

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI  
FEDERICO II**



Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale

XXXIII Ciclo di Dottorato di Ricerca in  
**Ingegneria dei Sistemi Civili**

**Sviluppo di una metodologia di test per la validazione di  
funzionalità ADAS in un sistema vVeHIL integrato ad un  
ambiente di simulazione del traffico**

**Tutor:**

Prof. Ing. Luigi Pariota  
Prof. Ing. Francesco Timpone

**Candidato:**

Bruno De Marco

**Coordinatore di dottorato:**

Prof. Ing. Andrea Papola

Anno 2020/2021

## Ringraziamenti

“Quando si è giovani si pensa che la carriera proceda in modo lineare. Un bel voto di laurea, un master, un posto in una bella azienda, manager, dirigenza, board. Per linea retta, come su una scala, un gradino dopo l’altro, dal basso verso l’alto.

Ben presto si capisce che non funziona così. Si sale, si scende, si esce, si entra, una battuta d’arresto, un’accelerazione, un incidente, uno stop, un colpo di fortuna, si ricomincia da capo...ma chi ce lo fa fare.”

Ho imparato col tempo che il successo è spesso un concetto astratto, dipende da molti fattori e non si può decidere o impostare il gradino successivo da percorrere.

Questa esperienza di Dottorato di ricerca ha contribuito tanto alla percezione di questa realtà: mi ha permesso di crescere, oltre che da un punto di vista professionale, anche e soprattutto umanamente, perché percorrere una rampa di scala parallela a quella canonica, costituita da “un unico e semplice lavoro”, non è così semplice come pensavo. Le due rampe di scale iniziano molto, molto vicine, ma può accadere, per un motivo o un altro, che queste si inizino a separare e non si possa salire da entrambe le scale, bisogna tornare indietro e risalire pian piano l’una e poi l’altra.

Alla fine, tutto può iniziare a riallinearsi, con il sacrificio, il duro lavoro e la determinazione di mettersi in discussione ogni volta per continuare a migliorare e crescere.

In fondo, lo diceva anche un certo Mahatma Gandhi che “non può esservi conoscenza senza umiltà e volontà di apprendere”.

Questi valori non si insegnano, li si vivono e il Dottorato per me è stato anche questo ed è su questa strada che voglio continuare la mia carriera e la mia vita.

Ringrazio per questo percorso di vita e professionale il mio tutor Ing. Luigi Pariota, per aver teso una mano nei momenti di difficoltà e aver creduto nelle potenzialità del lavoro e nell’impegno, spero, poi ripagato. Su questo filone un ringraziamento particolare anche al Prof. Ing. Gennaro Nicola Bifulco, al Prof. Ing. Francesco Timpone e l’Ing. Luca Di Costanzo, sempre prezioso grazie al suo supporto tecnico.

Ringrazio la mia compagna Teresa per aver consentito che tutto ciò avvenisse, grazie alla sua disponibilità, comprensione e al supporto mai mancato per la gestione dei tempi.

Ringrazio anche la mia azienda NetCom Group per avermi permesso di intraprendere una formazione professionale ulteriore su tematiche d’interesse, con l’obiettivo di raggiungere un futuro insieme sempre più importante. Un ringraziamento speciale ad Antonello Caraceni, Alessandro Salvi, Enrico Landolfi e Rosario De Lucia.

Grazie a tutti.

# Indice

Elenco Figure .....	4
Elenco Tabelle.....	6
Elenco Acronimi .....	7
Abstract .....	8
Introduzione .....	9
Obiettivo.....	10
1 Sistemi Avanzati di Assistenza alla Guida (ADAS).....	12
1.1 ADAS.....	12
1.2 Livelli di Automazione .....	15
1.3 Sensori per sistemi ADAS.....	18
1.3.1 RADAR.....	18
1.3.2 LIDAR.....	21
1.3.3 CAMERA .....	23
1.4 Smart Roads .....	27
1.5 Tecniche di testing dei sistemi ADAS.....	28
1.5.1 Configurazioni di validazione: simulazioni In-the-loop.....	30
1.5.2 Testing virtuali ad evento o in continuo.....	32
1.5.3 I modelli di simulazione del traffico .....	34
1.5.4 I modelli di simulazione microscopici del traffico.....	35
1.6 C-ITS e applicazioni V2X.....	37
2 Metodologia di validazione .....	39
2.1 Schema funzionale a blocchi della piattaforma di testing ADAS.....	39
2.2 Approccio TCT per la creazione dell'elemento di "controllo" .....	41
2.3 Misure surrogate di sicurezza.....	44
2.3.1 Tempo di collisione (TTC – Time to Collision).....	45
2.3.2 Tempo di collisione modificato (MTTC – Modified Time to Collision) .....	47
2.3.3 Tempo di esposizione al conflitto (TET – Time Exposed Time to Collision) ..	48
2.3.4 Deceleration Rate to Avoid Collision (DRAC).....	48
2.3.5 Modified Deceleration Rate to Avoid Collision (MDRAC) .....	48
2.3.6 Deceleration Rate to Avoid a Crash using constant Initial Acceleration (DCIA) .	48

2.4	Integrazione delle misure surrogate di sicurezza nel processo di testing in continuo.....	49
2.4.1	Logica di triggering del Flag TTC.....	52
2.4.2	Logica di triggering del Flag MTTC.....	53
2.4.3	Logica di triggering del Flag DRAC.....	54
2.4.4	Logica di triggering del Flag MDRAC.....	55
2.4.5	Logica di triggering del Flag DCIA.....	56
2.4.6	Logica di triggering del Flag Collision.....	57
3	Implementazione e sviluppo della metodologia.....	61
3.1	Realizzazione piattaforma di testing vVeHIL con ambiente di simulazione del traffico.....	61
3.1.1	Sistema X-il under test: HIL Mathworks Speedgoat e Xpack4.....	62
3.1.2	Modello di simulazione del driver e del veicolo: IPG CarMaker.....	67
3.1.3	Ambiente di simulazione virtuale: IPG CarMaker.....	73
3.1.4	SW di traffic simulation: PTV Vissim.....	76
3.1.5	Elemento di controllo e data recording: Simulink.....	87
3.2	Realizzazione del controllore per la stima e la rilevazione dello stato passed/failed del test.....	87
3.3	Calibrazione delle soglie dei parametri surrogati di sicurezza.....	97
3.3.1	Calibrazione soglie su scenario AEB CCRs.....	103
3.3.2	Calibrazione soglie su scenario AEB CCRm.....	109
3.3.3	Calibrazione soglie su scenario AEB CCRb.....	114
3.3.4	Analisi e definizione soglie limite.....	116
4	Validazione e testing della metodologia.....	122
4.1	1° Case study: ambiente MIL con IPG CarMaker.....	123
4.2	2° Case study: validazione funzionalità AEB.....	128
4.2.1	Veicolo simulato.....	128
4.2.2	Road.....	130
4.2.3	Scenario.....	131
4.2.4	Analisi dei risultati.....	132
	Conclusioni e Sviluppi Futuri.....	139
	Bibliografia.....	141

## Elenco Figure

Fig. 1-1: DAS & ADAS .....	12
Fig. 1-2: Architettura sistemi ADAS .....	13
Fig. 1-3: Sensori & ADAS .....	15
Fig. 1-4: Livelli di automazione.....	17
Fig. 1-5: Evoluzione guida autonoma .....	18
Fig. 1-6: Un'analisi condotta da Grandview Research evidenzia la sempre maggiore diffusione dei radar a bordo dei veicoli (le cifre sono espresse in miliardi di unità) .....	19
Fig. 1-7: Grafico misura – distanza radar.....	20
Fig. 1-8: Classificazione radar [9] .....	21
Fig. 1-9: Campo visivo Lidar .....	22
Fig. 1-10: Posizionamento camere su veicolo .....	24
Fig. 1-11: Riconoscimento pedone e veicoli camera .....	24
Fig. 1-12: differenza tra camere standard e camere WDR .....	26
Fig. 1-13: CCD vs CMOS.....	27
Fig. 1-14: V Cycle tipico per sistemi meccatronici in ambito Automotive .....	29
Fig. 1-15: VeHIL laboratorio di testing.....	32
Fig. 1-16: Esempio scenario di testing ad evento Euro NCAP.....	33
Fig. 1-17: Esempio scenario di un software di simulazione del traffico microscopico...	36
Fig. 1-18: Applicazioni V2X.....	38
Fig. 2-1: ADAS testing platform.....	41
Fig. 2-2: Piramide di Hydén .....	43
Fig. 2-3: Definizione del TTC (tempo di collisione) .....	46
Fig. 2-4: Braking vs. steering for collision avoidance ( $\mu = 1.0$ ) .....	50
Fig. 2-5: Braking vs. steering for collision avoidance ( $\mu = 0.4$ ) .....	51
Fig. 2-6: Possibili configurazioni di collisione .....	58
Fig. 2-7: Configurazioni iniziali di angolo $\alpha < 90^\circ$ e $\alpha > 90^\circ$ .....	59
Fig. 3-1: Schematico della piattaforma di test considerata.....	62
Fig. 3-2: Mathworks Speedgoat Target Hardware .....	64
Fig. 3-3: IPG Roadbox Xpack4.....	64
Fig. 3-4: Database CAN .....	66
Fig. 3-5: Schema a blocchi sistema HIL under test .....	66
Fig. 3-6: Diagramma accelerazioni driver da CarMaker .....	68
Fig. 3-7: I tre step per calcolare la velocità desiderata per la propulsione del veicolo..	69
Fig. 3-8: Data Set Veicolo in IPG CarMaker .....	70
Fig. 3-9: Modello di veicolo generato in CarMaker .....	71
Fig. 3-10: Modello veicolo a bicicletta .....	72
Fig. 3-11: Ambiente 3D di IPG CarMaker .....	74
Fig. 3-12: Sezione Sensors in IPG CarMaker .....	75
Fig. 3-13: Tipologie di sensori disponibili in IPG CarMaker .....	75
Fig. 3-14: Rappresentazione grafico della rete stradale di Lioni.....	80

Fig. 3-15: Zonizzazione.....	81
Fig. 3-16: Matrice OD.....	83
Fig. 3-17: Zone di funzionamento modello di Wiedermann.....	85
Fig. 3-18: Automated Driving System Toolbox.....	89
Fig. 3-19: Schema a blocchi modello controllore Simulink.....	90
Fig. 3-20: Stateflow Flag TTC.....	91
Fig. 3-21: Stateflow Flag MTTC.....	91
Fig. 3-22: Stateflow Flag DRAC.....	92
Fig. 3-23: Stateflow Flag MDRAC.....	92
Fig. 3-24: Stateflow Flag DCIA.....	93
Fig. 3-25: Struttura AEB controller Automated Driving Toolbox.....	94
Fig. 3-26: Frenata AEB in funzione del TTC.....	95
Fig. 3-27: Esempio di attivazione dei flag durante una simulazione real-time attraverso il Matlab Automated Driving System Toolbox.....	96
Fig. 3-28: Esempio di attivazione del flag TTC durante una simulazione real-time.....	97
Fig. 3-29: Sensor Objects montati su veicolo simulato.....	101
Fig. 3-30: Configurazione funzionalità AEB in CarMaker.....	102
Fig. 3-31: Road scenario AEB CCRs.....	103
Fig. 3-32: Estratto di dati simulazione AEB CCRs.....	104
Fig. 3-33: Matrice di correlazione tra TTC, MTTC, DRAC e MDRAC in funzione di $V_f$ , $V_l$ e $\Delta V$ .....	118
Fig. 4-1: Blocco di calcolo in output al controllore (counter flag).....	122
Fig. 4-2: Configurazione simulazione caso a).....	124
Fig. 4-3: Configurazione simulazione caso b).....	124
Fig. 4-4: Configurazione simulazione caso c).....	125
Fig. 4-5: Estratto della simulazione del 1° case study.....	127
Fig. 4-6: Confronto calcolo Flag parametri surrogati di sicurezza in real-time per il caso a) e caso c).....	127
Fig. 4-7: Sensor objects considerati nel veicolo simulato del 2° case study.....	129
Fig. 4-8: Configurazione AEB.....	129
Fig. 4-9: Route definita nello scenario di Lioni.....	130
Fig. 4-10: Road di Lioni in PTV Vissim.....	131
Fig. 4-11: Impostazione driver.....	131
Fig. 4-12: Plot in post-processing di un evento critico.....	132
Fig. 4-13: Rischio per tamponamento.....	134
Fig. 4-14: Rischio per rientro da manovra di sorpasso.....	135
Fig. 4-15: Collisione per rientro da manovra di sorpasso.....	135
Fig. 4-16: Collisione per manovra di cut in.....	136
Fig. 4-17: Rischio per impatto laterale.....	136
Fig. 4-18: Collisione per impatto laterale.....	137
Fig. 4-19: Rischio per immissione in carreggiata.....	137
Fig. 4-20: FOV del Radar object simulato (in blu).....	138

## Elenco Tabelle

Tabella 1-1: Classificazione Radar .....	21
Tabella 1-2 Frequenza – Range max Lidar.....	23
Tabella 1-3: requisiti per camere in automotive .....	25
Tabella 2-1: Situazioni di P, C, I .....	44
Tabella 2-2: Soglie minime TTC.....	46
Tabella 3-1: Piattaforma di testing ADAS .....	61
Tabella 3-2: Valori di soglia limite di default dei parametri surrogati di sicurezza adoperati .....	97
Tabella 3-3: tabella test AEB CCRs .....	99
Tabella 3-4: tabella test AEB CCRm.....	100
Tabella 3-5: tabella test AEB CCRb.....	100
Tabella 3-6: tabella test AEB CCRs Flag TTC .....	105
Tabella 3-7: tabella test AEB CCRs Flag MTTC.....	106
Tabella 3-8: tabella test AEB CCRs Flag DRAC .....	107
Tabella 3-9: tabella test AEB CCRs Flag MDRAC.....	108
Tabella 3-10: tabella test AEB CCRm Flag TTC.....	110
Tabella 3-11: tabella test AEB CCRm Flag MTTC .....	111
Tabella 3-12: tabella test AEB CCRm Flag DRAC.....	112
Tabella 3-13: tabella test AEB CCRm Flag MDRAC .....	113
Tabella 3-14: tabella test AEB CCRb Flag TTC.....	115
Tabella 3-15: tabella test AEB CCRb Flag MTTC .....	115
Tabella 3-16: tabella test AEB CCRb Flag DRAC.....	116
Tabella 3-17: tabella test AEB CCRb Flag MDRAC .....	116
Tabella 4-1: Risultati 1° case study.....	126
Tabella 4-2: Risultati 2° case study.....	133

## Elenco Acronimi

ACC: Adaptive Cruise Control.  
ADAS: Advanced Driver Assistance System.  
AEB: Automatic Emergency Brake.  
BSD: Blind Spot Detection.  
CAN: Controller Area Network.  
CCD: Charge Coupled Devices.  
CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor.  
CTA: Cross Traffic Alert.  
DAS: Driver Assistance System.  
DSM: Driver System Monitoring.  
ECU: Electronic Control Unit.  
FCW: Forward Collision Warning.  
FOV: Field Of View.  
GPS: Global Positioning System.  
GSR: General Safety Regulation.  
HIL: Hardware In the Loop.  
IMU: Inertial Measurement Unit.  
LDW: Lane Departure Warning.  
LIDAR: Laser Imaging Detection and Ranging.  
LKS: Lane Keeping System.  
MIL: Model In the Loop.  
MIMO: Multi Input Multi Output.  
MUR: Max Unambiguous Range.  
OBU: On-Board Unit.  
RADAR: Radio Detection And Ranging.  
RCW: Rear Collision Warning.  
RHC: Receding Horizon Control.  
RSU: Road Side Unit.  
SAE: Society of Automotive Engineers.  
SIL: Software In the Loop.  
SISO: Single Input Single Output.  
TJA: Traffic Jam Assistant.  
WDR: Wide Dynamic Range.

## **Abstract**

In the last decades the development and implementation of vehicle safety systems have grown. In order to reduce car accidents caused by driver distraction or misjudgment, Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) have been developed, improving road safety and representing the first step towards autonomous vehicles. With the introduction of sensors and microcontrollers, ADAS are becoming more complex and safety critical and to ensure adequate levels of safety for people, it is necessary an intense amount of testing required to make ADAS safe and reliable as the average human.

For this reason, it is important the test methods used to validate them. Billions of miles of road testing should be necessary; real test drives are important, but new testing models are necessary, to reproduce difficult test scenarios and to automate the validation. The system adopted must be a controlled virtual environment to determine the correctness and performance of ADAS. Model-in-the-Loop and Hardware-in-the-Loop testing methods with real hardware represent the base elements of an evolved system which includes driving simulation software that allows to virtually test thousands of driving scenarios, reducing cost economy and identifying deficiencies during development phase. The goal of this thesis is to introduce a comprehensive strategy for a new ADAS simulation and validation approach through the development of an open platform that includes sensor simulation, vehicle simulation, 3D environment modeling, scenario testing, data management, traffic simulation and a system to control and detect the correct execution of the ADAS under test.

## Introduzione

Negli ultimi decenni è cresciuto lo sviluppo e l'implementazione dei sistemi di sicurezza dei veicoli. Al fine di ridurre gli incidenti automobilistici causati da distrazioni o errori di valutazione del conducente, sono stati sviluppati sistemi avanzati di assistenza alla guida (ADAS), che migliorano la sicurezza stradale e rappresentano il primo passo verso i veicoli autonomi. Con l'introduzione di sensori e microcontrollori, gli ADAS stanno diventando sempre più complessi e critici per la sicurezza e, per garantire livelli adeguati di sicurezza per le persone, è necessaria un'intensa quantità di test necessari per rendere tali sistemi sicuri e affidabili.

Per questo motivo è importante la metodologia di prova utilizzata per convalidarli. Dovrebbero essere necessari milioni di km di prove su strada e, sebbene i test drive reali siano importanti, sono necessari nuovi modelli di test, capaci di riprodurre scenari di test complicati, e un sistema di automatizzazione per la validazione degli stessi. Il sistema da adoperare deve essere un ambiente virtuale controllato per determinare la correttezza e le prestazioni degli ADAS. I metodi di test Model-in-the-Loop e Hardware-in-the-Loop con hardware reale rappresentano gli elementi di base di un sistema evoluto che include un software di simulazione di guida in grado di testare virtualmente migliaia di scenari di guida, riducendo i costi e identificando le anomalie durante la fase di sviluppo.

## Obiettivo

L'obiettivo di questo lavoro di ricerca è introdurre una strategia completa per un nuovo approccio di simulazione e validazione degli ADAS, attraverso lo sviluppo di una piattaforma aperta che include la simulazione di sensori, la simulazione di veicoli, la modellazione dell'ambiente e scenario virtuale in 3D, la gestione dei dati, la simulazione del traffico e un sistema per controllare e rilevare la corretta esecuzione degli ADAS sotto test.

Nello specifico, la ricerca ha come focus la realizzazione di una metodologia di test per sistemi avanzati di assistenza alla guida (ADAS) in un ambiente vVeHIL (virtual Vehicle Environment Hardware in the Loop), integrato con un software di simulazione del traffico.

La metodologia prevede lo sviluppo di una piattaforma integrata per inserire nella simulazione virtuale una serie di elementi quali la simulazione e modellazione di veicoli, modellistica ambientale 3D, test di scenario, gestione dati, un sistema X-il under test, la simulazione del traffico; e la realizzazione di un controllore (logica in Simulink) in grado di rilevare dei defect (mediante attivazione di flag) quando si verificano delle anomalie durante i cicli di simulazione: viene fatta un'acquisizione in ogni istante e viene salvato solo il tratto di simulazione in cui viene attivato il flag, in modo da andare a riconoscere le cause mediante opportuna analisi di post-processing.

Attraverso la metodologia proposta è possibile testare una qualunque funzionalità ADAS mediante la definizione di KPI per il testing su cui il controllore deve basarsi per la stima e la rilevazione dello stato passed/failed del test.

Nello specifico sarà possibile testare la funzione ADAS sotto forma di simulazione a ciclo chiuso in relazione con un modello di veicolo e con l'ambiente, nel contesto di un processo completo di guida virtuale. La simulazione completa del processo di guida automatica fornisce al team di sviluppo una serie di vantaggi: per esempio, la possibilità di testare le funzioni ADAS in situazioni difficili di guida in un ambiente virtuale e consente di accelerare notevolmente il ciclo di innovazione mediante iterazioni di progetto rapide e regolazioni flessibili delle condizioni ambientali (per esempio la differenza tra superfici di guida asciutte e umide) e assicura la riproducibilità dei risultati del test.

Con la simulazione vVeHIL il processo di sviluppo e più specificamente la fase di validazione dei veicoli intelligenti può essere eseguito in modo più sicuro, più economico, più gestibile e più affidabile. Infatti, in un vVeHIL un veicolo completo è testato nel circuito di simulazione, in modo tale che sia possibile testare la sicurezza e l'affidabilità di un sistema ADAS con grande precisione e affidabilità.

Esistono diverse toolchain a disposizione per la generazione di scenari virtuali integrati in un ambiente di simulazione real-time ed esistono software di simulazione

del traffico che consentono di determinare il flusso di una rete stradale, ma non esiste una piattaforma integrata che include la co-simulazione di un ambiente virtuale con un software di simulazione del traffico e non esiste una metodologia che consenta di testare le logiche mediante scenari randomici, simulando in continuo migliaia di chilometri, e che «controlli» in automatico la corretta esecuzione dei test.

Questa ricerca si propone, quindi, di provare a colmare questa lacuna mediante integrazione di strumenti, metodologie e conoscenze di mondi profondamente diversi (quello dell'ingegneria del veicolo e quello dell'ingegneria dei sistemi di trasporto), che il progresso tecnologico ha condotto ad uno stato di forte contaminazione.

Tutti questi aspetti rappresentano una valida giustificazione al lavoro svolto che è descritto nei prossimi capitoli.

Nel Capitolo 1 vengono introdotti i sistemi ADAS mediante una descrizione dei principali sistemi di guida avanzati e sulla sensoristica montata a bordo veicolo per effettuare tali funzionalità. Vengono, inoltre, introdotte le tecniche di validazione "in-the-loop" standard adoperate per il testing e i modelli di simulazione del traffico.

Il Capitolo 2 presenta una descrizione della metodologia adoperata, andando ad analizzare i KPI calcolati sulla base di parametri surrogati di sicurezza, nonché le logiche di attivazione considerate per la costruzione dell'algoritmo che attiva i flag indici di una possibile collisione.

Il Capitolo 3 descrive nel dettaglio gli elementi necessari per lo sviluppo della piattaforma di test per sistemi ADAS in ambiente vVeHIL. Vengono quindi presentati i vari tool considerati e gli step necessari per l'implementazione hw/sw della piattaforma.

Infine, il Capitolo 4 presenta i risultati dei test model in the loop e hardware in the loop effettuati per diversi scenari, verificando il funzionamento real-time dell'intera struttura di test e validando la metodologia proposta.

# 1 Sistemi Avanzati di Assistenza alla Guida (ADAS)

## 1.1 ADAS

L'acronimo ADAS sta per Advanced Driver Assistance System (Sistemi Avanzati di Assistenza alla Guida). I sistemi ADAS sono dei dispositivi aggiuntivi installati nei veicoli che vengono considerati come un sottoinsieme dei DAS: Driver Assistance System, sistemi in cui la funzione principale è garantire la sicurezza del veicolo, del conducente, dei pedoni o dei ciclisti. In Figura 1.1 si possono notare una serie di sistemi che appartengono alla famiglia DAS di cui quelli classificabili come ADAS sono indicati con mezze stelle o stelle piene (i più avanzati di tutti).

