluminescente: quali sono i vantaggi?" <https://www.seton.it/segnaletica-fotoluminescente.html>
- [15]. Stradeeautostrade.it. "La segnaletica fotoluminescente garantisce maggiore sicurezza stradale: interessante iniziativa del governo australiano per contrastare il fenomeno dell'incidentalità"

<https://www.stradeeautostrade.it/notizie/2022/la-segnaletica-fotoluminescente-garantisce-maggiore-sicurezza-stradale-interessante-iniziativa-del-governo-australiano-per-contrastare-il-fenomeno-dellincidentalita/>

[16]. Carscoops.com. "Australia Could Soon Have Glow In The Dark Road Markings"
<https://www.carscoops.com/2022/05/australia-could-soon-have-glow-in-the-dark-road-markings/>

[17]. Carscoops.com. "First Trial of Glow in the Dark Road Markings Has Mixed Results"
<https://www.carscoops.com/2014/05/first-trial-of-glow-in-dark-road/>

[18]. Globochannel.com. "Le autostrade si illuminano al buio senza energia: la vernice fluorescente per le strisce in fase sperimentale in Australia"
<https://www.globochannel.com/2023/01/06/le-autostrade-si-illuminano-al-buio-senza-energia-la-vernice-fluorescente-per-le-strisce-in-fase-sperimentale-in-australia-foto-e-video-diffusi-sul-web-dimostrano-le-grandi-potenzialita-di-questa-t/>

[19]. Motorionline.com. "Sicurezza stradale di notte: arriva la segnaletica orizzontale fluorescente"
<https://www.motorionline.com/sicurezza-stradale-di-notte-arriva-la-segnaletica-orizzontale-fluorescente/>

[20]. Emmebisegnaletica.ti. "Segnaletica luminescente per pista ciclopedonale a Soncino".
<https://www.emmebisegnaletica.it/realizzazioni/segnaletica-luminescente-per-pista-ciclopedonale-a-soncino/>

[21]. Insella.it. "Sicurezza stradale: Andromeda, le barriere di sicurezza intelligenti"
<https://www.insella.it/news/sicurezza-stradale-andromeda-barriere-di-sicurezza-intelligenti-152286>

[22]. Overdrivemilano.it. "Nasce in Italia il primo guardrail smart del mondo"
<https://www.overdrivemilano.it/nasce-in-italia-il-primo-guardrail-smart-del-mondo/>

[23]. Economyup.it. "Smart road e sicurezza stradale: la "barriera connessa" di un'azienda italiana che piace ad Amsterdam e a Dubai"
<https://www.economyup.it/automotive/smart-road-e-sicurezza-stradale-la-barriera-connessa-di-unazienda-italiana-che-piace-ad-amsterdam-e-a-dubai/>

[24]. Newsauto.it. "Pericolo da guard rail? C'è la soluzione intelligente"
<https://www.newsauto.it/notizie/guard-rail-pericolo-barriera-sicurezza-stradale-smart-intelligente-2020-256379/>

[25]. Moto.it. "Andromeda. Guard rail smart e salva motociclisti"
<https://www.moto.it/news/andromeda-guard-rail-smart-e-salva-motociclisti.html>

[26]. Autoappassionati.it. "Decreto Smart Roads: Andromeda cambierà la sicurezza degli automobilisti?"
<https://www.autoappassionati.it/decreto-smart-roads-andromeda-sicurezza/>

[27]. Internet4Things.it. "Lampioni intelligenti: cosa sono, come funzionano, vantaggi ed esempi"
<https://www.internet4things.it/smart-city/lampioni-intelligenti-cosa-sono-come-funzionano-vantaggi-ed-esempi/>

[28]. Blog.topnetwork.it. "IoT, illuminazione pubblica e sicurezza: la quadratura del cerchio"
<https://blog.topnetwork.it/illuminazione-pubblica-intelligente-soluzioni-per-avere-piu-sicurezza>

[29]. Arkys.biz. "Safespotter AI e Smart City per il Comune di Monserrato"
<http://www.arkys.biz/safespotter-ai-smart-city-comune-monserrato/>