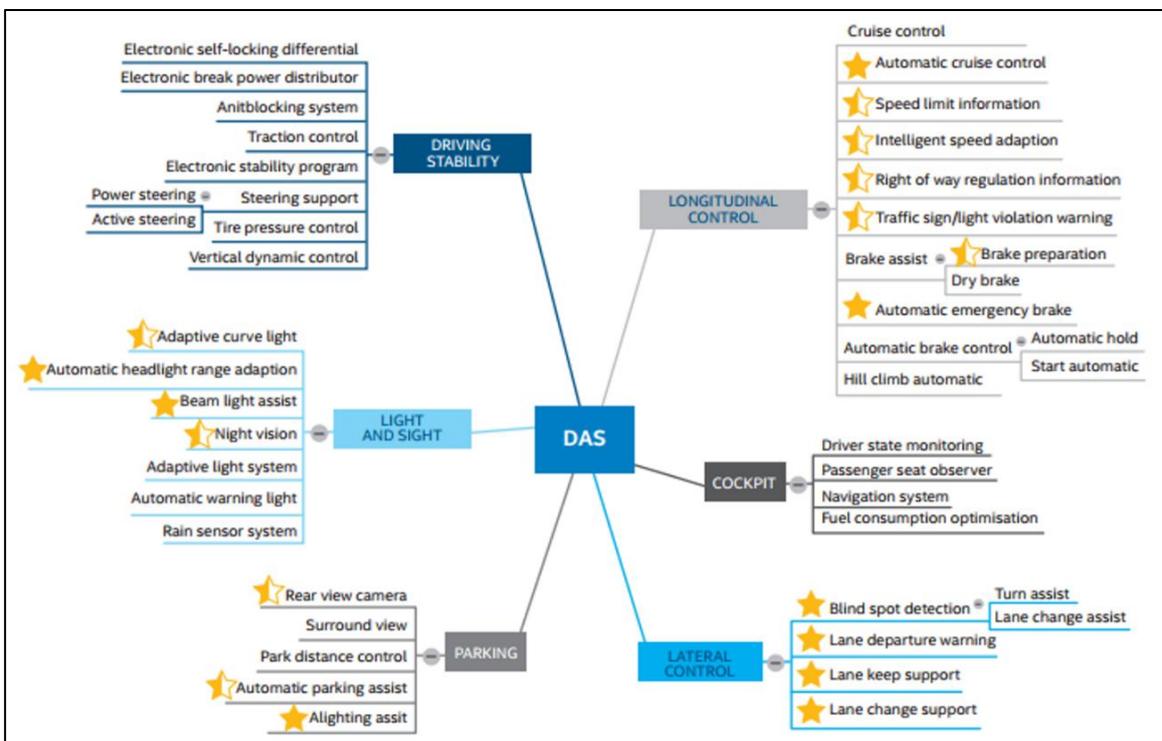
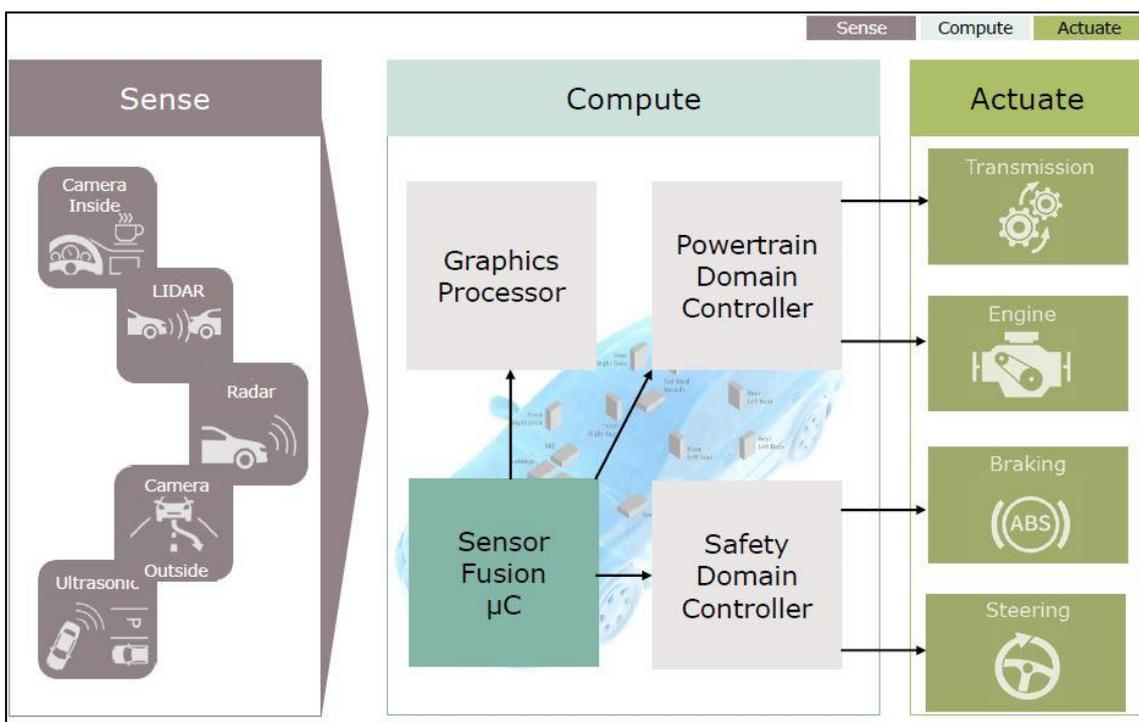


Fig. 1-1: DAS & ADAS

Gli ADAS sono in grado di informare l'autista, lanciare dei *warning*, che possono indicare eventuali situazioni pericolose, migliorare il comfort di guida, garantire maggiore sicurezza in strada, attuare delle operazioni che manovrano il veicolo autonomamente per riportarlo in condizioni di sicurezza, diminuire l'uso di carburante e così via. Gli ADAS sono dei sistemi di controllo a ciclo chiuso che aggiungono ai semplici DAS un maggiore uso di algoritmi di elaborazione complessi per valutare l'ambiente che circonda il veicolo in base ai dati raccolti tramite una varietà di segnali provenienti da una moltitudine di sensori.

In particolare, nella Figura 1.2 [1] si può notare l'architettura generale che descrive un veicolo dotato di sistemi ADAS. Il primo blocco comprende tutte le tecnologie sensoriali che possono essere utilizzate, radar, camere ecc.; la parte centrale, quella di calcolo, comprende una ECU (Electronic Control Unit) sulla quale viene implementato un algoritmo di fusione sensoriale per compattare tutti i dati ricevuti in un unico dato affidabile e un sistema di controllo che prende come riferimento i dati di uscita dalla fusione sensoriale e in base a quelli comanda opportunamente tutti gli organi di attuazione mostrati nel terzo blocco.



**Fig. 1-2: Architettura sistemi ADAS**

Questa architettura è fondamentale per diversi aspetti. Nel corso di questo lavoro sono stati utilizzati ambienti di simulazione per testare la logica dei dispositivi progettati. In questo caso la programmazione vera e propria dei vari algoritmi non pone grossi vincoli, si è liberi di scegliere tutte le tecnologie offerte dal mercato. Ma lo

sforzo sarà programmare questi sistemi pensandoli per essere testati mediante tecniche HIL (Hardware In the Loop), ovvero il cui codice è stato scritto per poter essere installato su una centralina di sviluppo collegata a dei simulatori che emulano il veicolo e l'ambiente.

I sensori maggiormente utilizzati per lo sviluppo di sistemi ADAS sono: radar, lidar, sensori ad ultrasuoni, telecamere a visione notturna, tutti dispositivi che consentono a un veicolo di monitorare zone vicine e lontane in ogni direzione e di evolvere e migliorare gli algoritmi di *fusione sensoriale* che garantiscono la sicurezza di veicoli, guidatori, passeggeri e pedoni in base a fattori quali traffico, condizioni meteorologiche, condizioni pericolose, ecc.

Quello della *fusione sensoriale* è uno dei concetti fondamentali per i principali progressi nel design degli ADAS. Questo processo permette di creare una mappa di possibili ostacoli attorno al veicolo e tenere traccia di tutte le possibili situazioni di pericolo.

La Sensor Fusion risulta essere fondamentale per poter "fondere" misure di strumenti che sarebbero già da soli in grado di rilevare un ostacolo, ad esempio sia radar che camere rilevano un veicolo, ma in base alle condizioni ambientali una delle due misure potrebbe essere più o meno efficace, quindi andando a combinare tutti i dati provenienti dai vari sensori si può ottenere un'unica misura certamente più ragionevole.

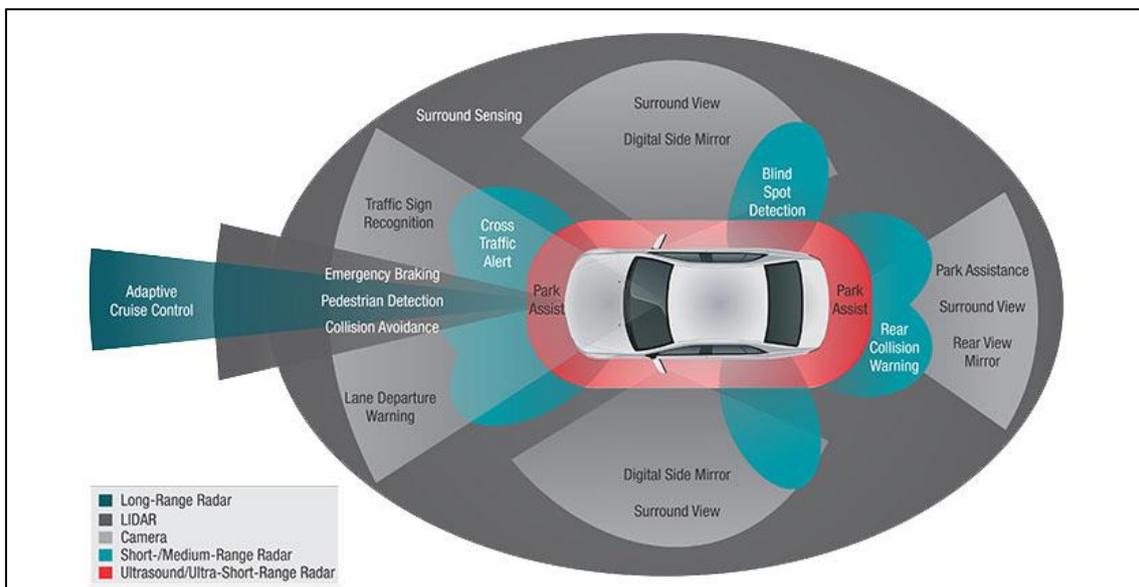
Sono elencate di seguito alcune delle applicazioni ADAS più conosciute [2], [3]:

- **ACC** - Adaptive Cruise Control, controllo di velocità di crociera adattivo. Questo sistema permette all'autista di scegliere una velocità di crociera alla quale il veicolo è in grado di portarsi automaticamente, ma allo stesso tempo regola la propria velocità per mantenere un'opportuna distanza di sicurezza dal veicolo seguente, agendo su freno e acceleratore.
- **AEB** - Automatic Emergency Breaking: frenata automatica di emergenza. Il veicolo è in grado di frenare automaticamente nel momento in cui dovesse presentarsi un ostacolo improvviso (ad esempio un pedone) davanti al veicolo.
- **RCW** - Rear Collision Warning: avvisa l'autista di una possibile collisione posteriore dovuta alla presenza di qualche ostacolo rilevato con videocamere.
- **FCW** - Forward Collision Warning: avviso di collisione frontale, il sistema utilizza la videocamera e i sensori radar per monitorare la zona frontale e individuare ostacoli e/o vetture presenti sul percorso.
- **LDW** - Lane Departure Warning: un sistema LDW avverte un conducente in autostrada se la propria auto si discosta dalla corsia di marcia corrente senza attivare l'indicatore di direzione.
- **DSM** - Driver System Monitoring: un sistema DSM, sistema di monitoraggio del conducente, traccia la direzione del volto del conducente e avvisa se lo sguardo

conducente non è rivolto in avanti. Si stanno già sviluppando sistemi basati sullo stesso principio in grado di percepire la stanchezza del conducente.

- **LKS** - Lane Keeping System: stesso principio di LDW ma in questo caso oltre ad avvisare il conducente, nel caso in cui non venga riportata la vettura nella corretta corsia, il veicolo è in grado di correggere la traiettoria autonomamente.
- **BSD** - Blind Spot Detection: monitoraggio del punto cieco, ovvero delle zone laterali posteriori, zone non facilmente visibili dall'autista; il sistema avverte il conducente se un veicolo si avvicina ai punti ciechi posteriori in modo da prevenire urti in caso di variazione di corsia.
- **CTA** - Cross Traffic Alert: monitoraggio di traffico agli incroci, utilizza telecamere e radar. Si attiva quando si sta per attraversare un incrocio, avvisando il guidatore se qualche veicolo si avvicina in maniera pericolosa da dietro l'angolo o da un'altra direzione che il guidatore non può vedere.
- **TJA** - Traffic Jam Assistant: assistente alla guida in coda, è una funzione avanzata dell'ACC che necessita del cambio automatico, perché è in grado di arrestare e far ripartire l'auto nella marcia incolonnata, in autostrada o in tangenziale, quando si verificano le situazioni di traffico a singhiozzo.

La Figura 1.3 mostra quali sensori vengono utilizzati per implementare alcuni dei sistemi descritti. Sempre riguardo ai sensori vi sarà una descrizione più dettagliata di quelli sopracitati (radar, lidar, camere) nel paragrafo 1.3.



**Fig. 1-3: Sensori & ADAS**

## 1.2 Livelli di Automazione

Gli ADAS forniscono innovazione non solo dal punto di vista della sicurezza ma rappresentano dei mezzi di avvicinamento ad uno dei principali temi di mercato dei prossimi anni: la *guida autonoma*.

La visione della guida autonoma è in circolazione da quasi quanto le automobili stesse, principalmente come scenario di romanzi e film di fantascienza. Eppure, già nel 1939 la visione era molto vicina alla realtà. Alla fiera mondiale di New York, l'idea è stata presentata nella mostra [4] "Futurama". Nel 1960, si disse, "questo dovrebbe essere realizzato".

Tuttavia, negli anni '50, gli ingegneri stavano già sviluppando i primi concetti per le unità a lunga distanza completamente automatizzate sulle autostrade americane [4]. La loro idea era di combinare le misure infrastrutturali e la tecnologia dei veicoli: prima di mettersi in viaggio, l'autista doveva semplicemente informare il centro di controllo del traffico della propria destinazione e il viaggio automatizzato poteva iniziare.

Gli sviluppi hanno fatto progressi. I sistemi odierni utilizzano i segnali provenienti da un'ampia varietà di sensori installati a bordo del veicolo per supportare il guidatore. Le auto moderne dispongono di un gran numero di avanzati sistemi di assistenza alla guida (ADAS) che aiutano l'autista in alcune situazioni di guida e di parcheggio e possono addirittura occuparsi completamente di alcune attività. Ad esempio, oggi il sistema di avviso di cambio corsia (LDW) avverte il conducente di un cambio di corsia involontario oppure i sistemi più avanzati mantengono automaticamente il veicolo nella corsia (LKS).

Il futuro visto ieri è destinato a diventare realtà oggi e/o domani [4]. Inoltre, l'automazione è più della realizzazione di una visione a lungo apprezzata. Depone la prima pietra per superare con successo le numerose e varie sfide globali per la mobilità.

La guida autonoma ha il potenziale per contribuire a risolvere le sfide che accompagnano le tendenze di sviluppo globale. L'obiettivo principale è rendere il traffico stradale ancora più sicuro. La tecnologia degli ADAS offre potenzialmente ulteriori riduzioni significative del numero di incidenti e ingorghi. Ad esempio, i sistemi di controllo automatico della velocità adattivi (ACC) migliorano il flusso del traffico e forniscono un contributo importante per evitare incidenti.

La guida autonoma rende il traffico non solo più sicuro, ma anche più efficiente e confortevole. Il flusso di traffico ottimizzato e la minore congestione determinano una riduzione decisiva delle emissioni di CO<sub>2</sub>.

Eppure, nonostante tutti questi progressi nell'automazione, i conducenti mantengono il controllo. Al giorno d'oggi gli autisti possono decidere se utilizzare o meno uno dei tanti sistemi ADAS, possono disattivarli e avere pieno controllo del veicolo. In futuro i clienti avranno ancora questa libertà di scelta.

Le funzioni di guida e parcheggio al momento disponibili già sollevano il conducente da alcune attività. L'autista deve monitorare il sistema e se necessario deve riprendere da solo la guida. Allo stato dell'arte sono già implementate funzioni di guida automatizzate per la guida su autostrade e nelle code di traffico. Nel futuro più

lontano vedremo anche un aumento del supporto dei conducenti nei viaggi nelle aree urbane.

Il percorso verso l'automazione elevata e completa non è, tuttavia, un processo che riguarda solo ed esclusivamente lo sviluppo di nuove tecnologie, ma richiederà anche modifiche alla legislazione nazionale e internazionale.

La SAE (Society of Automotive Engineers) ha stilato sei livelli, da 0 a 5, riconosciuti a livello internazionale per classificare il grado di automazione dei veicoli (vedi Figura 1.4). Questa classificazione tecnica descrive quali compiti il sistema svolge e quali compiti/requisiti deve soddisfare il conducente.

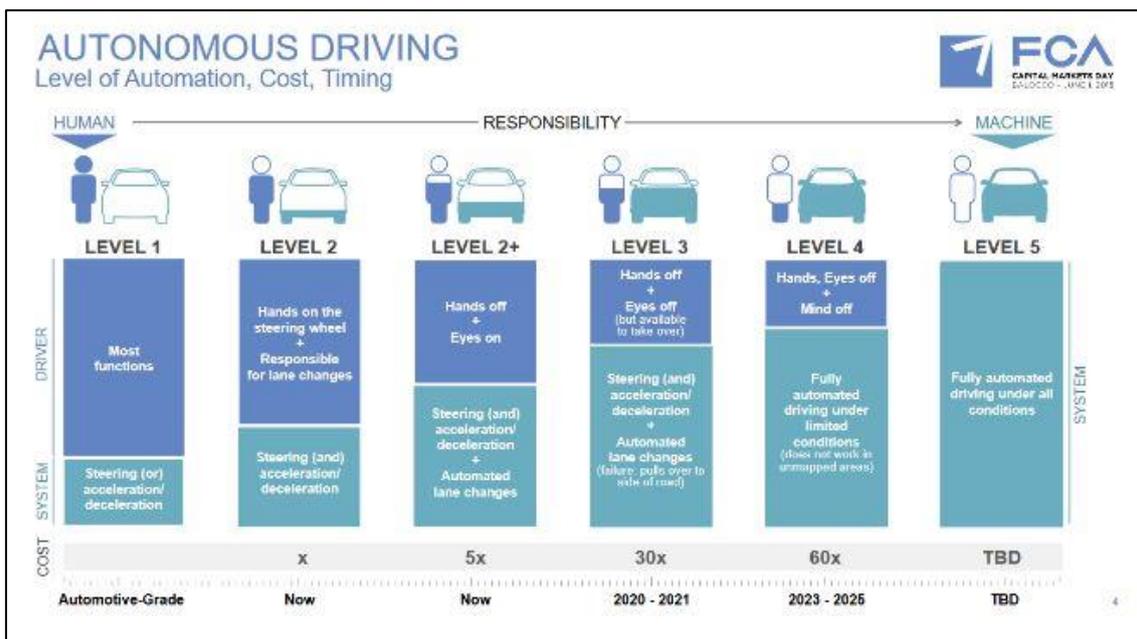


Fig. 1-4: Livelli di automazione

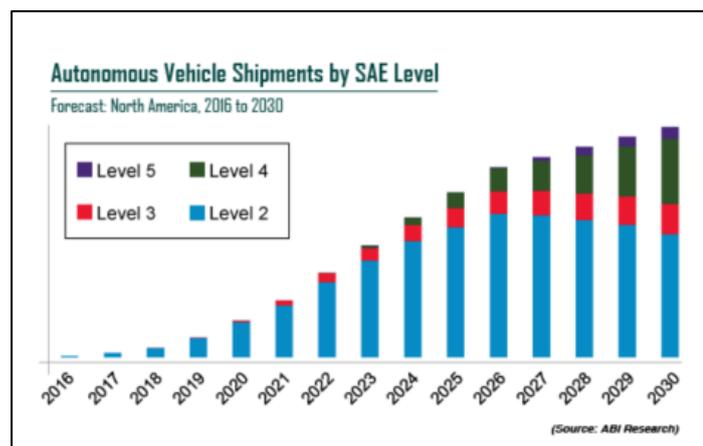
Di seguito sono descritti brevemente i principi di ogni livello individuato [4]:

- **Level 0:** non ci sono funzioni di guida autonoma. Il conducente esegue il controllo longitudinale del veicolo e il controllo laterale. Non ci sono sistemi che intervengono.
- **Level 1:** il sistema può assumere o il controllo laterale o il controllo longitudinale mentre l'autista svolge l'altro compito.
- **Level 2:** si parla di automazione parziale, poiché in alcuni task il sistema può assumere sia controllo longitudinale che laterale. L'autista monitora continuamente il veicolo e il traffico e in qualunque momento può riprendere il controllo dell'auto.
- **Level 3:** il sistema indipendentemente percepisce i suoi limiti rappresentati dal punto in cui le sue funzioni non sono più in grado di funzionare correttamente

in quelle condizioni ambientali. In questo caso il veicolo richiede all'autista di riprendere il controllo della guida (vi sono ancora sistemi di controllo: sterzo, pedali ecc.). Il conducente non deve più eseguire continuamente il controllo longitudinale e laterale del veicolo ma deve essere in grado di riprendere il controllo quando gli viene chiesto.

- **Level 4:** dal livello 4 invece, l'autista può lasciare l'intero task di guida al sistema ma in specifici casi d'uso. Questi scenari si riferiscono a tipi di strade, range di velocità e condizioni ambientali.
- **Level 5:** l'ultimo livello di sviluppo è quello della guida senza conducente. Il veicolo può eseguire completamente e in maniera indipendente la guida su tutti i tipi di strade, in tutti i range di velocità e sotto tutte le condizioni ambientali. Vengono addirittura eliminati gli organi di controllo del veicolo (pedali e stero). Al momento nessuno può dire quando si raggiungerà questo livello. La ricerca e lo sviluppo è inizialmente focalizzata su livelli di automazione di guida parzialmente, altamente o completamente autonoma. La guida completamente autonoma in autostrada diventerà probabilmente possibile in una decina di anni.

In Fig. 1.5 [5] è possibile osservare i dati di una ricerca effettuata da ABI Research [6] la quale prevede che oltre il 12% dei modelli prodotti nel 2021 presenteranno funzionalità di livello autonomo 2+.



*Fig. 1-5: Evoluzione guida autonoma*

### 1.3 Sensori per sistemi ADAS

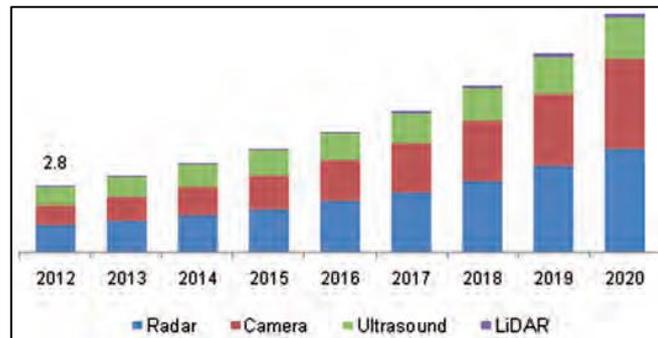
I principali sensori utilizzati in ambito automotive e soprattutto nello sviluppo dei sistemi ADAS sono radar, lidar e camere. Segue un'analisi più dettagliata di tutte le tecnologie citate.

#### 1.3.1 RADAR

Come già discusso precedentemente, in un futuro non molto distante i veicoli autonomi sono destinati a tramutarsi in una realtà commerciale. Quando arriverà quel giorno, esso sarà anche ascrivibile alla versatilità dei RADAR

(Radio Detection And Ranging), che i costruttori di auto stanno utilizzando in misura sempre maggiore nei sistemi BSD (Blind Spot Detection) e di impatti laterali, nonché negli apparati per la progettazione di ACC.

In Fig. 1.6 si può osservare come i Radar siano utilizzati sempre di più anno dopo anno.



**Fig. 1-6: Un'analisi condotta da Grandview Research evidenzia la sempre maggiore diffusione dei radar a bordo dei veicoli (le cifre sono espresse in miliardi di unità)**

Una delle principali caratteristiche che differenzia i radar utilizzati per la sicurezza dei veicoli da quelli impiegati nelle applicazioni più tradizionali [7] è rappresentata dalle frequenze di funzionamento molto più elevate (tra 76 e 80 GHz). Esse sono state scelte a causa delle loro caratteristiche di propagazione del segnale e sono definite onde millimetriche a causa delle lunghezze d'onda estremamente ridotte (da 10 a 1 mm). La regione delle onde millimetriche inizia a frequenze superiori a 30 GHz (fino a 300 GHz).

Le motivazioni sono diverse. La propagazione del segnale a onde millimetriche è caratterizzato da un range limitato e diminuisce all'aumentare della frequenza. Le leggi della fisica insegnano che minore è la lunghezza d'onda, minore sarà il range di trasmissione a parità di potenza. I segnali delle onde millimetriche, inoltre, sono sensibili all'attenuazione prodotta da qualsiasi elemento si trovi di fronte ad essi – dalla pioggia alla neve, alla nebbia, dal fogliame a qualsiasi struttura solida. Anche in buone condizioni di visibilità reciproca, il range è di molto inferiore rispetto a quello delle frequenze più basse usate in applicazioni quali comunicazioni wireless e broadcasting dei segnali radiofonici e televisivi. Ma per applicazioni automotive non sono richieste range molto ampi, si parla di centinaia di metri.

Tradizionalmente i sistemi a onde millimetriche sono costosi da realizzare in quanto i componenti meccanici come le antenne sono molto piccole e richiedono un adattamento estremamente preciso.

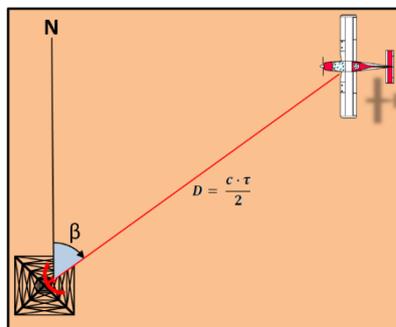
Non sono molti i dispositivi a semiconduttore capaci di garantire prestazioni accettabili a frequenze così elevate. Tutti questi svantaggi sono superabili solamente nel momento in cui viene identificato un mercato che, grazie a volumi enormi, permetta di abbattere i costi e finanziare l'innovazione.

Nonostante le caratteristiche sopra menzionate rendano le onde millimetriche inadatte per parecchie applicazioni, il loro impiego nei sistemi di sicurezza automobilistici porta numerosi vantaggi, come ad esempio le limitazioni in termini di range non sono valide per ogni frequenza dello spettro delle onde millimetriche poiché l'assorbimento atmosferico ad alcune frequenze è inferiore rispetto ad altre. Per i radar impiegati nel settore automobilistico le frequenze più adatte sono comprese tra 71 e 81 GHz. Un ulteriore vantaggio delle onde millimetriche è rappresentato dal fatto che per i sistemi radar è richiesta una potenza di uscita molto bassa, fattore questo particolarmente importante per l'industria automobilistica dove i costi rappresentano un fattore critico, senza dimenticare la difficoltà insita nel generare alti livelli di potenza.

I radar vengono utilizzati per rilevare un ostacolo nei pressi del veicolo, in particolare sfruttano il fenomeno di riflessione di onde elettromagnetiche effettuando una misura di distanza dell'ostacolo andando a valutare il tempo di volo dell'onda  $\tau$ , ovvero il tempo che passa dall'emissione dell'onda all'istante della riflessione (scaturita dall'impatto dell'onda sull'ostacolo) più il tempo impiegato dall'onda riflessa per ritornare alla sorgente secondo la seguente equazione:

$$D = \frac{c \cdot \tau}{2} \quad \text{Eq. 1.1}$$

dove  $c$  è la velocità di propagazione dell'onda nel mezzo (aria). Esso è solitamente un valore fisso che nel vuoto è pari alla velocità della luce, ma varia a seconda del mezzo di propagazione e dalle condizioni ambientali.



*Fig. 1-7: Grafico misura - distanza radar*

Ovviamente, il dispositivo dovrà essere equipaggiato di un sistema di misura del tempo, un clock.

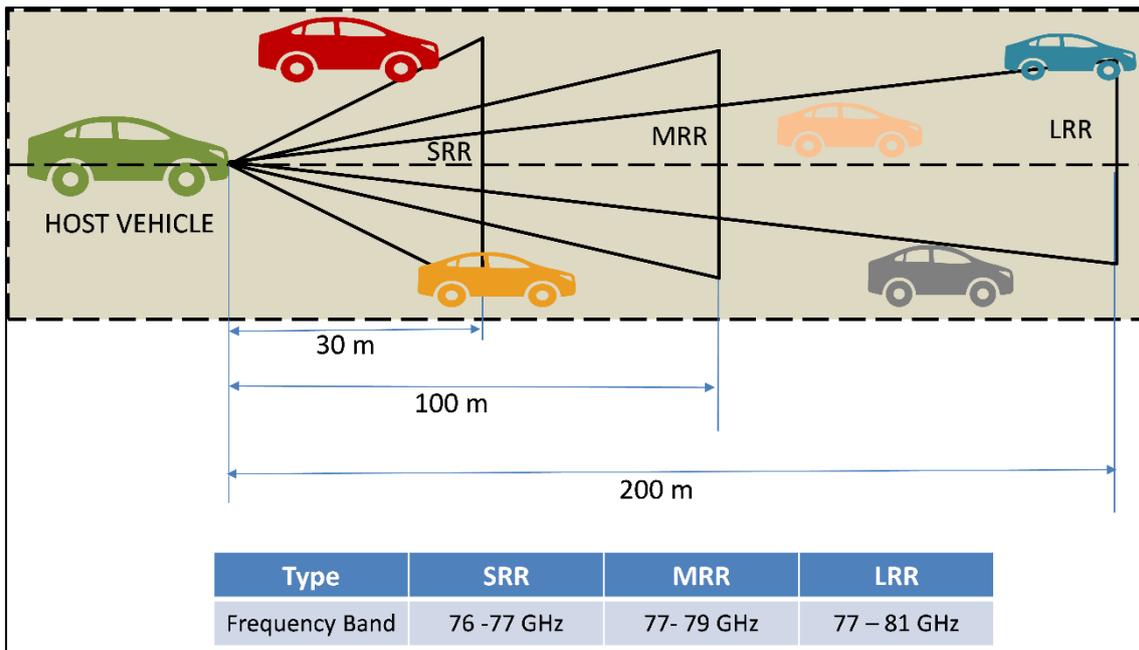
I radar si classificano in base a due parametri:

- Fascio di apertura dell'onda emessa;
- Massima distanza raggiungibile (range);

In base a questi due parametri i radar si classificano come in Tabella 1-1 [8]:

**Tabella 1-1: Classificazione Radar**

Radar Type	Opening Angle	Detection Range [m]
Long Range Radar (LRR)	Da $\pm 15^\circ$ a $\pm 25^\circ$	200
Medium Range Radar (MRR)	Da $\pm 40^\circ$ a $\pm 50^\circ$	100
Short Range Radar (SRR)	Da $\pm 55^\circ$ a $\pm 70^\circ$	30



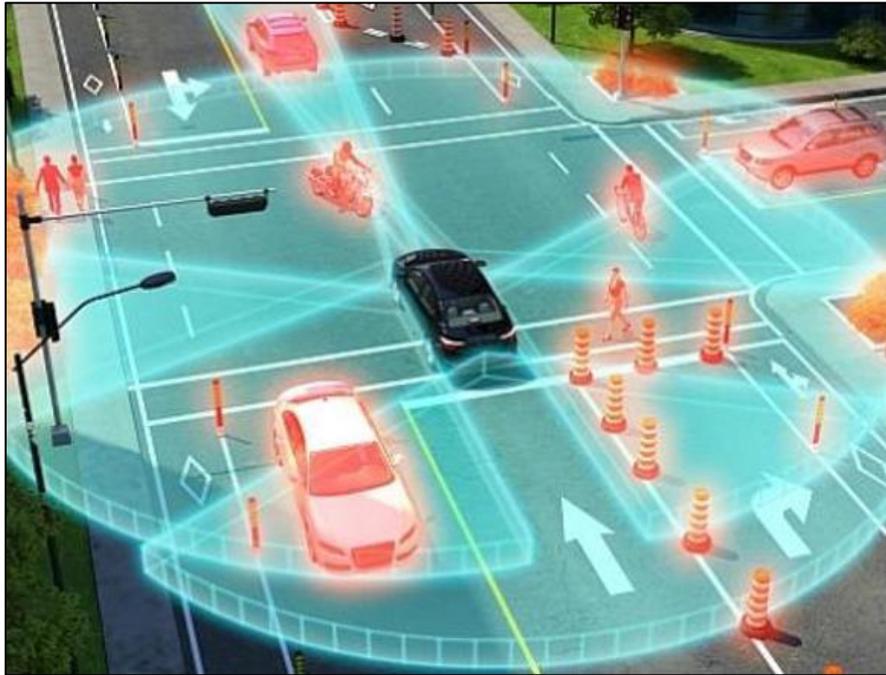
**Fig. 1-8: Classificazione radar [9]**

### 1.3.2 LIDAR

Lidar (acronimo dall'inglese di Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging) è una tecnica di telerilevamento che permette di determinare la distanza di un oggetto o di una superficie utilizzando un impulso laser, ma è anche in grado di determinare la concentrazione di specie chimiche nell'atmosfera e nelle distese d'acqua. Come per il radar, che al posto della luce utilizza onde radio, la distanza dell'oggetto è determinata misurando il tempo trascorso fra l'emissione dell'impulso e la ricezione del segnale riflesso.

La sorgente di un sistema lidar è un laser, ovvero un fascio coerente di luce a una precisa lunghezza d'onda, inviato verso il sistema da osservare. La tecnologia lidar ha applicazioni in geologia, sismologia, archeologia, rilevamento remoto e ora si sta diffondendo anche in ambito automotive per lo sviluppo di nuovi ADAS. La principale differenza fra lidar e radar è che il lidar usa lunghezze d'onda ultraviolette, nel visibile o nel vicino infrarosso; questo rende possibile localizzare e ricavare immagini e

informazioni su oggetti molto piccoli (vedi Fig. 1.9), di dimensioni pari alla lunghezza d'onda usata [10].



*Fig. 1-9: Campo visivo Lidar*

Affinché un oggetto rifletta un'onda elettromagnetica, deve produrre una discontinuità dielettrica; alle frequenze del radar (radio o microonde) un oggetto metallico produce una buona eco, ma gli oggetti non-metallici come pioggia e rocce producono riflessioni molto più deboli, e alcuni materiali non ne producono affatto, risultando invisibili ai radar. Questo vale soprattutto per oggetti molto piccoli come polveri, molecole e aerosol.

Per quanto riguarda l'ambito automotive, con l'avvento di sistemi ADAS che rientrano in livelli di automazione 3, 4, se non addirittura 5, i lidar dovrebbero svolgere un ruolo sempre più importante. L'integrazione di lidar offre una suite di sensori con prestazioni migliorate e la ridondanza necessaria per eseguire funzioni autonome a un livello sofisticato sfruttando opportuni algoritmi di fusione sensoriale.

I principali componenti che costituiscono un lidar sono:

- Laser scanner
- Clock ad elevata precisione
- GPS – misura della posizione dello scanner
- IMU – unità di misura inerziale (misura dell'orientamento rispetto al proprio sistema di riferimento)
- Un sistema di gestione dati

Si nota che la distanza  $D$  di un oggetto e la sua risoluzione  $\Delta D$  sono misurate come segue [11]:

$$D = c \frac{t}{2} \qquad \Delta D = c \frac{\Delta t}{2} \qquad \text{Eq. 1.2}$$

Dove:

- ✓  $c$ : velocità della luce (~300000 km/s ma variabile a seconda delle condizioni ambientali)
- ✓  $t$ : tempo trascorso tra invio dell'onda e ricezione dell'onda riflessa misurato attraverso il clock
- ✓  $\Delta t$ : risoluzione della misura di tempo, minimo intervallo di tempo misurabile ovvero il periodo del clock.

I lidar emettono impulsi con frequenze che vanno dai 50kHz ai 200kHz con lunghezze d'onda che rientrano nelle seguenti fasce:

- Infrarossi (1500 – 2000 nm)
- Vicino-infrarosso (1040 – 1060 nm)
- Blu-verde (500 – 600 nm)
- Ultravioletto (250 nm)

Risultano essere sicuri per la vista umana e dissipano poca potenza (si parla di potenze al di sotto di 1W). In base alla frequenza delle onde utilizzate avremo un diverso Range Massimo di non Ambiguità (MUR, Max Unambiguous Range, ovvero il range entro il quale è possibile riconoscere senza ambiguità i vari oggetti della scena). In Tabella 1-2 si osservano tutti i range rispetto alle frequenze utilizzate.

**Tabella 1-2 Frequenza – Range max Lidar**

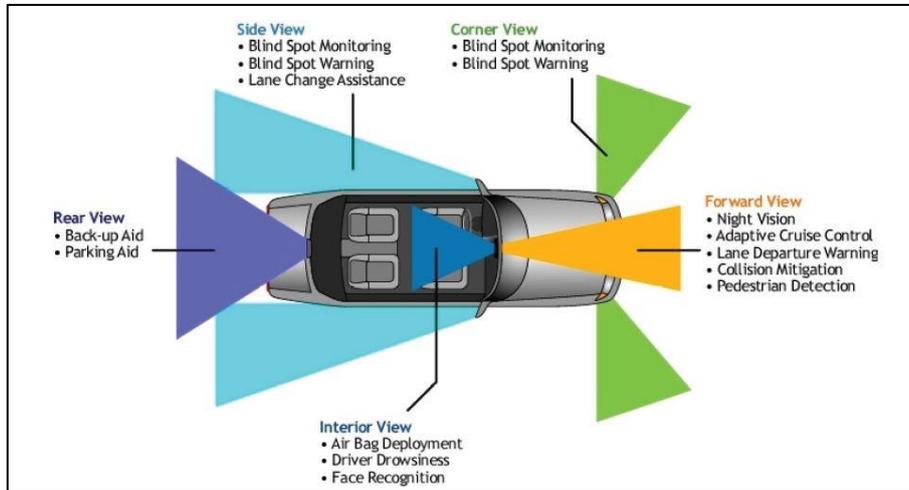
Frequenza (kHz)	Max Unambiguous Range (m)
<b>10</b>	14990
<b>71</b>	2111
<b>100</b>	1499
<b>167</b>	898

Altra proprietà fondamentale di uno strumento di questo tipo è il Field of View (FOV, campo visivo). Esso dipende dall'angolo di divergenza del fascio luminoso (l'angolo rispetto all'asse di propagazione). Field of View piccoli vengono usati per effettuare una mappatura accurata di piccole zone. Mentre i lidar con ampi Field of View sono utilizzati per campionamenti più completi e per rilevare più oggetti possibili anche se essi restituiscono un minore rapporto  $S/N$  (segnale rumore).

### 1.3.3 CAMERA

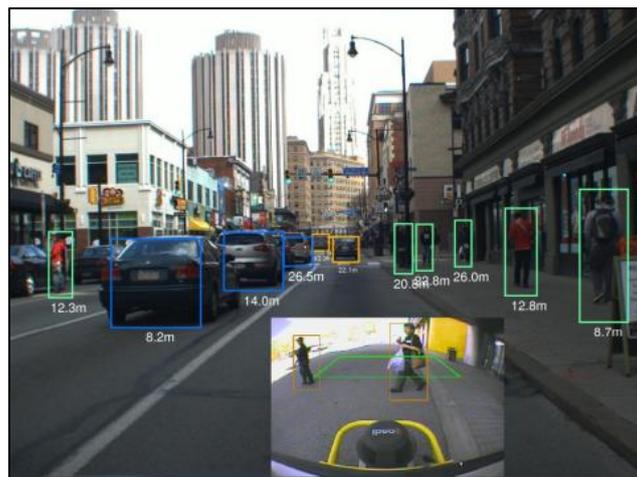
Le funzioni principali per cui vengono utilizzate le camere sono ovviamente quelle di registrare un'immagine e riconoscere all'interno di questa immagine oggetti d'interesse (pedoni, altri veicoli, ciclisti ecc.) e valutare la loro distanza dal veicolo su cui sono installati. Queste informazioni possono essere usate per progettare sistemi

come AEB, ACC ecc. In Fig. 1.10 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** [12] sono mostrate le possibili posizioni di una camera a bordo di un veicolo e i relativi sistemi che la utilizzano.



**Fig. 1-10: Posizionamento camere su veicolo**

Le camere giocano quindi un importante ruolo per i sistemi di sicurezza applicati all'automotive. Camere con tecnologie generiche non sempre sono adatte per tali sistemi; infatti, per poter lavorare correttamente in tali applicazioni devono rispettare requisiti stringenti. La camera deve essere in grado di eseguire le stesse funzioni di una camera generica in tutte le condizioni di intensità luminosa, per qualunque lunghezza d'onda della luce in scena e per qualunque velocità dell'oggetto da rilevare.



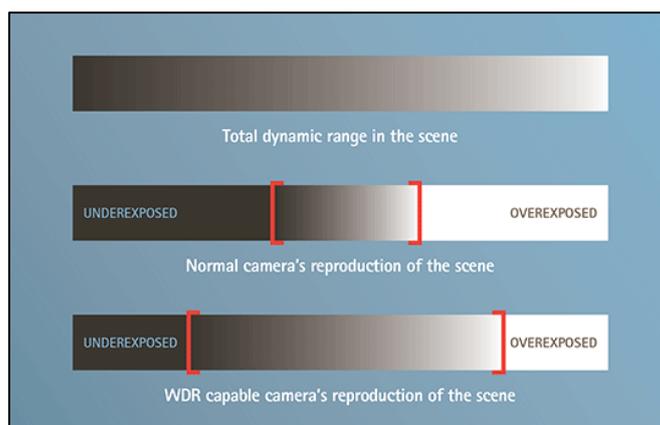
**Fig. 1-11: Riconoscimento pedone e veicoli camera**

**Tabella 1-3: requisiti per camere in automotive**

Proprietà	Descrizione	Requisiti
<b>Ampio range dinamico</b>	Capacità di operare sotto estreme condizioni di illuminazione, come ad esempio abbagliamento da parte di altri veicoli, entrate ed uscite dei tunnel ecc.	Dynamic range di minimo 120dB  Operatività in tutte le condizioni di illuminazione
<b>Elevata sensibilità di immagine</b>	Una camera con elevata sensibilità permette di catturare buone immagini con poca luce	Bassa sensibilità alla luce
<b>Elevata sensibilità per il vicino infrarosso</b>	La sensibilità alle lunghezze d'onda del vicino infrarosso (NIR) consente alla fotocamera di catturare lunghezze d'onda presenti nel cielo notturno.	Sensibilità nel vicino infrarosso
<b>Realizzabilità e conformità agli standard di qualità dell'automotive</b>	Costruite e testate secondo l'ISO/TS16949	Garantisce 15 anni di operatività in condizioni estreme;  Stringenti controlli di qualità durante la produzione
<b>Basso costo complessivo del sistema di sicurezza</b>	Sistemi per automotive che comprendono camere devono essere disponibili a basso costo	Camera configurabile per essere usata per più applicazioni;  Formati video comuni

In Fig. 1.11 si vede un esempio di riconoscimento di pedoni effettuata da una camera frontale installata a bordo del veicolo. In Tabella 1-3 è possibile osservare una sintesi di tutti i requisiti necessari per camere in automotive.

Il range dinamico della camera è il rapporto tra l'intensità luminosa più elevata e quella più piccola che il sensore riesce a catturare nello stesso istante. Per camere standard è di circa 60dB, per camere utilizzate in automotive deve raggiungere valori nell'intorno dei 120dB. Si parla così di telecamere ad ampio range dinamico (WDR, Wide Dynamic Range).



**Fig. 1-12: differenza tra camere standard e camere WDR**

Le principali tecnologie utilizzate per lo sviluppo di camere in automotive sono: CCD e CMOS.

Per quanto riguarda le camere basate su tecnologia CCD (Charge Coupled Devices), la maggior parte non soddisfa le richieste descritte in Tabella 1-3 riguardo il range dinamico. I sensori di immagini CCD standard sono progettati per “letture seriali”, ciò significa che tutti i pixel precedenti devono essere letti prima di poter leggere il successivo. Questo tipo di architettura limita la frequenza dei frame il che rappresenta uno svantaggio significativo per applicazioni automotive dove la cattura veloce di immagini è fondamentale.

Altri due inconvenienti della tecnologia CCD sono:

- Limitato *subsampling*, sotto-campionamento. Questo fenomeno, che non viene sfruttato a pieno dai CCD, permette di restituire un’immagine simile a quella originale, con qualche dettaglio in meno. Ciò implica che ci saranno meno dati da trasferire e una velocità di frame più elevata.
- Limitato *sub-windowing*, selezioni di porzioni dell’immagine. Analogamente questo processo permette di selezionare solo una porzione di interesse di un’intera immagine per diminuire il volume di dati da trasferire e aumentare la velocità di frame. Questa tecnica, così come quella precedente, non viene sfruttata al meglio dalla tecnologia CCD.

In merito alle camere basate su tecnologia CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) invece si può affermare che sono capaci di soddisfare le richieste di largo range dinamico, elevata sensibilità d’immagine e largo range spettrale. I sensori d’immagine con tecnologia CMOS utilizzano una tecnica di lettura casuale, ovvero i pixel possono essere indirizzati casualmente aumentando così la velocità dei frame. Ciò permette di migliorare notevolmente i processi di subsampling e sub-windowing rispetto alla tecnologia CCD. Date queste osservazioni la tecnologia più utilizzata in ambito automotive è certamente quella basata su CMOS.



*Fig. 1-13: CCD vs CMOS*

La Fig. 1.13 riprende la stessa scena (l'uscita di un tunnel ripresa di giorno) inquadrata da una camera basata su CCD e una camera WDR basata su CMOS.

#### 1.4 Smart Roads

Numerosi studi a livello europeo si sono occupati negli anni più recenti dell'automazione nella guida e della possibilità di connettere le infrastrutture stradali con i veicoli ed i veicoli tra di loro.