[30]. Lumi4Innovation.it. "Illuminazione pubblica a LED: lampioni sempre più intelligenti e connessi"
<https://www.lumi4innovation.it/illuminazione-pubblica-a-led-lampioni-sempre-piu-intelligenti-e-connessi/>

[31]. Ledleditalia.it. "Tutti i vantaggi e gli svantaggi delle lampade a sensori"
<https://www.ledleditalia.it/tutti-i-vantaggi-e-gli-svantaggi-delle-lampade-a-sensori/>

- [32]. Technavio.com. *"Smart Pole Market by Type, Product and Geography - Forecast and Analysis 2023-2027"* https://www.technavio.com/report/smart-pole-market-industry-analysis?utm_source=prnewswire&utm_medium=pressrelease&utm_campaign=T50-SDC_wk44_2022_004_report&utm_content=IRTNTR41270
- [33]. Agendadigitale.eu. *"Incidenti stradali, cosa può fare l'IA per ridurli? Stato dell'arte e aspettative"* <https://www.agendadigitale.eu/cultura-digitale/incidenti-stradali-cosa-puo-fare-lia-per-ridurli-stato-dellarte-e-aspettative/>
- [34]. Acusensus.com. *"Heads-up"* <https://www.acusensus.com/solutions/heads-up/>
- [35]. Actuia.com. *"Canada: Alberta tests Heads-up, the phone detection solution from Acusensus"* <https://www.actuia.com/english/canada-alberta-tests-heads-up-the-phone-detection-solution-from-acusensus/>
- [36]. Spectrum.ieee.org. *"Colorado prepares to install "Smart Road" product by integrated roadways"* <https://spectrum.ieee.org/colorado-prepares-to-install-smart-road-product-by-integrated-roadways>
- [37]. Asphaltmagazine.com. *"The possibilities are endless with smarter pavements"* <http://asphaltmagazine.com/smarterpavements/>
- [38]. The Providence Journal. *"Smart roads aim to keep you safe - and entertained"* <https://eu.providencejournal.com/story/news/technology/2018/05/25/high-tech-smart-pavement-aims-to-keep-you-safe-and-entertained/12073932007/>
- [39]. Integratedroadways.com. *"Digital Infrastructure for the Next Generation"* <https://integratedroadways.com/>
- [40]. Blog.richardvanhooijdonk.com. *"Smart roads will spell big things for the future of driving"* <https://blog.richardvanhooijdonk.com/en/smart-roads-will-spell-big-things-for-the-future-of-driving/>
- [41]. The Denver Post. *"High-tech Colorado road test to be first of its kind in the U.S., may improve traffic and save lives"* <https://www.denverpost.com/2018/05/30/us-285-smart-pavement-technology/>
- [42]. Ciht.org.uk. *"Transport infrastructure as a system of systems : developing an interconnected Digital Twin of UK Roads"* <https://www.ciht.org.uk/blogs/transport-infrastructure-as-a-system-of-systems-developing-an-interconnected-digital-twin-of-uk-roads/>
- [43]. Víctor M. G. Martínez, Moises R. N. Ribeiro, Divanilson R. Campelo (2022). *"Intelligent Road Intersections: A Case for Digital Twins"*. Pagg. 3-8.
- [44]. Blog.ptvgroup.com. *"Come un gemello digitale può aiutare a migliorare la mobilità urbana"* <https://blog.ptvgroup.com/it/citta-e-mobilita/come-un-gemello-digitale-puo-aiutare-a-migliorare-la-mobilita-urbana/>
- [45]. Agendadigitale.eu. *"Digital twin per la sicurezza informatica, ecco vantaggi e limiti"* <https://www.agendadigitale.eu/sicurezza/digital-twin-per-la-sicurezza-informatica-ecco-vantaggi-e-limiti/>
- [46]. Smartbuildingitalia.it. *"Digital Twin e Smart City"* <https://www.smartbuildingitalia.it/news/smart-city/digital-twin-smart-city/>
- [47]. Colas.com. *"Mobility solutions for more cohesive, connected communities"* <https://www.colas.com/en/innovation/mobility-solutions-for-more-cohesive-connected-communities>
- [48]. Northsearegion.eu. *"Flowell, a luminous active roadmarking designed to enhance safety and improve how we share public space"* <https://northsearegion.eu/bits/news/flowell-a-luminous-active-roadmarking-designed-to-enhance-safety-and-improve-how-we-share-public-space/>

- [49]. Semitan.tan.fr. *“La solution Flowell, première réalisation du Laboratoire d’innovation”*
<https://semitan.tan.fr/un-nouvel-engagement/flowell>
- [50]. Wired.it. *“Pedone Sicuro 2.0, il sistema che segnala a distanza i pedoni sulle strisce”*
<https://www.wired.it/lifestyle/mobilita/2017/03/14/pedone-sicuro-segnala-distanza/>
- [51]. Mobilitymanagement.info. *“Attraversamenti pedonali pericolosi? Pedone Sicuro 2.0 per la tutela degli utenti più deboli”*
<https://www.mobilitymanagement.info/notizie/attraversamenti-pedonali-pericolosi-pedone-sicuro-20-tutela-utenti-pi-deboli>
- [52]. Pedonesicuro.eu. *“Pedone Sicuro: attraversamento per la salvaguardia dei pedoni”*
<https://pedonesicuro.eu/elements/rows-columns/>
- [53]. Asaps.it. *“Pedone Sicuro 2.0: attraversamento intelligente per la salvaguardia dei pedoni”*
https://www.asaps.it/downloads/files/SAFETY_21_REDAZIONALE_CENTAURO_196.pdf
- [54]. Lastampa.it. *“Segnali luminosi e una fotocellula ad altezza passeggino. Ecco le prime strisce salva-pedone”*
<https://www.lastampa.it/alessandria/2018/01/24/news/segnali-luminosi-e-una-fotocellula-ad-altezza-passeggino-ecco-le-prim-strisce-salva-pedone-1.33971170/>
- [55]. Quicomo.it. *“Sicurezza stradale: ecco come funziona Pedone sicuro 2.0”*
<https://www.quicomo.it/guida/viabilita/pedone-sicuro-video.html>
- [56]. Safety21.it. *“Pedone Sicuro 2.0 arriva ad Ameglia”*
<https://www.safety21.it/it/2019/02/27/safety21-pedone-sicuro-2-0-ameglia/>
- [57]. Motori.it. *“Strisce pedonali: arrivano le “zebre” tecnologiche”*
<https://www.motori.it/curiosita/11929/strisce-pedonali-arrivano-zebre-tecnologiche.html>
- [58]. Linesandsigns.co.uk. *“Traffic Products”*
<http://www.linesandsigns.co.uk/pdfs/MMA%20Nov%2010.pdf>
- [59]. Worldhighways.com. *“When the rain comes”*
<https://www.worldhighways.com/wh11/feature/when-rain-comes>
- [60]. Repubblica.it. *“Le strisce pedonali smart ti possono salvare la vita”*
<https://www.repubblica.it/tecnologia/2016/04/22/news/le-strisce-pedonali-smart-ti-possono-salvare-la-vita-138201148/>
- [61]. Lifegate.it. *“Smart e luminose: le strisce pedonali del futuro parlano spagnolo”*
<https://www.lifegate.it/strisce-pedonali-smart-spagna-led>
- [62]. Lastampa.it. *“Spagna, arrivano le strisce “smart” che salvano i pedoni”*
<https://www.lastampa.it/motori/tecnologia/2016/04/27/news/spagna-arrivano-le-strisce-smart-che-salvano-i-pedoni-1.35019628/>
- [63]. Legnanonews.com. *“Salva Pedone, il sistema che illumina i passaggi pedonali”*
<https://www.legnanonews.com/cronaca/2016/09/13/salva-pedone-il-sistema-che-illumina-i-pas-saggi-pedonali/62148/>
- [64]. Auto.it. *“Starling Crossing, le strisce pedonali interattive e luminose”*
<https://www.auto.it/news/tech-zone/2017/10/09-1100036/starling-crossing-le-strisce-pedonali-interattive-e-luminose>
- [65]. Conte.it. *“Un ulteriore passo avanti nella sicurezza stradale: le strisce pedonali intelligenti”*
<https://www.conte.it/un-ulteriore-passo-avanti-nella-sicurezza-stradale-le-strisce-pedonali-intelligenti/>
- [66]. Notizietg.it. *“Il primo manto stradale interattivo e intelligente”*
<https://www.notizietg.it/il-primo-manto-stradale-interattivo-e-intelligente-video/>