A livello istituzionale, i Ministri dei trasporti dell'Unione europea hanno sottoscritto il 15 aprile 2016, in occasione di una riunione informale durante la presidenza di turno olandese, una dichiarazione sulla cooperazione nel campo della guida autonoma (Declaration of Amsterdam on cooperation in the field of connected and automated driving). Con la Dichiarazione di Amsterdam i Ministri UE hanno definito un'agenda comune per perseguire e sviluppare ulteriormente, insieme con tutti i soggetti interessati una serie di obiettivi condivisi, per l'introduzione delle auto connesse e automatizzate entro il 2019. Nello specifico, l'agenda congiunta prevede lo sviluppo di regole e standard coerenti a livello internazionale, europeo e nazionale per consentire l'uso transfrontaliero delle auto connesse, un lavoro sull'utilizzo dei dati e allo stesso tempo sul rispetto della *privacy*, nonché sulla sicurezza.

Anche l'Italia accelera sulle strade del futuro. Il Ministero delle infrastrutture e trasporti, infatti, ha promosso il 22 giugno 2016 un incontro di approfondimento sul tema "Smart Road, veicoli connessi e mobilità del futuro", finalizzato allo studio delle possibilità di trasformazione digitale delle infrastrutture di trasporto. Nel corso dell'incontro è stato in particolare presentato un *documento sulle Smart Road*, considerate come l'insieme delle infrastrutture stradali che integrano l'innovazione con sensori *road-side*, misure e metodi di elaborazione per rendere più estesi, fruibili ed

efficienti i sistemi di governo e gestione della circolazione ed i comportamenti di mobilità e di viaggio.

Il documento evidenzia l'evoluzione verso una progressiva sostituzione tecnologica del ruolo del guidatore, visto essenzialmente come mediatore tra veicolo e infrastruttura ed evidenzia pertanto la necessità di un adeguamento tecnologico del patrimonio stradale alle nuove dotazioni tecnologiche attraverso un percorso di trasformazione digitale. Le *Smart Road* si configurano quindi come l'insieme di infrastrutture stradali che punta ai due obiettivi fondamentali di sostenibilità e miglioramento della qualità della vita, utilizzando, in aggiunta agli strumenti tradizionali, l'innovazione e l'inclusione.

Le *Smart Road* consentiranno di attivare un uso proattivo della tecnologia integrata all'interno dell'infrastruttura, aumentandone la resilienza e la gestione ottimale, potendone variare le caratteristiche prestazionali sulla base di input precisi. Le nuove tecnologie permettono, infatti, di ottenere una grande quantità di dati sullo stato delle infrastrutture e del traffico, informazioni che potranno essere messe a disposizione dei gestori, dei viaggiatori e dei fornitori di servizi. L'uso intelligente di questa massa imponente di informazioni, reso possibile anch'esso dalle nuove tecnologie, permette poi di creare nuovi strumenti di gestione ottimizzati (che, occorre notare, contribuiscono a sostenibilità e qualità della vita). Le infrastrutture sono, inoltre, di fondamentale importanza per il monitoraggio del territorio, rappresentando il telaio diagnostico su cui far viaggiare le informazioni. È necessario consolidare la logica della convergenza tra reti ed informazioni, anche per aggregare in maniera efficiente i dati sui rilevamenti territoriali.

Infine, in funzione delle informazioni raccolte sulle strade, sarà possibile fornire alcuni servizi, in tempo reale, verso *device* di bordo o verso gli *smartphone* degli utenti.

### 1.5 Tecniche di testing dei sistemi ADAS

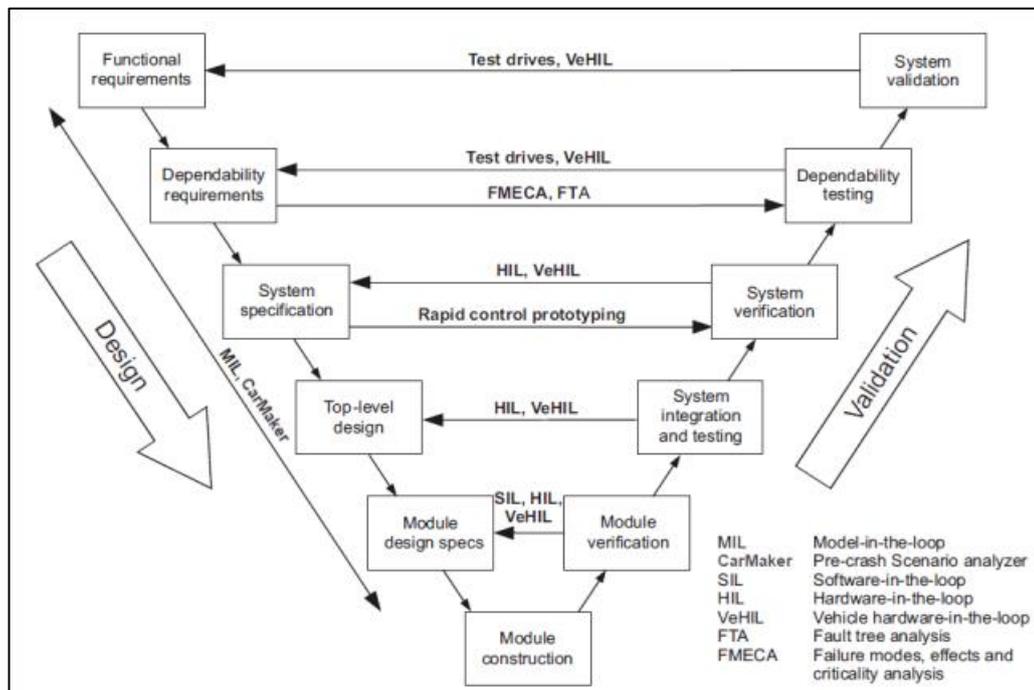
Lo standard ISO 26262 "Road vehicles – Functional safety" richiede al costruttore di dimostrare oggettivamente il raggiungimento dei livelli di sicurezza richiesti, attraverso processi di Verifica e Validazione dei componenti e prodotti elettrici ed elettronici E/E.

La dimostrazione di conformità richiede:

1. attività di verifica e validazione attraverso un modello denominato V Cycle, al fine di dimostrare la conformità ai requisiti della ISO 26262;
2. audit di sicurezza funzionale con l'obiettivo di valutare la corretta implementazione dei processi organizzativi richiesti per la sicurezza funzionale;
3. attività di assessment al fine di valutare il raggiungimento dei target per ciascuna funzione di sicurezza.

Nel settore automobilistico, la gestione delle diverse fasi nella produzione di sistemi mecatronici critici per la sicurezza è spesso collegata all'impiego del

diagramma del ciclo "V". Come illustrato nella Figura 1.14, questo diagramma utilizza una procedura top-down per la progettazione e una procedura bottom-up per la validazione, anche se in realtà il processo di produzione non segue rigorosamente tutti i passaggi in questo ordine, ma di solito passa su diversi loop di iterazione.



**Fig. 1-14: V Cycle tipico per sistemi mecatronici in ambito Automotive**

Durante ogni fase di test è importante verificare se l'output soddisfa le sue specifiche. Questa procedura è chiamata "verifica" e potrebbe essere condotta, ad esempio, per testare la portata, l'accuratezza e la precisione dei sensori ambientali, ma anche per garantire l'integrazione con altri sottosistemi di modelli.

Poiché la verifica stabilisce solo la conformità corretta tra l'output in fase e le specifiche del modello, se in tale specifica è presente un errore, ciò potrebbe portare a un prodotto difettoso. Inoltre, se dopo la progettazione viene identificato un guasto, è più difficile cercare la causa principale, rischiando anche di giungere a una conclusione errata. Per questo motivo è importante attuare la "validazione" del sistema in prova rispetto ai suoi requisiti.

Tuttavia, la validazione di un modello fault-tolerant rispetto ai suoi requisiti di affidabilità non è così facile. Effettivamente, testare tutti i potenziali elementi di guasto e riprodurre tutte le condizioni di prova in cui agisce il sistema di controllo è un processo che richiede molto tempo.

Di conseguenza, solo una stima parziale dell'affidabilità del sistema può essere fornita senza un prototipo fisico e, pertanto, dopo le corrette correzioni fornite dai risultati delle fasi di verifica e convalida, il processo di sviluppo viene ripetuto per un altro ciclo, reiterando i test. È stato valutato che la verifica e la convalida di un sistema ADAS potrebbe costare fino al 50% del budget totale di sviluppo e quindi, per questo motivo, l'obiettivo dei produttori di automobili è di ridurre il numero di volte in cui un test viene eseguito per accelerare il processo.

Durante le prime fasi dello sviluppo di ADAS, il prodotto viene prima modellato e testato utilizzando simulatori. I test virtuali hanno una ripetibilità assoluta, utilizzando sempre le stesse condizioni e senza danneggiare l'hardware. Inoltre, l'intera disponibilità del modello hardware consente di eseguire iniezioni di guasti completi, funzionalità di debug e monitoraggio aggiuntivi durante i test. Anche se le simulazioni aggiungono costi ulteriori (strumenti, sviluppatori, risorse computazionali), i test virtuali sono molto meno costosi dei test su strada reali, dal momento che un singolo test fisico vale più di un migliaio di test virtuali. Un altro aspetto è la crescente funzionalità critica per la sicurezza di ADAS, ad es. questi sistemi possono eseguire azioni che mettono in pericolo i conducenti e gli altri utenti della strada, ma possono anche causare notevoli danni materiali e quindi non dovrebbero essere testati su strade prima che estese simulazioni abbiano verificato che le funzioni siano affidabili.

Tuttavia, le simulazioni possono sorgere prima di un prototipo fisico o anche prima che il progetto sia completato, e quindi i modelli dipendono dai dati raccolti dai test di sviluppo del processo corrente o da sistemi precedenti simili. Per questo motivo, una simulazione spesso non è in grado di determinare le modalità di errore "inattese", tipiche dei test fisici. Inoltre, solitamente i simulatori virtuali hanno interfacce incompatibili tra diversi strumenti; è difficile integrare modelli di diversi fornitori e, come afferma Karim Mikkiche, del gruppo Renault, "le tecniche digitali non sono ancora capaci di modellare con precisione tutti i parametri del veicolo, come il modo in cui le condizioni di illuminazione possono influenzare una telecamera di rilevamento o la risposta di dispersione di un sistema di frenatura". Un altro limite dei simulatori è che è difficile prevedere il comportamento dei nuovi materiali usati (che stanno comparando nel campo automobilistico in sostituzione di quelli convenzionali) in condizioni di stress; inoltre, all'aumentare della complessità del design, aumenta la difficoltà per il simulatore di ottenere risultati corretti, poiché la sua accuratezza si basa sulla capacità computazionale. Quindi, anche se la maggior parte delle volte i test virtuali hanno una parte significativa nel processo di sviluppo del sistema, mentre i test fisici sono utilizzati solo per verificare assunzioni e calcoli fatti virtualmente, è altrettanto chiaro che una simulazione non può sostituire completamente un test fisico.

#### 1.5.1 Configurazioni di validazione: simulazioni In-the-loop

Per progettare e validare gli ADAS sono presenti diverse tecniche di simulazione 'in the loop' nel settore automobilistico, al fine di avere test rapidi, flessibili e ripetibili.

La prima configurazione e il test iniziale degli ADAS sono soddisfatti da simulazioni Model-in-the-loop (MIL), in cui il veicolo (automobile) e il controller (logica di sistema) sono riprodotti su un PC. I software di simulazione, come CarSim, CarMaker, PreScan, ecc., vengono utilizzati per testare il modello in vari scenari. Di solito tutti questi programmi contengono:

- Elementi dell'ambiente: strade, edifici o altri oggetti stradali.
- Traffic actors: automobili, camion, motocicli, ecc., ma anche pedoni e altri utenti della strada.
- Tutti i dispositivi e le dinamiche del veicolo in prova: ogni elemento della vettura è modellato, dai sensori agli pneumatici delle auto.
- Un modulo contenente la logica ADAS effettiva, compresa l'elaborazione del sensore e le azioni comportamentali. Questo componente può anche essere implementato usando Matlab/Simulink, esportandolo in un ambiente run-time.

Dopo che le simulazioni MIL hanno dato risultati significativi, il codice del software del controller può essere ottenuto e compilato utilizzando la generazione automatica del codice. In questa fase, chiamata software-in-the-loop (SIL), il codice reale viene sviluppato e testato a seconda del processore o FPGA che verrà utilizzato per l'implementazione hardware finale. A questo punto, l'impianto e il controller sono ancora simulati nel PC con modelli software.

Una volta che il controller è stato convalidato attraverso simulazioni SIL, il codice sviluppato viene caricato nel processore/FPGA effettivo. In questo modo, durante la fase di processor-in-the-loop (PIL), il controller ADAS viene testato con hardware in tempo reale, mentre il veicolo è ancora simulato nel PC. Come per qualsiasi passaggio, se durante una fase si verificano errori o guasti, è necessario tornare alla fase precedente, altrimenti è possibile procedere con la procedura successiva.

La simulazione HIL (Hardware-in-the-loop) può essere considerata uno dei passaggi più importanti nei test di controllo ADAS, poiché durante questa fase l'intero sistema viene eseguito in hardware in tempo reale. I componenti possono essere reali (come per il controller che può essere la centralina reale) o emulati (come per il veicolo, sostituendolo con una periferica che ha le stesse caratteristiche di ingresso e uscita). In questo modo, la validazione dell'hardware può avvenire prima che un prototipo di veicolo sia pronto, dal momento che qualsiasi elemento del veicolo aggiuntivo può essere simulato. Prima di implementare l'ADAS su un'auto reale, la simulazione HIL consente di combinare la flessibilità e la ripetibilità di una simulazione con un hardware sicuro e affidabile. Inoltre, il test può essere condotto senza influenze da altri sistemi separati, mentre l'accuratezza della logica del modello può essere valutata mediante l'introduzione controllata di disturbi, denominata iniezione di guasti (fault injection).

I test reali sono spesso costosi, lunghi e difficili da ripetere con le stesse condizioni. Una soluzione per combinare i vantaggi delle simulazioni virtuali con quelli dei veri test drive può essere descritta dal Vehicle hardware in the loop (VeHIL). Come mostrato nella Figura 1.15, VeHIL può essere eseguito in un laboratorio al coperto, dove sono presenti alcuni veicoli reali. Il veicolo in prova viene installato su un banco dinamometrico, mentre davanti viene posizionata un'altra macchina, che può essere rappresentata da una specifica base mobile. Tutti i sensori del veicolo sono presenti, raccolgono i dati relativi al moto tra le due auto e li combinano con il movimento assoluto degli attori in uno scenario di traffico in tempo reale, che viene proiettato su un display di fronte al veicolo in prova. Inoltre, è possibile utilizzare diverse interfacce uomo-macchina (HMI) per mostrare l'output del sistema.



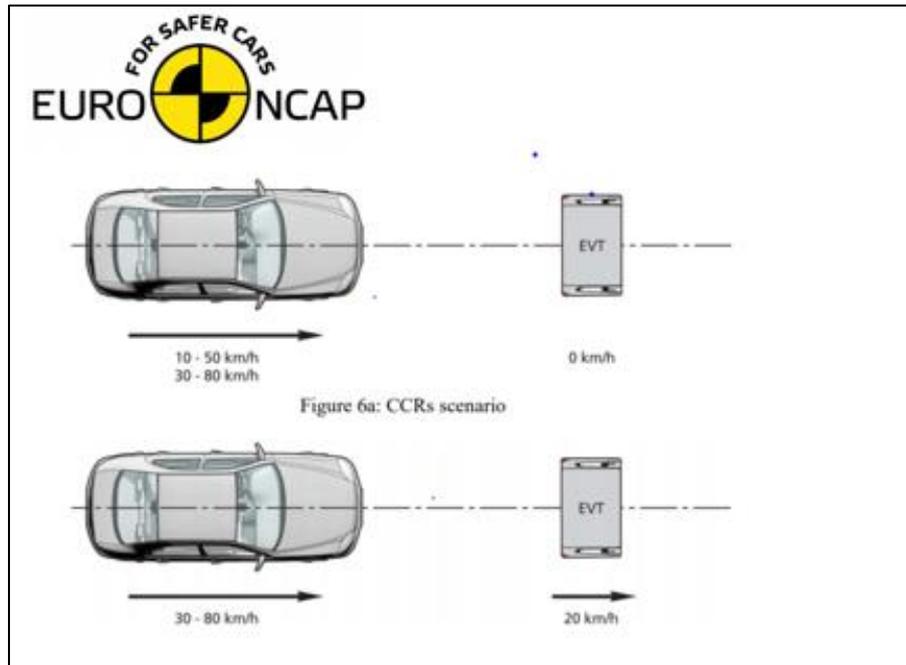
*Fig. 1-15: VeHIL laboratorio di testing*

Dunque, I test di simulazione VeHIL riproducono scenari di test con potenziali rischi per la sicurezza nei test su strada e testano ADAS e funzioni di pilota automatico in diversi scenari reali. Il concetto di virtual Vehicle Hardware in the loop (vVeHIL) riproduce, invece, questi scenari in ambiente totalmente virtuale, con veicolo simulato e oggetti di traffico simulato ed è questa la tecnologia e approccio di test che verrà seguita in tale attività di ricerca.

### 1.5.2 Testing virtuali ad evento o in continuo

Esistono due metodologie di test che si possono applicare per la validazione in ambiente virtuale: quella tradizionale, che consiste nella validazione della logica ADAS mediante scenari ad evento, come gli scenari EURO NCAP per l'AEB e ACC e una validazione attraverso test in continuo, che è una tecnica di validazione emergente in cui migliaia di usecases e scenari vengono creati e modellati; tale metodologia di test unisce l'HIL convenzionale ad un ambiente virtuale e ad un software di simulazione del traffico.

Nel caso di testing tradizionale la valutazione della sicurezza passa attraverso una serie di test ideati ed eseguiti da Euro NCAP (European New Car Assessment Programme). I test rappresentano scenari di collisioni che potrebbero causare il ferimento o anche la morte degli occupanti del veicolo o di altri utenti della strada.



**Fig. 1-16: Esempio scenario di testing ad evento Euro NCAP**

La metodologia che si svilupperà in tale attività di ricerca si baserà sulla validazione di testing in continuo, testando in real-time innumerevoli scenari che si susseguono in maniera randomica, senza predisporre alcuna manovra come viene effettuato nel caso di test di scenari ad evento.

Uno dei più grandi problemi che nasce attraverso la validazione in continuo di sistemi ADAS è il “data harvesting”: girando in real-time per milioni di km, milioni di dati si generano e la gestione di questi rappresenta un’enorme sfida in termini di gestione dati acquisiti per testare i sottosistemi ADAS. Infatti, come dati da gestire, si può considerare che logiche di livello SAE 2-3 hanno, come requisito tipico per la validazione e il testing, la validazione lungo un percorso di 200.000 km per ogni milione di km di dati del mondo reale, che devono essere acquisiti da una flotta di veicoli di prova. Per l'automazione di livello 4 saranno necessari oltre 2 milioni di km di dati e avvicinandosi al livello 5 (veicoli completamente autonomi), questo dato aumenterà a circa 240 milioni di km.

Di conseguenza, la gestione dei dati durante i cicli di simulazione assume un ruolo fondamentale per adoperare una metodologia di testing in continuo in ambiente vVeHIL.

### 1.5.3 I modelli di simulazione del traffico

Nel testing di scenari in continuo nasce l'esigenza di collegare un adeguato modello di simulazione del traffico, con lo scopo di rappresentare dettagliatamente il comportamento dei veicoli presenti in uno scenario virtuale di traffico.

Nel campo dei trasporti la funzionalità di una infrastruttura viaria è influenzata da un aspetto cardine: il casuale comportamento degli utenti. Il reale comportamento di un guidatore, infatti, è una variabile che dipende da molti elementi, spesso non quantificabili o controllabili, come lo stile di guida, la motivazione dello spostamento, il livello di stress accumulato, l'ambiente di guida. Appare evidente, dunque, che il funzionamento di una rete di trasporto non può essere ricondotto a leggi definibili in modo rigoroso, come avviene nel mondo fisico, ma risulta influenzato da fattori economici, sociali e ambientali.

Obiettivo dei modelli di simulazione è proprio quello di descrivere, attraverso espressioni matematiche, il comportamento umano, al fine di ottenere una rappresentazione verosimile della realtà, che possa agevolare lo studio degli effetti prodotti da interventi infrastrutturali e gestionali, su reti più o meno complesse.

Individuato il modello che più si addice al caso di studio e calibrati i parametri che in esso compaiono, sarà sufficiente implementare il tutto su un software commerciale (simulatore di traffico), per riprodurre le condizioni che più si avvicinano alla realtà.

La possibilità di poter simulare il comportamento del traffico, sia in termini spaziali che temporali, all'interno di una rete, comporta notevoli benefici:

- riduzione dei costi: la simulazione consente di sperimentare soluzioni progettuali già in fase di pianificazione, anziché direttamente sul sistema reale. Ciò consente di prevedere errori prima ancora che questi vengano commessi ed evitare dispendi economici eccessivi dovuti a scelte non ottimali;
- possibilità di osservare più volte il fenomeno: la simulazione offre la possibilità di ripetere più volte il fenomeno, facendo variare le condizioni iniziali e i dati in input, nonché confrontare i risultati ottenuti e comprendere più a fondo le dinamiche dell'evento;
- riduzione dei tempi: tramite un simulatore è possibile, in pochi minuti, eseguire sperimentazioni ed esaminare diversi scenari di studio.
- possibilità di proporre soluzioni più rischiose e innovative: venendo meno il rischio di un fallimento o di un errore, la simulazione favorisce ed incoraggia

le idee più innovative che possono essere facilmente messe in pratica e verificate su software invece che direttamente sul campo.

I modelli di simulazione possono essere classificati in base alla gestione delle variabili temporali o alla scala di applicazione.

Relativamente alla gestione della variabile “tempo” possiamo definire:

- *modelli statici*: riproducono il comportamento di un sistema in condizioni di riposo/equilibrio, indipendentemente dal tempo. Si assume, come principio di fondo, che i parametri del traffico non subiscano variazioni per un fissato intervallo temporale. Questi modelli descrivono perciò un comportamento medio del sistema.
- *modelli dinamici*: descrivono l’evolversi di un fenomeno nel tempo, tenendo conto della variabilità temporale dei parametri del traffico. Ciò consente di ottenere una rappresentazione continua e più realistica del comportamento del sistema.

In funzione della scala di applicazione, i modelli di simulazione si classificano in:

- *modelli macroscopici*: il flusso veicolare viene analizzato da un punto di vista globale, in analogia al deflusso dei fluidi. Le relazioni utilizzate sono, infatti, tipiche della fluidodinamica ma applicate al traffico; i parametri fondamentali che entrano in gioco sono i flussi, la velocità e la densità relativamente ad una intera corrente veicolare.
- *modelli mesoscopici*: la corrente veicolare viene trattata ad un livello di aggregazione intermedio; sostanzialmente i veicoli vengono considerati in gruppi omogenei. Tali modelli forniscono, in termini probabilistici, per i vari “pacchetti” di veicoli, la variabilità dei parametri del deflusso.
- *modelli microscopici*: descrivono il comportamento dei singoli veicoli come risultato di scelte individuali legate alle interazioni con gli altri veicoli e con l’ambiente stradale. Ai parametri di deflusso si aggiungono i fattori che influenzano la scelta di percorso, il cambio di velocità, cambio di corsia, stile di guida, tempo di percezione e reazione, velocità desiderata, ecc.