- [67]. Hdblog.it. *"Smart crossing: nel Regno Unito le strisce pedonali sono intelligenti"* <https://www.hdblog.it/2017/10/10/Smart-crossing-strisce-pedonali-Umbrellium/>
- [68]. Diregiovani.it. *"A Londra arrivano le strisce pedonali intelligenti"* <https://www.diregiovani.it/2017/10/10/133238-a-londra-arrivano-le-strisce-pedonali-intelligenti.dg/>
- [69]. Imoveaustralia.com. *"London trials a responsive pedestrian crossing"* <https://imoveaustralia.com/news-articles/intelligent-transport-systems/london-responsive-pedestrian-crossing/>
- [70]. Cappelli A., Fornasiero E., Sardena A., Libardo A., *"Smart city e tecnologie innovative per la gestione dei flussi pedonali e aspetti economici"*, Percorsi pedonali, pagg.75-76, Novembre 2017
- [71]. Artlebedev.com. *"Air Crosswalk design concept"* <https://www.artlebedev.com/air-zebra/concept/>
- [72]. Corriere.it. *"Semafori addio, arriva il muro virtuale"* https://www.corriere.it/cronache/08_aprile_27/semaforo_muro_virtuale_7d9440fc-143b-11dd-b006-00144f02aabc.shtml
- [73]. Inmoto.it. *"Strisce salvamotociclisti, la segnaletica orizzontale che si fa strada in Europa"* <https://www.inmoto.it/news/attualita/2023/06/26-6481905/strisce-salvamotociclisti-la-segnaletica-orizzontale-che-si-fa-strada-in-europa>
- [74]. Sicurmoto.it. *"La segnaletica orizzontale salvamotociclisti"* <https://www.sicurmoto.it/guida-e-sicurezza/la-segnaletica-orizzontale-salvamotociclisti/>
- [75]. Agendadigitale.eu. *"Intelligent speed assistance (ISA): cos'è e perché sta per diventare obbligatorio sulle auto"* <https://www.agendadigitale.eu/mercati-digitali/intelligent-speed-assistance-isa-cose-e-perche-sta-per-diventare-obbligatorio-sulle-auto/>
- [76]. Europa.eu. *"Intelligent Speed Adaptation (ISA)"* https://road-safety.transport.ec.europa.eu/statistics-and-analysis/statistics-and-analysis-archive/esafety/intelligent-speed-adaptation-isa_en
- [77]. Smartrider.ch. *"ISA (Intelligent Speed Adaptation)"* <https://smartrider.ch/it/sistemi-di-assistenza-alla-guida/isa-intelligent-speed-adaptation>
- [78]. Etsce.eu. *"Concerns raised over draft technical specifications for mandatory Intelligent Speed Assistance (ISA) systems"* <https://etsc.eu/concerns-raised-over-draft-technical-specifications-for-mandatory-intelligent-speed-assistance-isa-systems/>
- [79]. Mapbox.com. *"How to comply with new EU intelligent speed assistance requirements"* <https://www.mapbox.com/blog/new-eu-intelligent-speed-assistance-requirements>
- [80]. Mocautogroup.com. *"Cos'è l'intelligent speed adaptation"* <https://www.mocautogroup.com/news/attualita/intelligent-speed-adaptation/>
- [81]. Saadé, J. (2017), *"Autonomous Emergency Braking AEB (pedestrians & cyclists)"*, European Road Safety Decision Support System, developed by the H2020 project SafetyCube. https://www.roadsafety-dss.eu/assets/data/pdf/synopses/Autonomous_Emergency_Braking_AEB_pedestrians_cyclists_2017.pdf
- [82]. Ucińska, Monika and Pełka, Małgorzata. *"The effectiveness of the AEB system in the context of the safety of vulnerable road users"* Open Engineering, vol. 11, no. 1, 2021, pp. 977-993. <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/eng-2021-0097/html?lang=en>