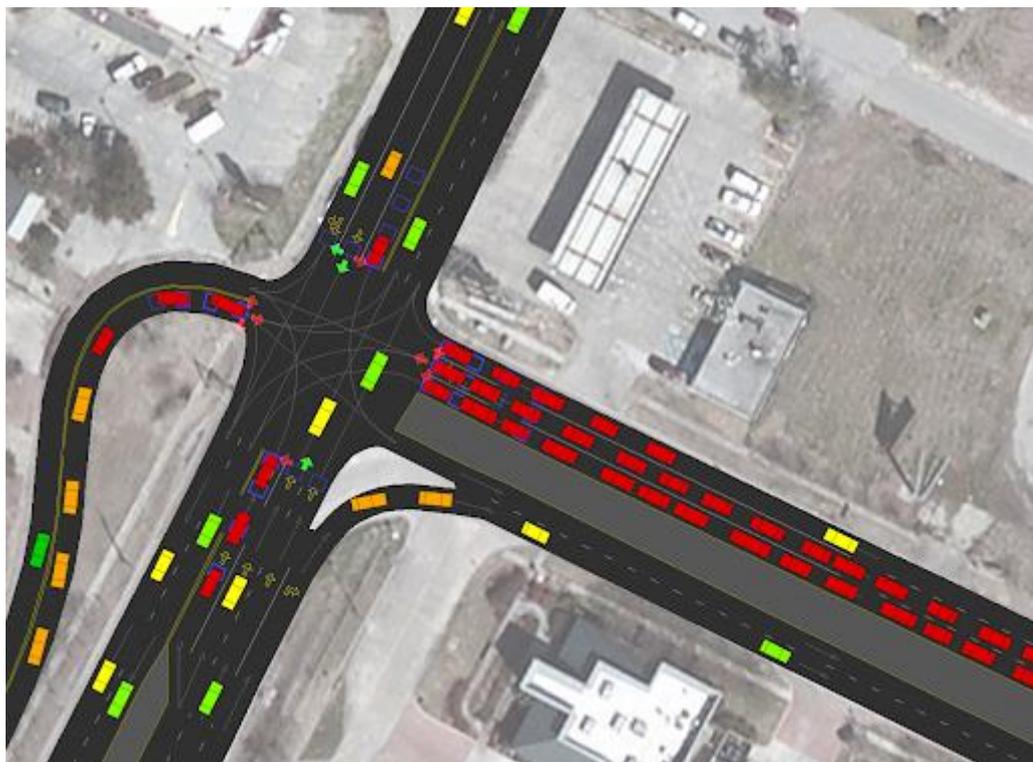
#### 1.5.4 I modelli di simulazione microscopici del traffico

Si parla di microsimulazione se si desidera ricostruire l’evoluzione del traffico studiando la singola unità. Nello specifico, i modelli di microsimulazione (modelli disaggregati) simulano il movimento e le traiettorie dei singoli veicoli, consentendo di rappresentare in maniera puntuale, precisa e specifica il traffico e la sua evoluzione, istante per istante. A tal proposito, si dovranno tenere in considerazione gli aspetti geometrici di dettaglio dell’infrastruttura, nonché il comportamento reale del conducente, legato all’accoppiamento delle caratteristiche del veicolo e del guidatore.

In sostanza, tali modelli di simulazione rappresentano il traffico stradale ad un livello di dettaglio molto elevato. Permettono di simulare lo spostamento di ogni veicolo della rete (rappresentazione della velocità, dell'accelerazione, etc.) e tutte le sue interazioni con gli altri veicoli della rete (sorpassi, cambi di corsia, etc.). Fra tutti i modelli di simulazione, i microscopici, sono quelli che consentono un maggiore dettaglio significativo; tuttavia, essi presentano anche un livello di complessità molto elevato.

Infatti, solo recentemente, grazie all'incremento delle potenzialità computazionali, i modelli di microsimulazione sono diventati mezzi di analisi interessanti, in grado di lavorare con un'elevata risoluzione sia temporale che spaziale.

Tuttavia, vista l'elevata quantità di dati che tali modelli richiedono e producono, (basti pensare a simulazioni dove si considerano le attività giornaliere di più di un milione di persone) è possibile applicarli generalmente a reti di dimensioni ridotte, per le quali non è necessario impegnare notevoli risorse di calcolo sia in termini di memoria disponibile che di velocità di esecuzione. In Figura 1.17 si riporta una raffigurazione di esempio di uno scenario ottenuto mediante un software di simulazione del traffico.



*Fig. 1-17: Esempio scenario di un software di simulazione del traffico microscopico*

Nei modelli microscopici, quindi, l'unità di traffico non è intesa come una particella di un mezzo continuo, ma come un elemento capace di assumere decisioni sulla base di uno schema prefissato di regole.

In generale gli aspetti che riguardano il comportamento del guidatore in un modello microscopico sono duplici:

- un aspetto longitudinale, che riguarda l'accelerazione, il mantenimento della velocità e della distanza desiderata dal veicolo che precede, generalmente identificati come *car-following*;
- un aspetto trasversale, che riguarda il cambio di corsia ed il sorpasso, generalmente identificati come *lane-changing*.

La gestione dei due aspetti longitudinale e trasversale da parte del guidatore, ossia operando una decisione di *car-following* scegliendo velocità e accelerazione in modo da evitare la collisione con il veicolo precedente, ovvero effettuando un *lane-changing* per evitare il condizionamento del veicolo precedente, sono regolate da una ulteriore decisione, generalmente identificata come *gap-acceptance*. Rispetto a tale decisione, infatti, il guidatore subordina l'azione alla ricerca ed individuazione di situazioni accettabili per il passaggio nella corsia adiacente.

## 1.6 C-ITS e applicazioni V2X

I sistemi di trasporto intelligenti (Intelligent Transport Systems, ITS) sono quelle applicazioni avanzate che, pur se non provviste di intelligenza in senso proprio, mirano a fornire servizi ad alta innovazione relativi alle diverse modalità di trasporto e alla gestione del traffico, garantendo agli utenti una maggiore informazione e un uso più coordinato ed efficiente delle reti. In altre parole, gli ITS integrano le telecomunicazioni, l'elettronica e le tecnologie dell'informazione con l'ingegneria dei trasporti allo scopo di pianificare, progettare, rendere operativi e gestire i sistemi di trasporto, migliorando le prestazioni ambientali, l'efficienza e la sicurezza del trasporto stradale ed assicurando al tempo stesso il funzionamento del mercato interno, nonché maggiori livelli di competitività e di occupazione.

All'interno dei sistemi ITS assumono particolare rilievo i C-ITS (Cooperative Intelligent Transport Systems), che rappresentano l'insieme di tecnologie ed elementi funzionali che consentono compiti di comunicazione specifici identificati come servizi di comunicazione V2X (cioè, veicolo per tutto). La "X" in V2X può identificare un altro veicolo (ad esempio, comunicazione V2V) o l'infrastruttura (cioè comunicazione V2I). In alcuni approcci, "X" viene utilizzato anche per identificare il cloud.

Una delle applicazioni più ovvie della connettività V2X è nei veicoli autonomi. La comunicazione tra veicoli è una componente chiave per un futuro di successo per questo concetto complicato. Tuttavia, un futuro in cui le auto a guida automatica

dominino le strade non è sicuro, né è chiaro quando diventerà realtà. Nel frattempo, la comunicazione V2X trova impiego nei sistemi di assistenza alla guida.

Le applicazioni V2X consentono di avere la piena consapevolezza di quello che accade nei pressi della vettura, entro un raggio d'azione sicuramente maggiore rispetto a quello che l'occhio umano può garantire. Sulla base delle indicazioni ricevute, il conducente dovrà adattare la sua guida affinché risulti agevole e sicura.

V2X Applications	
•	Emergency Electronic Brake Light (EEBL)
•	Stationary Vehicle Ahead (SVA)
•	Hazard Location Warning (HLW, CAMP definition) / Adverse weather Warning (C2C definition)
•	Intersection Collision Warning (ICW)
○	Intersection movement Assist (IMA)
○	Rear Cross Traffic Assist (RCTA)
•	Forward Collision Warning (FCW)
•	Left/Right Turn Assist (LTA)
•	Lane Change Warning (LCW)
○	Blind spot Warning (BSW)
○	Motorcycle approaching Warning (MAW)
•	Do Not Pass Warning (DNPW)
•	Speed Compliance (SC, SPD-COMP, SPD-COMP / Work Zone)
•	Curve Speed Warning (CSW)
•	Oversized compliance (OVC)
•	Evacuation/Emergency notification
•	Spot Specific Weather Warning (ICE)
•	Transit/Freight Signal Priority (TSP) (FSP)
•	Road Work Warning (RWW)
•	Green Light Optimization Speed Advisory (GLOSA)
•	Signal Violation Warning (SVW)
•	In Vehicle Signage (IVS)
•	Traffic Jam Ahead (TJA)
•	Emergency Vehicle Warning (EVW)

*Fig. 1-18: Applicazioni V2X*

Le informazioni vengono scambiate, mediante messaggi ciclici o ad evento, che raggiungono la vettura via etere, nel rispetto del protocollo Wi-Fi 802.11p. Una On Board Unit (OBU) montata su vettura, e una Road Side Unit (RSU) posizionata su strada, garantiscono questo tipo di servizio, entro una zona il cui raggio d'azione è fissato dalle capacità di invio e ricezione dei dispositivi.

Dunque, i sistemi C-ITS includono una maggiore efficienza del traffico e un miglioramento dell'esperienza di guida. In effetti, si presume che l'uso delle tecnologie V2X riduca la congestione e i compiti legati alla guida meno dipendenti dall'azione umana.

Di conseguenza, pensare ad una metodologia di testing di sistemi ADAS con un ambiente di simulazione del traffico necessita l'inclusione potenziale anche di tecnologie V2X e sistemi C-ITS, in quanto veicolo e infrastruttura bisogna immaginarli come entità non più disconnesse fra loro.

## 2 Metodologia di validazione

### 2.1 Schema funzionale a blocchi della piattaforma di testing ADAS

Una delle sfide principali dello sviluppo dei sistemi ADAS è la fase di test. È necessario coprire alcune centinaia di milioni di chilometri di prova per testare completamente un prototipo reale. Nel contesto della guida automatica, lo sviluppo della procedura di testing oggetto della ricerca, consente agli sviluppatori di testare i componenti ADAS e i sistemi completi in una fase iniziale. In questo modo è possibile rilevare precocemente eventuali difetti sistematici di implementazione o requisiti errati, apportare miglioramenti e integrarli nel sistema, in modo da risparmiare svariati chilometri di test.

Diversi approcci e metodi di test sono entrati in gioco per la validazione virtuale dei sistemi ADAS combinando diversi componenti tecnologici per la generazione di un framework o una piattaforma che collega ogni elemento.

Dal lavoro svolto da Abdelgawad et al. [13], ad esempio, è stata sviluppata una piattaforma di test scalabile per implementazioni di unità di controllo ADAS virtuali. Questa piattaforma è composta da un blocco di "ambiente di simulazione di guida" e uno di "framework di prototipazione virtuale ADAS". Il primo contiene un modello di dinamica del veicolo longitudinale e laterale sviluppato in MATLAB/Simulink a 16 g.d.l. e un modello di traffico (modello stradale, modelli di veicoli da traffico e scenario); il secondo un livello di riconoscimento, costituito da sensori reali (radar, telecamera) per rilevare strade ed elementi di traffico, un livello decisionale che incorpora la logica di controllo ADAS e un livello di implementazione per la simulazione fisica dell'implementazione (accelerazione, frenata, controllo laterale). Inoltre, è presente anche un blocco "Human Machine Interface (HMI)" che consente il collegamento di eventuali unità funzionali come volante, pedale e monitor. Attraverso questi elementi è stata eseguita la validazione dell'AEB e l'Emergency Steer Assist.

Nel lavoro svolto da un gruppo di ricerca COVADEC, composto da enti quali PSA, All4tec, Valeo, ESI, TIMA e Intempora [14], è stata sviluppata una metodologia per la validazione dei sistemi ADAS al fine di ottimizzare gli scenari di test e ridurre il numero di km di guida e lo sforzo necessario, coprendo i requisiti di sicurezza dettati dalla ISO 26262. È stato creato uno strumento che importa diversi testcases andando a generare test con un approccio statistico (MaTeLo - Markov Test Logic), attraverso lo strumento Model Based Testing (MBT). Mediante questa metodologia sono state testate le funzioni Lane Departure Warning (LDW) e Automatic Emergency Braking (AEB).

Una piattaforma di simulazione driver-vehicle-environment è progettata da Capgemini [15], una società che offre servizi di ingegneria. È una piattaforma modulare che include diversi elementi come: ambiente simulato, modello di conducente simulato, visualizzazione HMI, ECU virtualizzata, navigazione, veicolo simulato e le sue proprietà geometriche, sensori simulati, simulazione del traffico e registrazione dei

dati. Si tratta, tuttavia, di una definizione teorica della piattaforma, senza lo sviluppo delle modalità per implementarla. Si fa riferimento a un esempio di un sistema di test HIL che utilizza l'approccio basato su piattaforma per i test di fusione dei sensori, includendo la simulazione di segnali radar, lidar, V2X e telecamera attraverso la simulazione di test virtuali utilizzando IPG CarMaker e il software NI Veristand.

Nalic et al. [16] hanno sviluppato un framework di co-simulazione per la generazione automatizzata di scenari che contengono modelli di flusso di traffico, grazie ad un'opportuna calibrazione del modello basata su misurazioni realistiche del traffico. Consiste di tre strumenti software, la co-simulazione di un controller, la co-simulazione tra CarMaker e VISSIM e una post-elaborazione. Attraverso questo framework sono state testate le funzioni di Highway Chauffeur (HWC), che consiste nell'implementazione di funzioni ADAS che agiscono sulle dinamiche laterali e longitudinali, tramite Adaptive Cruise Control (ACC), Lane Keeping Assist (LKA) e Lane Change Assist (LCA). Sono stati testati 45425 km di test attraverso la generazione automatica di scenari di test e si sono verificate 26 collisioni e 378 quasi collisioni.

Quindi, come detto, sono state adoperate diverse metodologie per la validazione di sistemi ADAS attraverso tecniche di validazione mediante ambienti virtuali; in tutte queste tecniche, però, il modello di traffico non è considerato o non è modellato abbastanza bene da garantire un ambiente di traffico realistico. Inoltre, una piattaforma integrata che include la co-simulazione di un ambiente virtuale con un software di simulazione del traffico non è ben definita e non esiste una metodologia che consenta di testare le logiche utilizzando scenari casuali, simulando continuamente migliaia di chilometri, verificando la corretta esecuzione dei test.

Infatti, nel caso di testing in continuo è fondamentale considerare un elemento che controlli lo stato di esecuzione di uno scenario e che fornisca l'esito dello stesso, in quanto in tal caso, girando in real-time per milioni di km, si generano milioni di dati e la gestione di questi rappresenta un'enorme sfida in termini gestione dati acquisiti.

È per tale ragione che tale lavoro di ricerca si pone l'obiettivo della realizzazione di una piattaforma di testing per sistemi ADAS in cui sono presenti i seguenti elementi:

- un sistema X-il under test che include un eventuale simulatore real-time e una logica di controllo ADAS "telecaricata" su una ECU reale;
- un software di simulazione del traffico;
- la simulazione e modellazione di veicoli (modello di dinamica veicolo e modello di driver);
- un modello di ambiente virtuale 3D;
- un elemento che controlla lo stato di esecuzione di un determinato testcase.

Uno schematico della piattaforma considerata viene mostrato in Fig. 2.1:



**Fig. 2-1: ADAS testing platform**

A tale schema si aggiunge un elemento che controlla lo stato di esecuzione di un determinato testcase per la validazione della funzionalità ADAS e che fornisce l'esito dello stesso.

## 2.2 Approccio TCT per la creazione dell'elemento di "controllo"

La validazione di un sistema ADAS passa attraverso la sicurezza di un'infrastruttura ed è quindi legata a complesse interazioni uomo-strada-veicolo-ambiente stradale. Di conseguenza, testare una specifica funzionalità comporta l'analisi quantitativa della sicurezza stradale.

La sicurezza stradale viene valutata mediante l'analisi dell'incidentalità, che si basa a sua volta su rigorose metodologie statistiche, ma anche su processi di valutazione che consistono nella determinazione di misure delle cosiddette misure surrogate di sicurezza (surrogate safety measure).

Questi parametri possono supportare l'individuazione delle reali cause di un possibile sinistro e stabilire come un intervento sull'infrastruttura possa condizionare il processo che produce l'incidente. Ai fini della validazione e testing di una funzionalità ADAS possono essere sfruttati allo stesso modo per capire l'efficacia stessa della logica.

Infatti, le "Surrogate Safety Measures" (Misure di Surrogati della Sicurezza) considerate spesso come strumenti complementari alle analisi di incidentalità classiche, possono, invece, risultare essenziali grazie al loro potenziale nell'identificazione e nella misura del rischio incidentale e dunque nella valutazione del livello di sicurezza di una infrastruttura stradale e dell'efficacia della logica di AD.

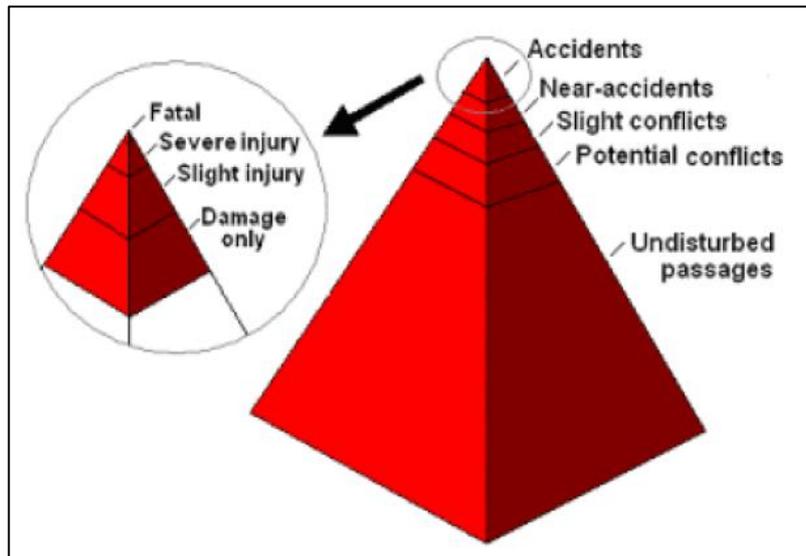
La misurazione dei parametri surrogati di sicurezza in real-time fa parte di un approccio all'analisi dell'incidentalità mediante tecnica dei conflitti di traffico (TCT). Si definisce conflitto una situazione osservabile in cui due o i più utenti della strada si avvicinano nello spazio e nel tempo a tal punto che vi è il rischio di scontro se i loro movimenti rimangono invariati.

La tecnica dei conflitti di traffico (TCT) è collegata alla capacità di registrare, direttamente sul traffico in tempo reale, situazioni vicine all'incidente ma che non si trasformino necessariamente in collisioni tra veicoli.

Tale approccio non necessita direttamente dell'osservazione dell'incidente e consente di ottenere una maggiore frequenza dei conflitti rispetto agli incidenti.

La tecnica dei conflitti di traffico si basa sulla misura di variabili oggettive spaziali e/o temporali, dette indicatori prossimali di sicurezza, che descrivono le interazioni tra due utenti della strada coinvolti in un evento critico per la sicurezza.

La prima istanza del concetto di conflitto stradale fu effettuata da Perkins e Harris nel 1968 [17], che considerava l'analisi dell'uso di azioni evasive da parte dei conducenti come un metodo efficace per valutare la sicurezza stradale. L'osservazione dei conflitti stradali come vicinanza temporale e/o spaziale è iniziata in Svezia con il lavoro di Amundsen, Hydén e altri ricercatori nel 1977 [18]. Diverse situazioni che possono verificarsi nei flussi di traffico sono state rappresentate nel 1987 da Hydén [19] in termini di "piramide delle prestazioni di sicurezza" (Fig. 2.2), che caratterizza la tecnica svedese dei conflitti di traffico.



*Fig. 2-2: Piramide di Hydén*

La piramide di Hydén rappresenta tutte le possibili interazioni, che vanno da eventi indisturbati più frequenti alla base della piramide a eventi a rischio meno frequenti più vicini al picco (cioè conflitti di traffico e incidenti). È logico supporre che una valutazione globale della sicurezza in un determinato luogo debba riflettere l'intero spettro di queste interazioni del veicolo poiché in alcuni casi "sfortunati" gli incidenti si possono generare vicino alla base della piramide dove le condizioni sono "potenzialmente" più sicure. I modelli di previsione degli arresti convenzionali incentrati sugli arresti segnalati (la parte superiore della piramide) non considerano le interazioni non sicure che non hanno "ancora" comportato arresti segnalabili.

Nella figura si distinguono:

- Passaggi indisturbati: l'utente della strada attraversa un punto di intersezione senza essere per nulla influenzato dalla presenza di un altro utente.
- Potenziale conflitto: due utenti della strada si avvicinano l'un l'altro in modo tale che, se uno dei due non intraprende un'azione immediata, il conflitto tra i due risulta imminente; gli utenti hanno un ampio margine per evitare la collisione.
- Conflitto lieve: due utenti della strada stanno avvicinandosi in modo tale che il rischio di un conflitto è molto probabile; il margine di tempo è abbastanza limitato e tale da richiedere un'azione evasiva per poter evitare l'incidente.
- Conflitto grave: due utenti della strada risultano coinvolti in una situazione tale da richiedere un intervento immediato al fine di evitare la collisione.

Le tecniche basate sul conflitto di traffico che hanno avuto origine dall'osservazione umana diretta dei conflitti di traffico sono state introdotte e applicate nella simulazione del traffico per valutare i livelli di prestazione di sicurezza.

La simulazione microscopica del traffico (la cui definizione è stata dettagliata nel capitolo precedente), applicata per stabilire i livelli di sicurezza del traffico stradale, con l'uso di conflitti di traffico e/o altre misure di sicurezza surrogate che possono essere calcolate sulle traiettorie dei veicoli, è stata un argomento di ricerca crescente inizialmente studiato da Darzentas et al. [20] nel 1980, con numerosi contributi successivi. Secondo la Federal Highway Administration, quando adeguatamente simulate, le misure surrogate delle prestazioni di sicurezza mostrano il potenziale per fornire una piattaforma utile da cui identificare situazioni ad alto rischio nel flusso di traffico e guidare strategie di intervento efficaci sotto il profilo dei costi. Il concetto è che il rischio reale di incidenti può essere studiato usando il campionamento di simulazione del traffico di indicatori di prestazioni di sicurezza anziché dati di traffico reali. I dati reali di arresti anomali e conflitti misurati e simulati sono stati confrontati ottenendo risultati accettabili in molti articoli.

### 2.3 Misure surrogate di sicurezza

Le misure surrogate di sicurezza rappresentano, dunque, gli indicatori quantitativi e oggettivi dell'approccio basato sulla tecnica dei conflitti di traffico per descrivere le interazioni tra utenti coinvolti in un evento critico per la sicurezza.

Dalla seguente tabella è possibile individuare, in base alle velocità e accelerazioni del veicolo leader e follower, una situazione di possibile conflitto (P), conflitto (C) o conflitto impossibile (I).

**Tabella 2-1: Situazioni di P, C, I**

$V$	$V_F > V_L$			$V_F \leq V_L$		
	$a_L > 0$	$a_L < 0$	$a_L = 0$	$a_L > 0$	$a_L < 0$	$a_L = 0$
$a_F > 0$	P	C	C	P	C	P
$a_F < 0$	P	P	P	I	P	I
$a_F = 0$	P	C	C	I	C	I

*Note: C-Conflict occurs; P-Possible Conflict; I-Impossible conflict with each other.*

Con il fine di captare in anticipo una situazione di P o C, i parametri per le misure di sicurezza surrogate più comunemente utilizzati e che sono stati selezionati in questa attività di ricerca, sono il tempo di collisione (TTC), il tempo di collisione modificato (MTTC), il tempo di esposizione alla collisione (TET), il Deceleration Rate to Avoid a Crash (DRAC) e il Deceleration Rate to Avoid a Crash using constant Initial Acceleration (DCIA).

### 2.3.1 Tempo di collisione (TTC – Time to Collision)

Il tempo di collisione (TTC - Time to Collision), tra i vari indicatori di sicurezza basati sul tempo, è quello più conosciuto. Il TTC si riferisce al tempo rimanente prima dell'incidente di fine corsa se vengono mantenute la rotta e la velocità dei veicoli. Il TTC ha dimostrato di essere una misura efficace per discriminare i comportamenti critici da quelli normali nelle auto seguite. Il principale difetto del TTC è l'assunzione di velocità dei veicoli costanti durante la rotta di collisione. Inoltre, in accordo con Vogel [21], il TTC indica le reali occorrenze di situazioni pericolose e non è in grado di catturare potenziali situazioni pericolose. Il tempo di collisione, come viene percepito dal suo nome, si riferisce alla durata del tempo prima che due (o più) oggetti si scontrino con condizioni certe iniziali. L'uso del TTC nel campo dei trasporti iniziò dopo la sua introduzione da parte di Hayward nel 1971 come periodo di tempo prima che due veicoli si scontrassero, se non viene intrapresa alcuna azione evasiva [22]. Il valore TTC in un istante è definito come tempo in cui due veicoli si scontrano se continuano alla loro velocità di avanzamento e sullo stesso percorso [23].

Il valore di TTC all'inizio della fase di frenatura (TTC<sub>br</sub>) rappresenta lo spazio di manovra disponibile nel momento in cui inizia un'azione evasiva. Il TTC minimo (TTC<sub>min</sub>) raggiunto durante il processo di avvicinamento di due veicoli viene considerato come un indicatore della gravità di un incidente. In linea di principio, minore è il TTC più alto sarà il rischio di una collisione. In generale, si può assumere che per valori di TTC inferiori a 1,5s indicano una potenziale situazione pericolosa nelle aree urbane [24].

In Tabella 2.2 vengono elencati alcuni valori di soglia minima del TTC in base a diversi riferimenti.

**Tabella 2-2: Soglie minime TTC**

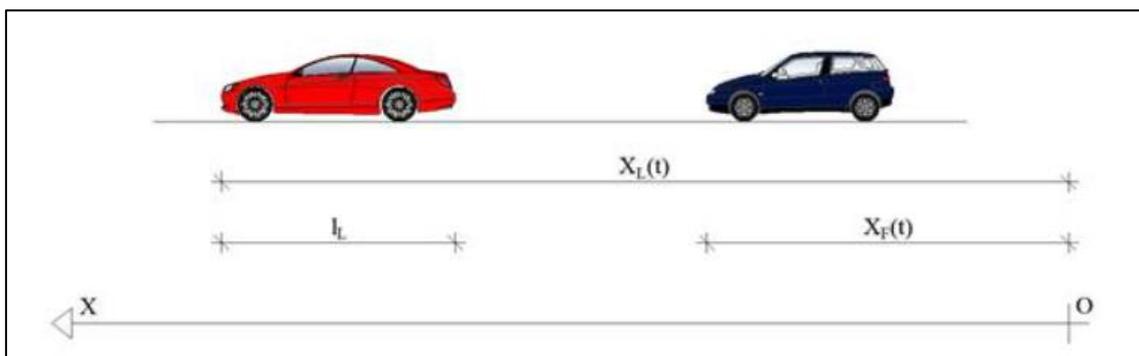
Minimum and desirable TTC threshold values indicated by different studies.

Reference	Minimum (s)	Desirable (s)	Condition
Van der Horst [16]	1	1.5	Approaches at intersections
Sayed et al. [15]	1.6	2.0	Low level of conflict
	00	0.9	High level of conflict
Hogema and Janssen [17]	-	3.5	Non-supported drivers
Hogema and Janssen [17]	-	2.6	Supported drivers
Vogel [14]	1	2	Approaches at intersections
Meng and Qu [18]	2	4	Urban Road Tunnel (rear end crash)
Huang et al. [7]		1.6	Signalized Intersection
Sayed et al. [1]		3	Signalized Intersection
AASHTO [19]; Farah et al. [20] & Hegeman [21]		3	For 2-lane rural roads

È possibile calcolare il TTC per un veicolo follower (F) all'istante t con riferimento ad un veicolo leader (L) sfruttando la seguente equazione:

$$TTC = \frac{X_L(t) - X_F(t) - l_L}{V_F(t) - V_L(t)} \quad \text{Eq. 2.1}$$

dove  $X_i(t)$  indica la posizione del generico veicolo,  $V_i(t)$  indica la derivata di  $X_i(t)$  rispetto al tempo, ossia la velocità e  $l_L$  indica la lunghezza del veicolo leader; L e F come pedici si riferiscono rispettivamente ai veicoli leaders e followers in un processo di car-following (Fig. 2.3). È da notare che il TTC è valido solo quando la velocità del veicolo follower è superiore a quella del veicolo leader.



**Fig. 2-3: Definizione del TTC (tempo di collisione)**

Il TTC si basa sul presupposto che i veicoli followers e i veicoli leaders continuano a velocità costante fino a quando si verifica la collisione, ignorando così l'accelerazione o la decelerazione effettiva di entrambi i veicoli in questo intervallo. Un'ipotesi del genere ignorerebbe molti potenziali conflitti dovuti a disparità di decelerazione e accelerazione.

Infatti, nel caso in cui il veicolo leader (che precede) è leggermente più veloce di quello following (che segue), l'indice TTC non può essere valutato in un numero finito. Questo è un punto debole dell'aspetto pratico dell'indice. In uno studio sui conflitti dovuti al cambiamento di corsia di un utente (leader) sulla corsia di sorpasso si è trovato che la velocità media di un secondo veicolo (following) che percorre la corsia di sorpasso, è leggermente inferiore a quella del veicolo leader. Quindi, è difficile valutare l'indice TTC fra il veicolo che cambia corsia ed il veicolo che percorre la traiettoria lungo la corsia di sorpasso. Tuttavia, la situazione dove la distanza fra due veicoli successivi è molto corta dovrebbe essere considerata una situazione pericolosa, anche se il veicolo leader viaggia leggermente più veloce dell'altro veicolo. In tali situazioni, vi è un'alta possibilità che il veicolo leader venga tamponato nel caso in cui applichi una frenata d'emergenza. Quindi vi sono casi in cui, se non vengono considerati alcuni parametri e fattori, il parametro surrogato di sicurezza indica una condizione sicura anche se questa può risultare abbastanza pericolosa.

### 2.3.2 Tempo di collisione modificato (MTTC – Modified Time to Collision)

Il TTC è misurabile solo quando i veicoli in conflitto si trovano in rotta di collisione, ovvero la velocità del veicolo che segue (follower) è maggiore della velocità del veicolo leader. Per includere altre situazioni di potenziale conflitto quando i veicoli non sono in rotta di collisione, ma con discrepanze in accelerazione o decelerazione, Ozbay et al. (2008) hanno proposto l'indicatore MTTC, che ha eliminato l'ipotesi di velocità costante durante la rotta di collisione e va a considerare le accelerazioni dei veicoli. L'MTTC viene calcolato come:

$$MTTC = \frac{\Delta v_t \pm \sqrt{\Delta v_t^2 + 2\Delta a_t(x_{L,t} - x_{F,t} - D_L)}}{\Delta a_t} \quad Eq. 2.2$$

Dove:

- $\Delta v_t = V_{F,t} - V_{L,t}$  è la velocità relativa dei veicoli in conflitto al tempo t;
- $\Delta a_t = a_{F,t} - a_{L,t}$  è l'accelerazione relativa del conflitto tra i veicoli al tempo t.

Ci sono due risultati per MTTC. Se sono entrambi positivi, il minimo di essi è considerato il valore MTTC; se un risultato è positivo mentre l'altro è negativo, il risultato positivo è considerato il valore di MTTC.

Definita una soglia per l'MTTC, si può dedurre una possibile situazione di collisione confrontando il valore MTTC istantaneo del veicolo con il valore di soglia. Tuttavia, l'MTTC di per sé non fornisce indicazioni sufficienti sulla gravità della collisione, dal momento che due veicoli potrebbero avere lo stesso MTTC per varie combinazioni di velocità e distanza relativa.

### 2.3.3 Tempo di esposizione al conflitto (TET – Time Exposed Time to Collision)

Il TET misura la durata di tempo di esposizione a valori critici di sicurezza del TTC al di sopra di una soglia predefinita. Questa misura è sommata per tutti i veicoli che passano una sezione della strada durante il periodo di tempo indicato. Il TTC exposed è definito come la misura del tempo durante il quale ci si trova in situazioni critiche di sicurezza e cioè:

$$TET = \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^T \delta_i(t) \cdot t \quad \text{Eq. 2.3}$$

$$\text{con } \delta_t(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq TTC_i \leq TTC^* \\ 0 & TTC^* < TTC_i \end{cases}$$

dove  $\tau$  = passo temporale della simulazione; N = numero totale dei veicoli; T = orizzonte temporale della simulazione;  $TTC_i$  = TTC del veicolo i al tempo t;  $TTC^*$  = valore di soglia del TTC.

### 2.3.4 Deceleration Rate to Avoid Collision (DRAC)

Il DRAC è definito come la velocità alla quale un veicolo che segue deve decelerare per evitare la collisione con il veicolo in testa, e può essere calcolato come:

$$DRAC_{F,t} = \frac{(v_{F,t} - v_{L,t})^2}{2(x_{L,t} - x_{F,t} - D_L)} \quad \text{Eq. 2.4}$$

### 2.3.5 Modified Deceleration Rate to Avoid Collision (MDRAC)

Il MDRAC è stato definito per poter includere anche il tempo di reazione R del veicolo follower:

$$MDRAC = \begin{cases} \frac{v_2 - v_1}{2(TTC - R)}, & \text{se } TTC > R \\ \infty, & \text{altrimenti} \end{cases} \quad \forall V_2 - V_1 \quad \text{Eq. 2.5}$$

### 2.3.6 Deceleration Rate to Avoid a Crash using constant Initial Acceleration (DCIA)

Il DCIA viene definito come la decelerazione minima del veicolo follower necessaria per evitare la collisione, andando però a considerare l'ipotesi che il veicolo

follower possa avere una velocità inferiore rispetto al veicolo leader, a differenza del DRAC e MDRAC.

Viene definito come:

$$DCIA = \frac{d_{10}T + v_{10} - d_{20}R - v_{20}}{T - R} \quad \text{Eq. 2.6}$$

Dove:

$$T = \frac{v_{20}R - v_{10}R - 2D}{v_{10} - d_{10}R - v_{20} + d_{20}R}$$

- R: tempo di reazione del driver per reagire ad una situazione (0.7 – 1.6 s)
- D: distance gap
- $v_{10}$  e  $d_{10}$ : velocità e decelerazione del veicolo 1 al tempo  $t_0$
- $v_{20}$  e  $d_{20}$ : velocità e decelerazione del veicolo 2 al tempo  $t_0$

Per la valutazione del DCIA un valore minore o uguale a 0 significa che una collisione viene prevenuta senza intervento del veicolo follower. Un valore negativo è indice della decelerazione minima richiesta per evitare una collisione attraverso una variazione della velocità.

In accordo con gli studi [25] un valore di decelerazione maggiore di  $3.4 \text{ m/s}^2$  è considerato critico. Il DCIA identifica situazioni più critiche rispetto al DRAC e MDRAC, in quanto include anche il tempo di reazione R e di conseguenza riesce a rilevare anche situazioni in cui il tempo di reazione supera il tempo di collisione (TTC).

Tale parametro è dunque valido anche per profili di velocità non costanti, ma accelerazioni costanti ed è utile per identificare interazioni rischiose quando il veicolo follower ha velocità più basse, ma maggiore accelerazione del veicolo leader.

## 2.4 Integrazione delle misure surrogate di sicurezza nel processo di testing in continuo

Un sistema di prevenzione delle collisioni funziona in base al principio di rilevare o identificare una possibile collisione nello scenario; tale sistema applica una sorta di intervento per evitare di collidere o di trovarsi in una situazione pericolosa. La prevenzione delle collisioni viene solitamente ottenuta mediante frenata, totale o delle singole ruote.

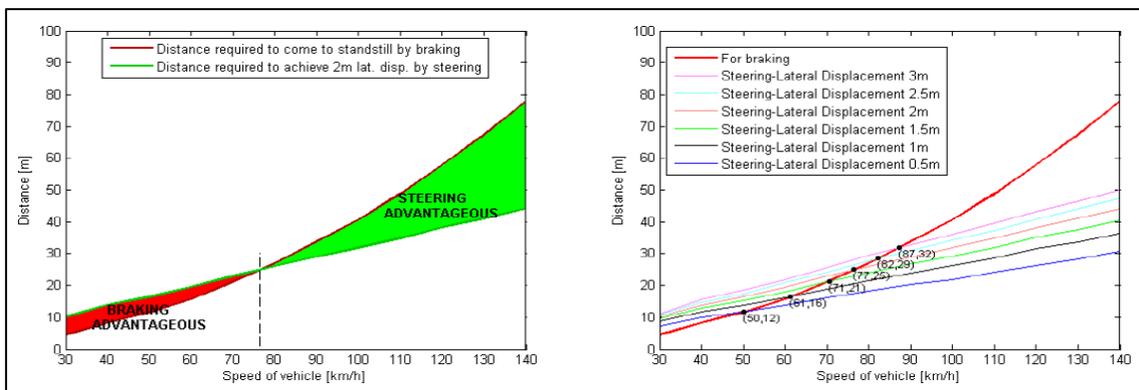
Esistono differenti sistemi di sicurezza che utilizzano la frenata per evitare collisione tra veicoli, sviluppati da numerosi produttori. Un'altra soluzione per evitare le collisioni è l'uso dello sterzo o sia della frenata che dello sterzo, ma queste soluzioni

sono in fase di sviluppo e non sono disponibili sui veicoli di produzione esistenti. Ciascuna di queste soluzioni ha il suo proprio vantaggio e svantaggio.

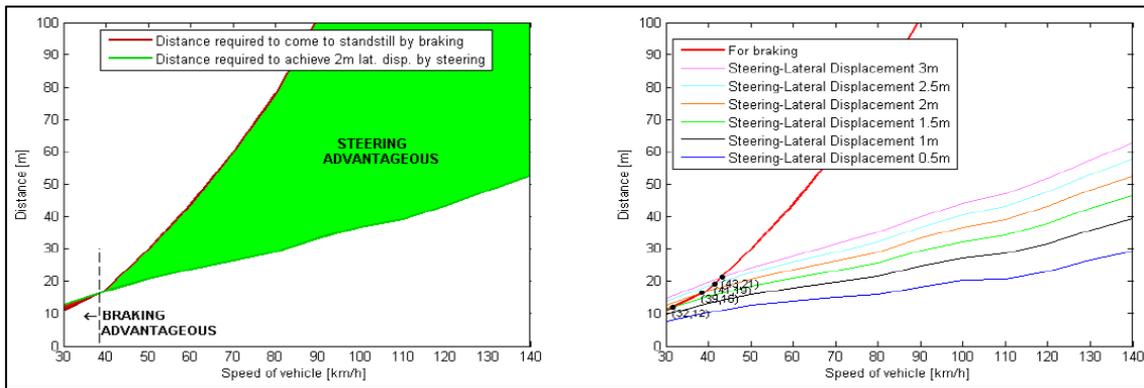
Nella guida urbana a bassa velocità, la frenata è sufficiente per evitare o mitigare una collisione, ma a velocità più elevate, la distanza necessaria per fermare il veicolo per evitare una collisione è abbastanza alta. In tali casi, quando il veicolo viaggia ad alta velocità, l'opzione più adatta per evitare la collisione consiste nell'eludere l'ostacolo sterzando.

Per verificarlo, gli strumenti di simulazione vengono utilizzati per eseguire manovre di frenata e sterzata osservando la distanza richiesta per evitare le collisioni. Il veicolo viene accelerato a una desiderata velocità, compresa tra 30 e 140 km/h; una volta raggiunta la velocità, la frenata o la manovra di sterzo viene eseguita. In caso di frenata, la frenata utilizza il sistema antibloccaggio (ABS) fino all'arresto del veicolo. In caso di sterzo, un ingresso al volante sinusoidale con un'ampiezza di 90 ° e un periodo di tempo di 2 secondi viene utilizzato per simulare un cambio di corsia.

In caso di frenata deve essere osservata la distanza necessaria affinché il veicolo si arresta; in caso di sterzata viene osservato lo spostamento laterale richiesto a valle della sterzata. La Figura 2.4 mostra un confronto tra frenata e sterzata al fine di evitare una collisione.



**Fig. 2-4: Braking vs. steering for collision avoidance ( $\mu = 1.0$ )**



**Fig. 2-5: Braking vs. steering for collision avoidance ( $\mu = 0.4$ )**

Il grafico a sinistra in Fig. 2.4 e 2.5 illustra la distanza necessaria per evitare una collisione, ovvero fermandosi in frenata o raggiungendo uno spostamento laterale di 2 m sterzando. Questa distanza a sua volta riflette la distanza relativa tra un veicolo e l'ostacolo.

Si osserva che alle basse velocità la frenata è più vantaggiosa, ma questo vantaggio si riduce costantemente con l'aumentare della velocità. Ad una velocità di circa 75 km/h, sia la frenata che lo sterzo producono lo stesso risultato in base alla distanza richiesta. Oltre questa velocità, la manovra di sterzata è più adatta, come si può vedere dal grafico a destra delle Fig. 2.4 e 2.5.

I vantaggi dello sterzo diventano più evidenti su superfici a basso attrito, ad esempio sul bagnato e neve. La Figura 2.5 mostra un confronto tra frenata e sterzo per evitare una collisione per una strada con  $\mu = 0,4$ . Illustra anche il confronto per diversi spostamenti laterali richiesti.

Sulla base quindi di queste tipologie di sistemi di prevenzione delle collisioni e sulla base anche del calcolo dei parametri surrogati di sicurezza prima illustrati, sono state sviluppate nell'ambito di tale attività di ricerca delle logiche di triggering per attivare una "possibile collisione" durante una simulazione real-time in ambiente virtuale, da sfruttare per la validazione e testing delle logiche ADAS.

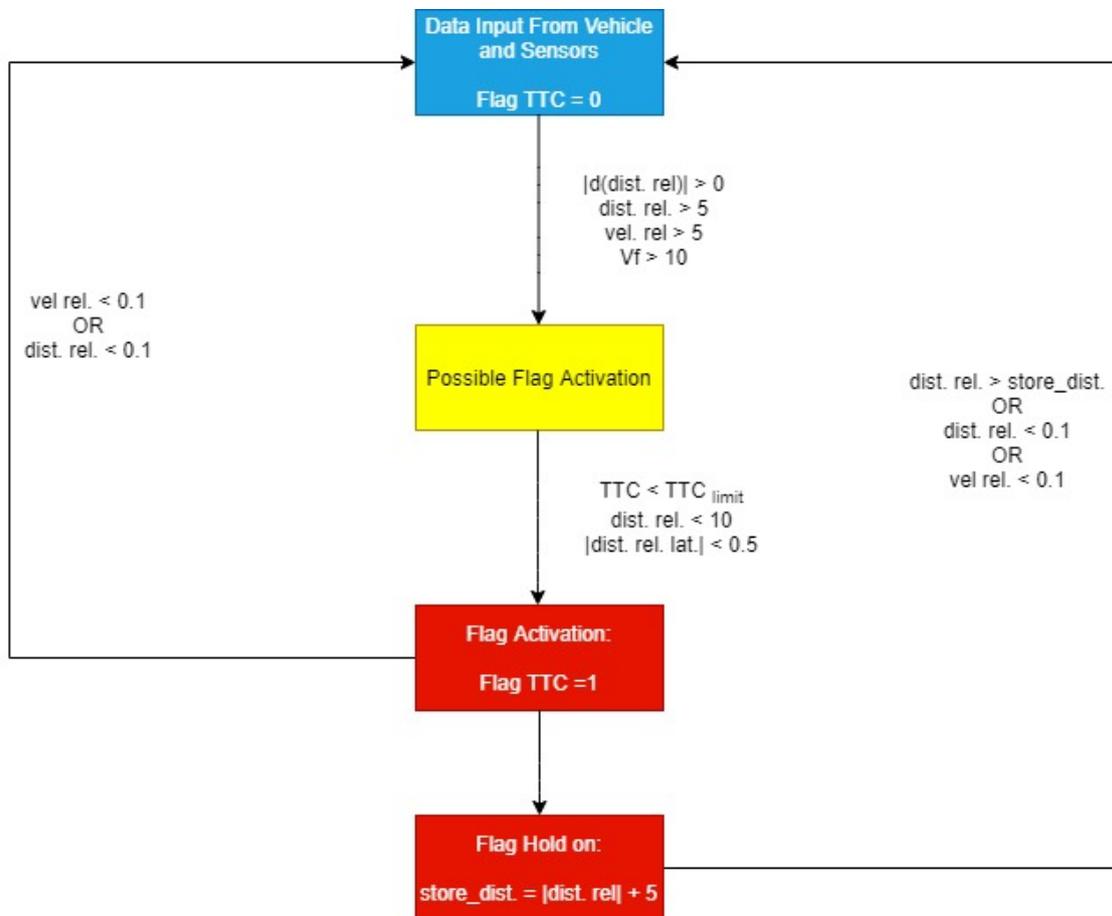
Il concetto chiave di tali logiche si basa sull'attivazione di variabili, che possono essere viste come dei flag di attivazione: quando uno di questi flag si attiva (logica OR), viene rilevata l'anomalia e la possibile collisione e in base a ciò, collegando il tutto alla simulazione di scenari in continuo, nell'intorno dell'evento critico si potrà attivare la registrazione dei dati di simulazione, in modo tale da andare a riconoscere le cause mediante opportuna analisi di post-processing. Questo consente di gestire l'enorme mole di dati che vengono riprodotti durante cicli di simulazione in continuo.

### 2.4.1 Logica di triggering del Flag TTC

La logica di triggering del TTC usa in input parametri veicolari e parametri rilevati mediante sensori quali radar o camera:

- Velocità longitudinale del veicolo follower;
- Differenza di velocità longitudinale tra veicolo follower e leader;
- Distanza relativa longitudinale tra veicolo follower e leader;
- Distanza relativa laterale tra veicolo follower e leader;
- Derivata della distanza longitudinale tra veicolo follower e leader;
- Derivata della distanza laterale tra veicolo follower e leader;

Inoltre, il TTC viene calcolato in real-time e confrontato con una soglia limite (TTC<sub>limit</sub>). Sulla base di tali input di seguito viene illustrato il flow chart considerato che porta all'attivazione del TTC flag:



Dai dati di input di veicolo e sensori, se la velocità del veicolo follower assume un valore maggiore di 10 km/h, se la velocità relativa diviene maggiore di 5 km/h, la distanza relativa maggiore di 5 m e la derivata della distanza relativa maggiore di 0, allora si entra nel range di possibile attivazione del flag TTC. Infatti, entrare in tale stato consente di attivare possibili collisioni quando il veicolo follower inizia effettivamente a mettersi in movimento ed evita di avere "false attivazioni".

Da questo stato, se il TTC diviene minore del  $TTC_{limit}$ , la distanza relativa minore di 10 m e la distanza relativa laterale minore di 0.5 m, allora il Flag TTC assume valore 1, il che significa che si è in un range di possibile collisione.