- [83]. Fundacionmapfre.org. "AEB PEDESTRIAN - Autonomous emergency braking" <https://www.fundacionmapfre.org/en/education-outreach/road-safety/adas-systems/types/autonomous-emergency-braking/pedestrian/>
- [84]. Autoblog.it. "La frenata di emergenza automatica ha problemi al buio e in curva?" <https://www.autoblog.it/post/frenata-emergenza-automatica-problemi-buio-in-curva>
- [85]. B. Fildes, M. Keall, N. Bos, A. Lie, Y. Page, C. Pastor, L. Pennisi, M. Rizzi, P. Thomas, C. Tingvall, "Effectiveness of low speed autonomous emergency braking in real-world rear-end crashes", Accident Analysis & Prevention, Volume 81, 2015 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001457515001116>
- [86]. Quattroruote.it. "Cos'è e come funziona il lane assist" <https://www.quattroruote.it/guide/Guida-assistita/cos-e-e-come-funziona-il-lane-assist.html>
- [87]. Carexpert.com.au. "Lane support systems explained" <https://www.carexpert.com.au/car-news/lane-support-systems-explained>
- [88]. Alvolante.it. "Lane Assist: cos'è, come funziona, come attivare e tipologie" https://www.alvolante.it/da_sapere/tecnologia/lane-assist-cos-e-come-funziona-come-attivare-e-tipologie-381150
- [89]. Swipcar.com. "Angolo cieco in auto: cos'è e come evitarlo?" <https://swipcar.com/it/blog/angolo-cieco>
- [90]. Jdpower.com. "What is a Blind-Spot Monitor?" <https://www.jdpower.com/cars/shopping-guides/what-is-a-blind-spot-monitor>
- [91]. Kbb.com. "Blind-Spot Monitors: Everything You Need to Know" <https://www.kbb.com/car-advice/blind-spot-monitors/>
- [92]. Autobusweb.com. "Monitoraggio dell'angolo cieco, al via la commercializzazione in Italia del sistema aftermarket Preco Electronics" <https://www.autobusweb.com/angolo-cieco-autobus-preco-linea-stradale/>
- [93]. Fleetmagazine.com. "Cos'è e come funziona il Traffic sign recognition" <https://www.fleetmagazine.com/traffic-sign-recognition/>
- [94]. Mycoyote.net. "Traffic Sign Recognition: come funziona e quali sono i suoi vantaggi?" <https://www.mycoyote.net/blog/traffic-sign-recognition-come-funziona-e-quali-sono-i-suoi-vantaggi/>
- [95]. Jdpower.com. "What is Traffic-Sign Recognition?" <https://www.jdpower.com/cars/shopping-guides/what-is-traffic-sign-recognition>
- [96]. Red-live.it. "Traffic Sign Recognition: come funziona?" <https://red-live.it/auto/traffic-sign-recognition-come-funziona/>
- [97]. Mobility.smartworld.it. "Che cos'è e a cosa serve il Traffic sign recognition" <https://mobility.smartworld.it/info-utili/traffic-sign-recognition-come-funziona#qualisonoivantaggilegatiallutilizzodeltrafficsignrecognition>
- [98]. Itskrs.its.dot.gov. "University Study Estimates Costs of \$8,981 and \$23,950 to Add Level 3 and Level 4 Automation to Vehicles by 2025" <https://www.itskrs.its.dot.gov/its/benecost.nsf/ID/2021-00482>