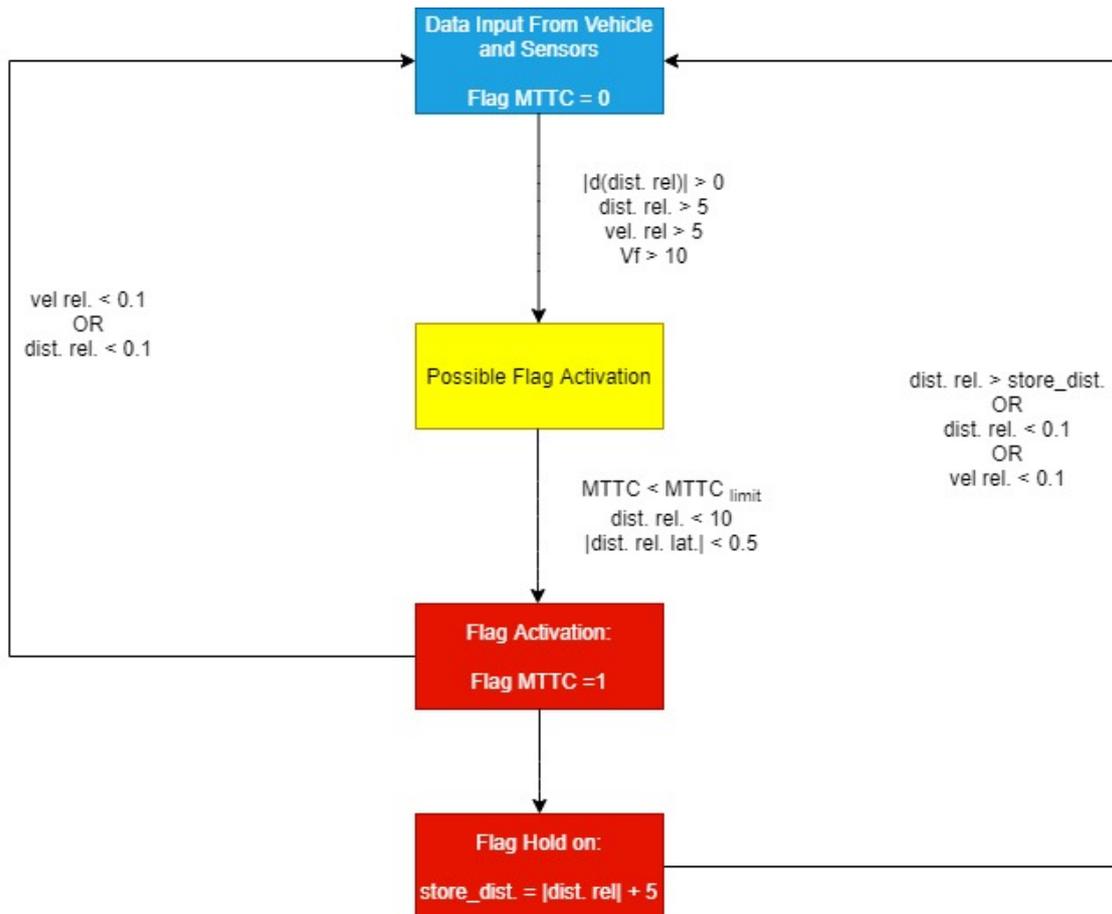
Da qui, si può uscire dallo stato di attivazione del Flag TTC se la velocità relativa assume un valore minore di 0.1 km/h (il veicolo follower si inizia ad allontanare) oppure se la distanza relativa diviene minore di 0.1 m (caso di collisione); altrimenti, si entra nello stato di Flag Hold on: viene registrata la distanza relativa tra veicolo follower e leader nel momento di attivazione del Flag TTC, con una addizione di 5 m e, il Flag TTC resta attivato finché la distanza relativa non diviene maggiore di quella registrata, oppure la distanza relativa minore di 0.1 m (caso di collisione) o la velocità relativa minore di 0.1 km/h (il veicolo follower si inizia ad allontanare).

#### 2.4.2 Logica di triggering del Flag MTTC

La logica di triggering del MTTC usa in input parametri veicolari e parametri rilevati mediante sensori quali radar o camera:

- Velocità longitudinale del veicolo follower;
- Differenza di velocità longitudinale tra veicolo follower e leader;
- Distanza relativa longitudinale tra veicolo follower e leader;
- Distanza relativa laterale tra veicolo follower e leader;
- Derivata della distanza longitudinale tra veicolo follower e leader;
- Derivata della distanza laterale tra veicolo follower e leader;

Inoltre, il MTTC viene calcolato in real-time e confrontato con una soglia limite ( $MTTC_{limit}$ ). Sulla base di tali input di seguito viene illustrato il flow chart considerato che porta all'attivazione del MTTC flag:



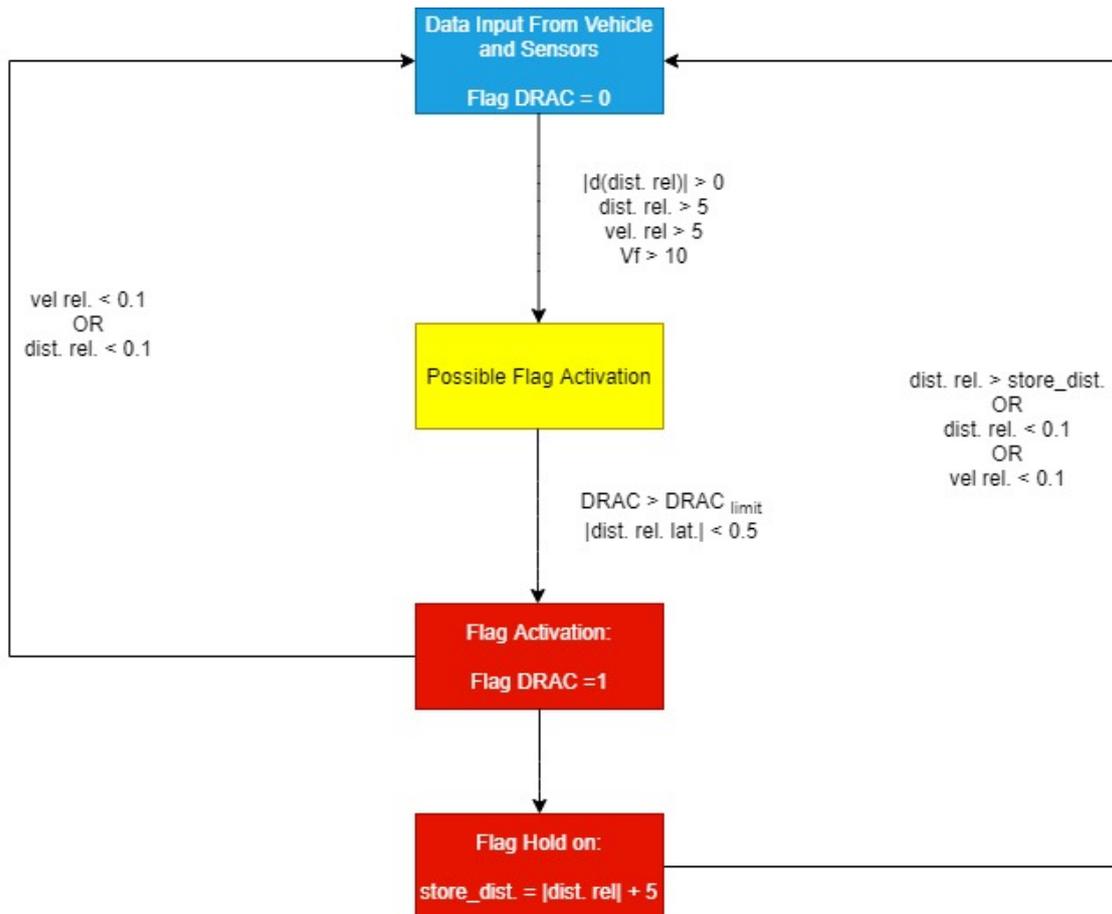
La logica di triggering del Flag MTTC è analoga a quella del Flag TTC.

### 2.4.3 Logica di triggering del Flag DRAC

La logica di triggering del DRAC usa in input parametri veicolari e parametri rilevati mediante sensori quali radar o camera:

- Velocità longitudinale del veicolo follower;
- Differenza di velocità longitudinale tra veicolo follower e leader;
- Distanza relativa longitudinale tra veicolo follower e leader;
- Distanza relativa laterale tra veicolo follower e leader;
- Derivata della distanza longitudinale tra veicolo follower e leader;
- Derivata della distanza laterale tra veicolo follower e leader;

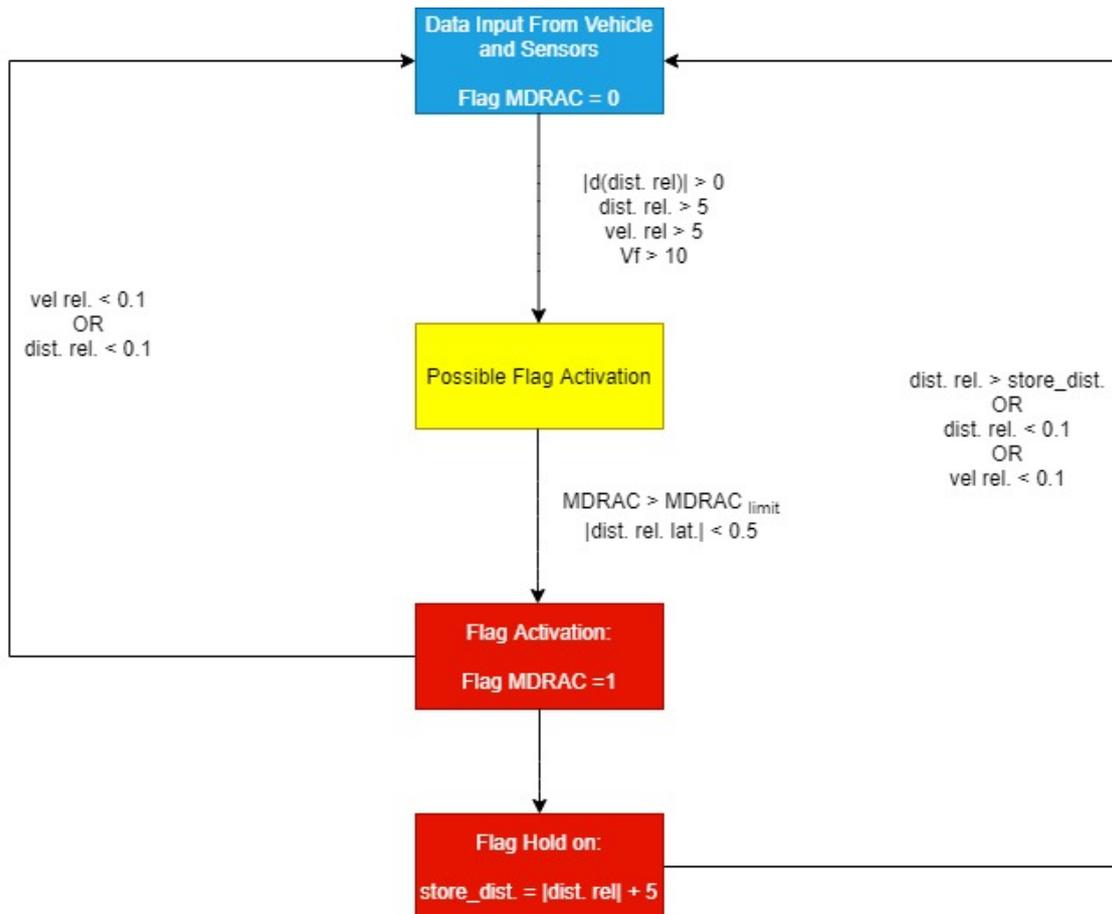
Inoltre, il DRAC viene calcolato in real-time e confrontato con una soglia limite ( $DRAC_{limit}$ ). Sulla base di tali input di seguito viene illustrato il flow chart considerato che porta all'attivazione del DRAC flag:



A differenza delle logiche di triggering precedenti, in tal caso, per poter attivare il Flag DRAC, il valore del DRAC calcolato in real-time deve superare la soglia  $\text{DRAC}_{\text{limit}}$  (e non essere minore, essendo il DRAC definito come la velocità alla quale un veicolo che segue deve decelerare per evitare la collisione con il veicolo in testa).

#### 2.4.4 Logica di triggering del Flag MDRAC

In maniera del tutto analoga al DRAC è stata definita la logica di triggering del Flag MDRAC, andando a considerare anche in questo caso una attivazione del Flag nel momento in cui il valore di MDRAC calcolato in real-time supera il valore di  $\text{MDRAC}_{\text{limit}}$ . Di seguito viene illustrato il flow chart considerato per l'attivazione del Flag MDRAC:

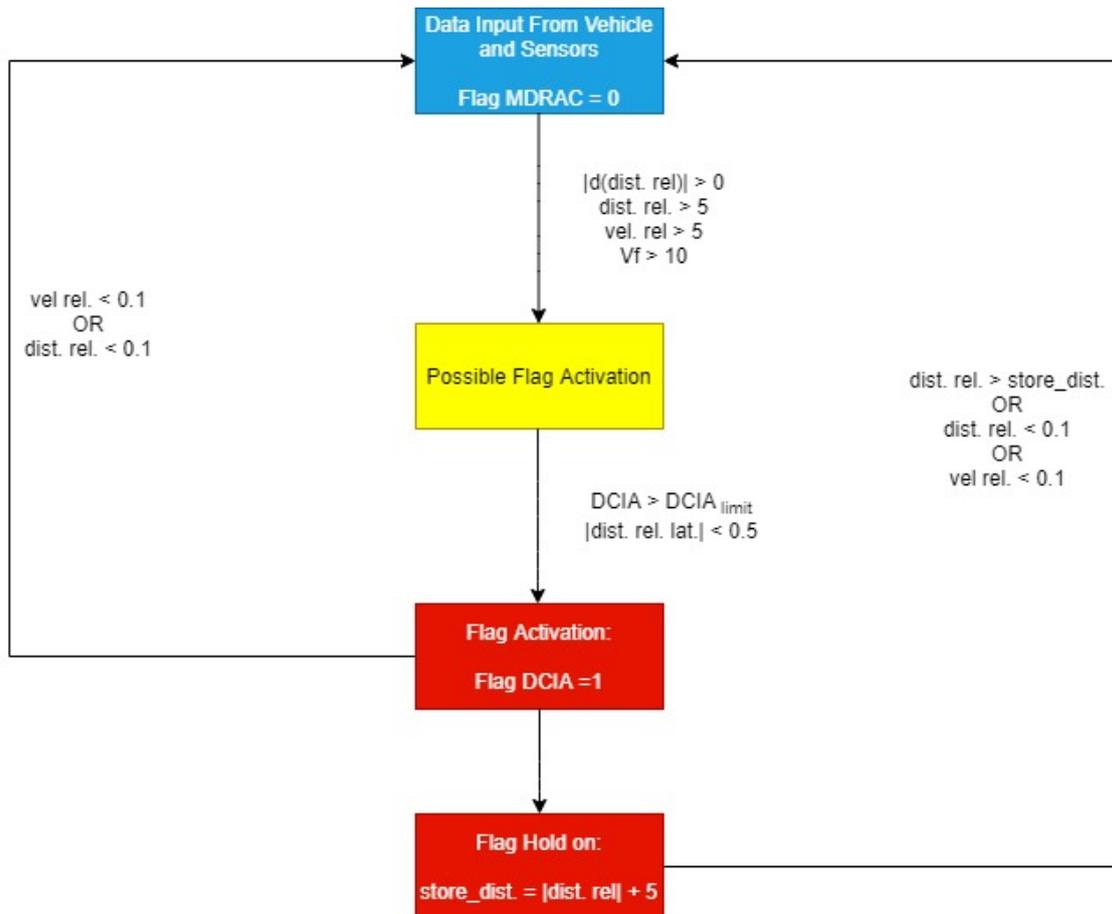


#### 2.4.5 Logica di triggering del Flag DCIA

La logica di triggering del DCIA usa sempre in input parametri veicolari e parametri rilevati mediante sensori quali radar o camera:

- Velocità longitudinale del veicolo follower;
- Differenza di velocità longitudinale tra veicolo follower e leader;
- Distanza relativa longitudinale tra veicolo follower e leader;
- Distanza relativa laterale tra veicolo follower e leader;
- Derivata della distanza longitudinale tra veicolo follower e leader;
- Derivata della distanza laterale tra veicolo follower e leader;

Inoltre, il DCIA viene calcolato in real-time e confrontato con una soglia limite (DCIA<sub>limit</sub>). Sulla base di tali input di seguito viene illustrato il flow chart considerato che porta all'attivazione del DCIA flag:

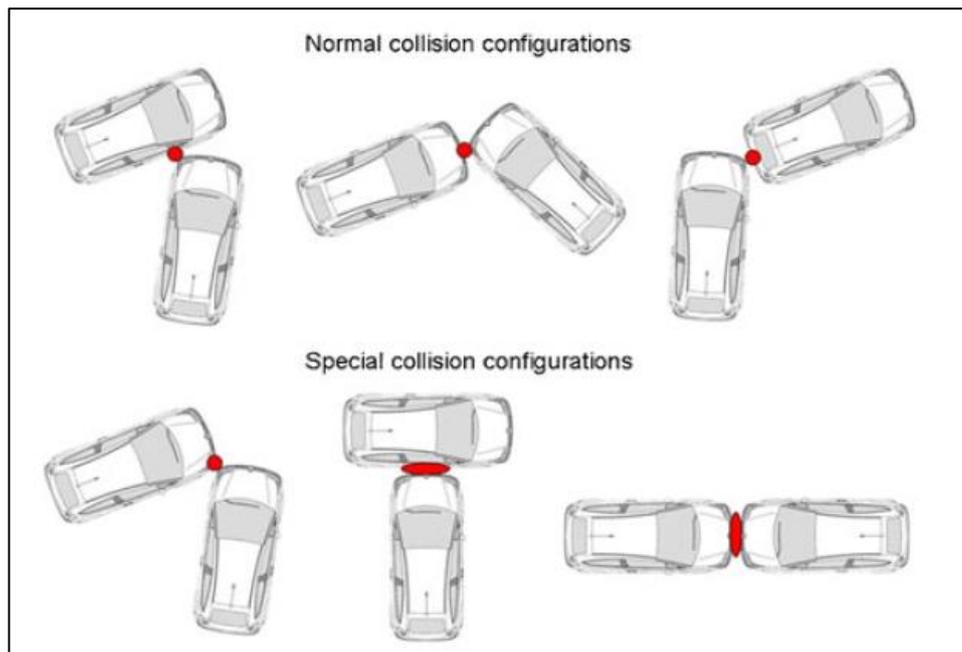


#### 2.4.6 Logica di triggering del Flag Collision

Oltre ai Flag definiti sulla base del calcolo real-time dei parametri surrogati di sicurezza, è stata definita anche una logica di triggering del Flag di collisione, che è legato al vero e proprio impatto tra due veicoli: quando avviene uno scontro tra veicolo follower e veicolo leader, tale Flag si attiva finché i due veicoli non fuoriescono dalla rotta di collisione.

Quando due veicoli collidono, si può vedere che l'angolo di uno di loro è la prima area che entra in contatto. Questo fatto porta a quelle che chiamiamo normali configurazioni di collisione. Questo accade sempre a meno che la collisione non sia perfettamente parallela o perfettamente perpendicolare (Fig. 2.6). In questo caso, sia gli angoli che il resto dei contatti laterali collidono allo stesso istante, ma si può comunque supporre che un angolo colpisca sempre per primo per il calcolo del tempo di collisione. Un altro caso speciale si verifica quando entrambi i veicoli colpiscono l'un l'altro in un angolo, ma questo non può non essere considerato come un caso particolare.

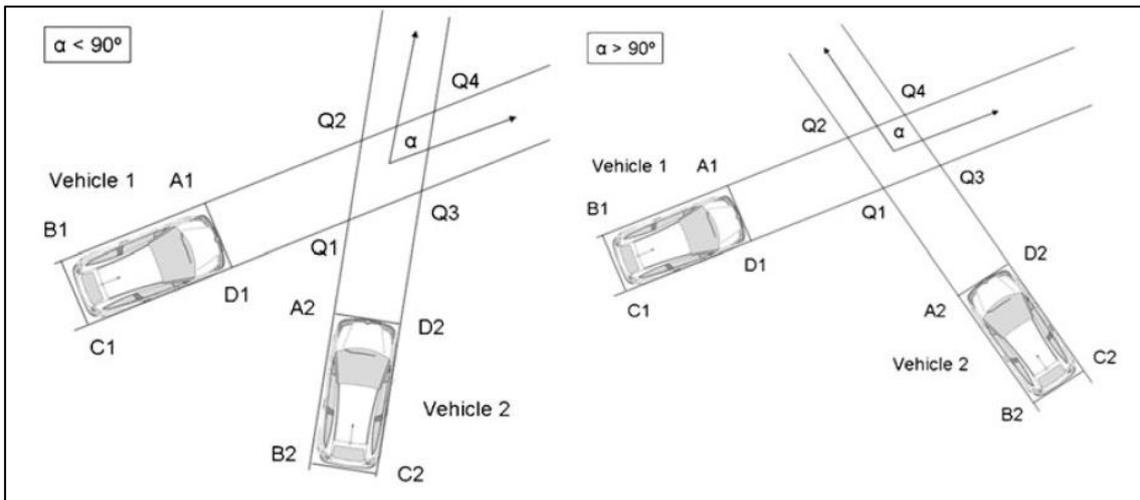
Nel caso generale, ci sono 32 situazioni possibili, considerando che ogni angolo di ogni veicolo (4 angoli) può avere un impatto su uno qualsiasi dei 4 lati dell'altro veicolo e questo calcolo deve essere ripetuto con entrambi i veicoli.



***Fig. 2-6: Possibili configurazioni di collisione***

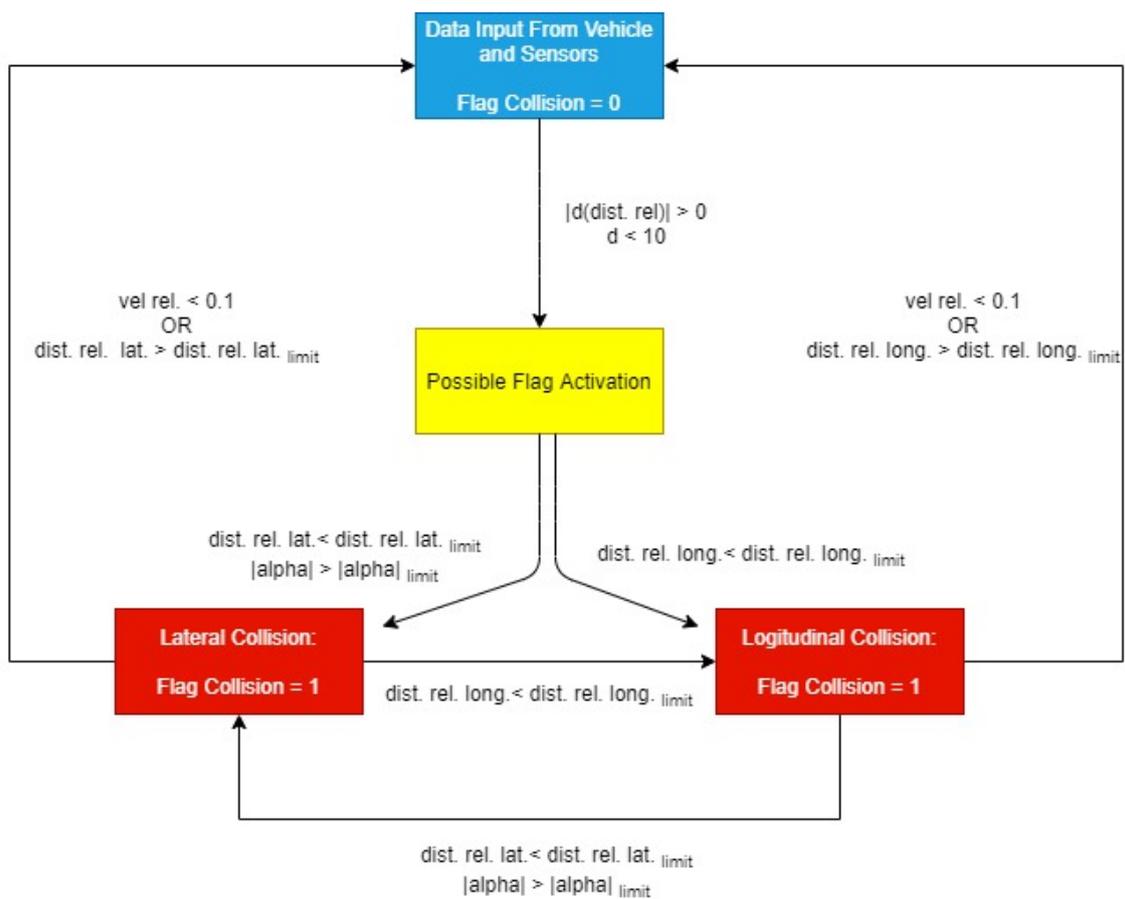
La logica di triggering del Flag Collision usa in input parametri veicolari e parametri rilevati mediante sensori quali radar o camera:

- Velocità longitudinale del veicolo follower;
- Differenza di velocità longitudinale tra veicolo follower e leader;
- Distanza relativa longitudinale tra veicolo follower e leader;
- Distanza relativa laterale tra veicolo follower e leader;
- Derivata della distanza longitudinale tra veicolo follower e leader;
- Derivata della distanza laterale tra veicolo follower e leader;
- Angolo alpha tra i vettori di movimento di entrambi i veicoli (Fig. 2.7);



**Fig. 2-7: Configurazioni iniziali di angolo  $\alpha < 90^\circ$  e  $\alpha > 90^\circ$**

Di seguito viene illustrato il flow chart considerato per l'attivazione del Flag Collisione:



Dai dati di input di veicolo e sensori, se la distanza relativa risulta minore di 10 m e la derivata della distanza relativa maggiore di 0, allora si entra nel range di possibile attivazione del flag Collisione. Entrare in tale stato consente di attivare possibili collisioni quando il veicolo follower inizia effettivamente a mettersi in movimento ed evita di avere “false attivazioni”.

Da questo stato, se la distanza relativa longitudinale diviene minore di una distanza minima, allora si ha un impatto longitudinale e si attiva il Flag collisione; se invece l'angolo alpha assume un valore maggiore di una soglia limite e la distanza relativa laterale diviene inferiore ad una soglia limite, allora si ha un impatto laterale.

In entrambi questi due stati eventualmente raggiunti, si può ricadere nell'impatto laterale se, effettuato un impatto iniziale longitudinale, si collide successivamente lateralmente quando la distanza relativa longitudinale diviene inferiore ad una soglia limite; viceversa, si può ricadere nell'impatto longitudinale se, effettuato un impatto iniziale di tipo laterale, si collide successivamente longitudinalmente quando la distanza relativa longitudinale diviene inferiore ad una soglia limite.

Da qui, si può uscire dallo stato di attivazione del Flag Collisione se la velocità relativa assume un valore minore di 0.1 km/h (il veicolo follower si inizia ad allontanare) oppure se la distanza relativa assume un valore fuori soglia limite (collisione non in corso).

### 3 Implementazione e sviluppo della metodologia

Per poter implementare e testare la metodologia proposta per la validazione di funzionalità ADAS in ambiente virtuale sono state necessarie quattro fasi di sviluppo dell'attività di ricerca, così suddivise:

1. Realizzazione di una piattaforma integrata vVeHIL con un ambiente di simulazione del traffico
2. Realizzazione del controllore per la stima e la rilevazione dello stato passed/failed del test
3. Calibrazione delle soglie dei parametri surrogati di sicurezza
4. Validazione e testing della metodologia (trattata nel capitolo 4)

#### 3.1 Realizzazione piattaforma di testing vVeHIL con ambiente di simulazione del traffico

A valle di un benchmarking dei vari tool a disposizione e di alcune implementazioni e sviluppi, si è optato nello sviluppare una piattaforma di test (Fig. 3.1) che risulta costituita da un sistema HIL under test dato da una Mathworks SpeedGoat (target device), al cui interno gira in real-time una logica di controllo ADAS; per la simulazione dell'ambiente virtuale si è adoperato IPG CarMaker, mentre per la simulazione dello scenario di traffico PTV VISSIM. Il controllore è, invece sviluppato, in ambiente Simulink. Nella tabella 3.1 vengono elencati nel dettaglio i vari tools/ambienti adoperati.

*Tabella 3-1: Piattaforma di testing ADAS*

ELEMENTO PIATTAFORMA	TOOL/AMBIENTE ADOPERATO
Sistema X-il under test che include un eventuale simulatore real-time e una logica di controllo ADAS "telecaricata" su una ECU reale	HIL Simulink/Mathworks Speedgoat Xpack
Modello di simulazione del driver e veicolo	IPG CarMaker
Ambiente di simulazione virtuale	IPG CarMaker
Sw di traffic simulation	PTV VISSIM
Elemento di controllo e data recording	Simulink



**Fig. 3-1: Schematico della piattaforma di test considerata**

### 3.1.1 Sistema X-il under test: HIL Mathworks Speedgoat e Xpack4

Come sistema X-il under test si è scelto di adoperare una architettura costituita da due hardware real-time: la SpeedGoat (prodotta dalla Mathworks) e la Xpack4 (prodotta da IPG).

L'Hardware-In-the-Loop (HIL) è una forma di simulazione real-time in cui si ha un impianto simulato con l'aggiunta di componenti reali nel loop. Essa permette una simulazione in real-time di un veicolo virtuale, integrando nel ciclo di controllo componenti presenti in vettura quali sensori, attuatori e la ECU da testare. La maggior parte dei sensori e degli attuatori vengono modellati e simulati, mentre alcuni dei componenti dell'automobile controllati dalla ECU da verificare sono inseriti fisicamente

nella simulazione per evitare complessi modelli matematici o per verificare anche i componenti reali.

Durante la simulazione la centralina riceve i segnali elettrici provenienti dai componenti, sia simulati che reali, ad essa collegati, e invia i segnali di comando necessari per il corretto funzionamento del veicolo. La simulazione permette di testare il funzionamento dei modelli sviluppati in un ambiente virtuale perfettamente ripetibile e completamente parametrizzato a seconda del tipo di prova da effettuare e, perciò, degradabile come nella realtà.

In quest'ottica è possibile verificare la robustezza degli algoritmi simulando diverse condizioni di funzionamento, prima che vengono installati su vettura. Le condizioni critiche, quali la rottura di un sensore o uno stile di guida molto estremo, possono essere facilmente riprodotte e simulate. Inoltre, la ripetibilità facilita l'individuazione dei difetti del sistema e permette di testare le eventuali soluzioni proposte ricreando esattamente le condizioni critiche che hanno evidenziato la presenza di tali difetti.

Un sistema HIL tipico comprende i seguenti componenti:

1. un modello matematico dell'impianto (plant model -> modello motore o veicolo con annessi sensori)
2. real-time target con I/O under test
3. simulatore con schede reali o simulate
4. un PC host con comunicazione al computer real-time
5. un programma GUI per controllare la simulazione real-time.

La simulazione e il test HIL in tempo reale consentono di:

- Affinare e verificare il funzionamento funzionale dei sistemi di controllo mediante hardware;
- Esplorare e testare continuamente nuove idee utilizzando una piattaforma flessibile e scalabile;
- Analizzare scenari e interazioni hardware complesse, costose o pericolose da eseguire con l'hardware di produzione;
- Evitare costosi difetti di progettazione rilevando tempestivamente gli errori quando è ancora conveniente correggerli.

La Speedgoat Target Hardware (Fig. 3.2) viene adoperata come una vera e propria ECU, andando a telecaricare una logica di controllo in real-time, o, in alternativa, è stata anche adoperata come involucro real-time per far girare il controllore sviluppato nell'ambito di tale attività di ricerca, proiettando l'applicazione di tale elemento anche su un futuro test in vettura. Infatti, attraverso tale hardware, si può andare a testare l'algoritmo sviluppato durante l'esecuzione dei modelli alle velocità richieste, rispettando precisi requisiti di temporizzazione.



**Fig. 3-2: Mathworks Speedgoat Target Hardware**

IPG Automotive sviluppa soluzioni di simulazione automobilistica e test di guida virtuali applicabili alle aree della guida autonoma, ADAS, ingegneria dei propulsori, dinamica del veicolo, sistema di controllo e altri. L'azienda offre una vasta gamma di sistemi compositi hardware e software e servizi di ingegneria a case automobilistiche, OEM, sviluppatori, ecc. La sua offerta include software di simulazione (AutoMaker/TruckMaker/MotorcycleMaker), hardware in tempo reale (Xpack4 Technology/Fail Safe Tester/Interfaccia video Box), sistemi di prova (banchi prova/sistemi HIL/sistemi VIL / simulatori di guida) e servizi di consulenza.

L'Xpack4 Real-Time Target (Fig. 3.3) è una piattaforma di test con più core di processore per prestazioni migliorate, dotata di terminali PCI compatti per una maggiore flessibilità con moduli intercambiabili in base ai requisiti di test. Uno dei moduli principali e necessari anche per la comunicazione della piattaforma considerata è lo slot CAN.



**Fig. 3-3: IPG Roadbox Xpack4**

CAN è l'acronimo della cosiddetta tecnologia Controller Area Network, uno standard di serie per bus di campo in ambito prevalentemente automotive di tipo multicast. Bus in gergo elettronico equivale a collettore (canale di raccolta dei dati).

Si tratta di un vero e proprio protocollo di rete di bordo paragonabile alle reti LAN per i PC. Questo impianto elettrico intelligente trasmette dati in modo diverso in confronto alle vecchie centraline. Rispetto alle centraline del passato quelle di oggi montate sui veicoli sono del tutto simili a personal computer: hanno un proprio sistema operativo, un programma da eseguire e sono collegate in rete tra loro. L'obiettivo è uno solo: la condivisione delle informazioni.

La trasmissione di dati avviene secondo un modello basato su bit dominanti (gli 0 logici) e recessivi (gli 1 logici) dove il bit dominante vince tra i due e può essere visibile in rete mentre il bit recessivo viene semplicemente ignorato. Con questo sistema si è sicuri che, tutte le volte che s'impone una differenza di potenziale, la rete rileva (ovvero 'sa', essendo un impianto elettrico intelligente) che si tratta di un bit dominante.

Sono i frame (detti anche messaggi) ad eseguire l'effettiva trasmissione dei dati. I messaggi possono essere in due formati: base frame format (con 11 bit di identificazione) ed extended frame format (29 bit).

Attraverso il bus CAN è possibile quindi far comunicare i due hardware real-time considerati, andando opportunamente a configurare prima di tutto a livello hardware il collegamento, indirizzando la trasmissione sullo stesso bus di rete CAN, e, successivamente, indirizzando i segnali su dei frame creati ad hoc per lo scambio di informazioni necessarie. A tale scopo è stato quindi creato un vero e proprio database CAN (.dbc) in cui è stato definito lo scambio dei messaggi CAN in Rx (ricezione) e Tx (trasmissione) proveniente e diretto da ogni nodo della rete (Speedgoat e Xpack).

In Fig. 3.4 si può vedere la struttura del database CAN creato:

Signals / Receive-Nodes

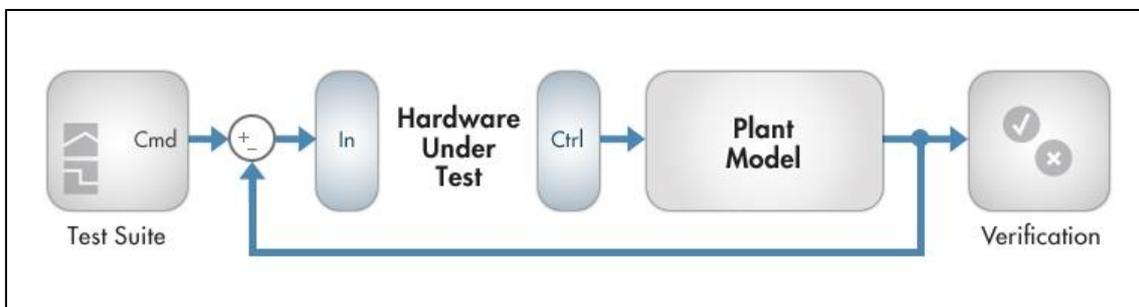
	SPEEDGOAT	CARMAKER
▷ VEHICLE1		<b>TX</b>
▷ VEHICLE2		<b>TX</b>
▷ DASM		<b>TX</b>
▷ TCT_LOGIC_Counter_Flag	<b>TX</b>	
▷ TCT_LOGIC_Flag	<b>TX</b>	
▷ TCT_LOGIC_surrogate_parameters	<b>TX</b>	
▷ TCT_LOGIC_surrogate_measures	<b>TX</b>	
▷ TCT_LOGIC_surrogate_measures_delta	<b>TX</b>	
▷ TCT_LOGIC_ADAS_logic_activation	<b>TX</b>	

All Signals												
	Name	Type	Byteorder	Mode	Bitpos	Length	Factor	Offset	Minimum	Maximum	Unit	TX Message
1	Gear_Engaged	Unsigned	Motorola	Signal	0	3	1	0	0	0	6 [-]	VEHICLE1
2	Ignition	Unsigned	Motorola	Signal	3	2	1	0	0	0	1 [-]	VEHICLE1
3	Trq_Brake	Unsigned	Motorola	Signal	29	11	0,73242	-1500	-1500	1500	[Nm]	VEHICLE1
4	Key	Unsigned	Motorola	Signal	5	2	1	0	0	0	1 [-]	VEHICLE1
5	Brake_pedal_position	Unsigned	Motorola	Signal	8	8	0,3906	0	0	100	[%]	VEHICLE1
6	driver_brake	Unsigned	Motorola	Signal	32	8	1	0	0	0	255 [-]	VEHICLE1
7	AEActive	Unsigned	Motorola	Signal	40	8	1	0	0	0	255 [-]	VEHICLE1
8	Longitudinal_Lvel	Unsigned	Motorola	Signal	8	16	0,0030517	-100	-100	100	[m/s]	VEHICLE2
9	Longitudinal_acc	Unsigned	Motorola	Signal	28	12	0,02	-40,92	-40,92	40,92	[m/s <sup>2</sup> ]	VEHICLE2
10	ds_x	Unsigned	Motorola	Signal	12	12	0,17089	-350	-350	350	[m]	DASM
11	ds_y	Unsigned	Motorola	Signal	16	12	0,17089	-350	-350	350	[m]	DASM
12	ds_p	Unsigned	Motorola	Signal	36	12	0,2441	-500	-500	500	[m/s]	DASM
13	dv_p	Unsigned	Motorola	Signal	56	16	0,0030517	-100	-100	100	[m/s]	DASM
14	alpha	Unsigned	Motorola	Signal	40	12	0,0015339	0	0	0	6,28318 [rad]	DASM
15	Counter_flag_collision	Unsigned	Motorola	Signal	12	12	1	0	0	0	4096 [-]	TCT_LOGIC_Counter_Flag
16	Counter_flag_TTC	Unsigned	Motorola	Signal	28	12	1	0	0	0	4096 [-]	TCT_LOGIC_Counter_Flag
17	Counter_flag_MTTC	Unsigned	Motorola	Signal	32	12	1	0	0	0	4096 [-]	TCT_LOGIC_Counter_Flag
18	Counter_flag_DRAC	Unsigned	Motorola	Signal	52	12	1	0	0	0	4096 [-]	TCT_LOGIC_Counter_Flag
19	Counter_flag_MDRAC	Unsigned	Motorola	Signal	56	12	1	0	0	0	4096 [-]	TCT_LOGIC_Counter_Flag
20	Flag_TTC	Unsigned	Motorola	Signal	0	8	1	0	0	0	1 [-]	TCT_LOGIC_Flag
21	Flag_MTTC	Unsigned	Motorola	Signal	8	8	1	0	0	0	1 [-]	TCT_LOGIC_Flag
22	Flag_DRAC	Unsigned	Motorola	Signal	16	8	1	0	0	0	1 [-]	TCT_LOGIC_Flag
23	Flag_MDRAC	Unsigned	Motorola	Signal	24	8	1	0	0	0	1 [-]	TCT_LOGIC_Flag
24	Flag_collision	Unsigned	Motorola	Signal	32	8	1	0	0	0	1 [-]	TCT_LOGIC_Flag
25	TTC_estimation	Unsigned	Motorola	Signal	12	12	1	0	0	0	4095 [-]	TCT_LOGIC_surrogate_parameters
26	MTTC_estimation	Unsigned	Motorola	Signal	16	12	1	0	0	0	4095 [-]	TCT_LOGIC_surrogate_parameters
27	DRAC_estimation	Unsigned	Motorola	Signal	36	12	1	0	0	0	4095 [-]	TCT_LOGIC_surrogate_parameters
28	MDRAC_estimation	Unsigned	Motorola	Signal	40	12	1	0	0	0	4095 [-]	TCT_LOGIC_surrogate_parameters
29	TET_estimation	Unsigned	Motorola	Signal	60	12	1	0	0	0	4095 [-]	TCT_LOGIC_surrogate_parameters
30	following_v	Unsigned	Motorola	Signal	8	16	0,009155	-300	-300	300	[km/h]	TCT_LOGIC_surrogate_measures
31	leading_v	Unsigned	Motorola	Signal	24	16	0,009155	-300	-300	300	[km/h]	TCT_LOGIC_surrogate_measures
32	following_a	Unsigned	Motorola	Signal	44	12	0,02	-40,92	-40,92	40,92	[m/s <sup>2</sup> ]	TCT_LOGIC_surrogate_measures
33	leading_a	Unsigned	Motorola	Signal	48	12	0,02	-40,92	-40,92	40,92	[m/s <sup>2</sup> ]	TCT_LOGIC_surrogate_measures
34	delta_v	Unsigned	Motorola	Signal	8	16	0,009155	-300	-300	300	[km/h]	TCT_LOGIC_surrogate_measures_delta

**Fig. 3-4: Database CAN**

Tale database è generico e consente di scambiare le informazioni necessarie per far girare in real-time sulla Speedgoat l’algoritmo di controllo creato per verificare la corretta esecuzione dei testcase durante la simulazione in continuo.

Considerando lo schema rappresentativo di un sistema HIL under test (Fig. 3.5), si può quindi ritenere che l’hardware under test sia costituito dalla Speedgoat e dall’Xpack4 che comunicano tra loro attraverso bus CAN opportunamente configurato, mentre il Plant Model è costituito da IPG Carmaker (modello driver e dinamica veicolo) e PTV Vissim per la simulazione del traffico.



**Fig. 3-5: Schema a blocchi sistema HIL under test**

### 3.1.2 Modello di simulazione del driver e del veicolo: IPG CarMaker

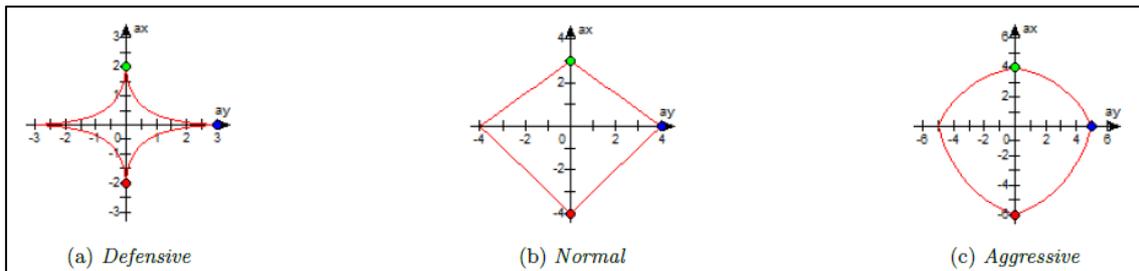
Il software utilizzato per raggiungere gli obiettivi dell'attività di ricerca è CarMaker, della società IPG Automotive, uno strumento di simulazione che può essere utilizzato per testare veicoli leggeri in un ambiente virtuale realistico durante ogni fase del processo di sviluppo in-the-loop. L'azienda fornisce anche altri software, come TruckMaker o MotorcycleMaker, che vengono adottati per testare rispettivamente veicoli pesanti (come camion, autobus e veicoli speciali) e due ruote motorizzate. CarMaker è una piattaforma di test che consente di ricreare scenari di test del mondo reale in un ambiente virtuale, simulando ogni tipo di strada e traffico, ed eseguendo un'esecuzione realistica attraverso il metodo di test basato su eventi e manovre. Inoltre, il software IPG include un modello di veicolo completo, con la possibilità di cambiare molti elementi della dinamica del veicolo, e un modello di guidatore intelligente, in cui è possibile modificare il comportamento del guidatore (difensivo, normale, aggressivo, ecc...).

Per poter modellare le sollecitazioni applicate a un veicolo durante la guida, una buona rappresentazione del driver è importante. Uno dei fattori che ha il maggiore impatto sul gruppo propulsore in termini di resistenza è l'aggressività del guidatore. L'aggressività del guidatore è caratterizzata da elevate accelerazioni longitudinali e laterali, che si traducono in coppie elevate nel gruppo propulsore e quindi riduce la durata del gruppo propulsore.

Il modello di comportamento del driver può essere sviluppato in molti modi diversi, ma il modello utilizzato in questo lavoro è un modello predefinito in IPG CarMaker, che si basa su controllori PID (Proportional-integral-derivative), un approccio comunemente usato nell'industria Automotive.

Ogni persona ha il proprio modo di guidare e questo si traduce in un unico set di requisiti per i componenti veicolari. Naturalmente, questi sono progettati per resistere ai requisiti più difficili del cliente, ma per capire completamente come vengono utilizzati i componenti, è importante anche sapere come usano il veicolo i conducenti meno aggressivi. Pertanto, nel processo di sviluppo del prodotto sono necessari modelli di driver di diversa aggressività.

I conducenti in generale hanno un limite all'accelerazione, fino al quale si sentono a proprio agio, che differisce dal guidatore al conducente. Il limite è una combinazione di accelerazione longitudinale e laterale ed è solitamente visualizzato in un diagramma di accelerazione, mostrato nella Figura 3.6. L'area all'interno della linea rossa assomiglia a tutte le combinazioni di accelerazione longitudinale e laterale con cui il guidatore è a suo agio. Nelle tre figure 3.6a, 3.6b e 3.6c vengono mostrati i diagrammi di accelerazione per diversi tipi di driver predefiniti in CarMaker.



**Fig. 3-6: Diagramma accelerazioni driver da CarMaker**

Generalmente, l'accelerazione laterale è meno comoda da sopportare rispetto a quella longitudinale, poiché non esiste un punto di appoggio diretto come il volante fornisce durante la decelerazione longitudinale e la sedia durante l'accelerazione longitudinale.

L'approccio classico utilizzato durante la modellazione di un driver è un controller PID continuo che segue un profilo di velocità. Di solito, due controller PID quasi indipendenti controllano la dinamica longitudinale e laterale, il che è un buon metodo per ridurre gli errori laterali, ma non si comporta come un vero pilota. I due controller vengono solo accoppiati quando si verifica una situazione di guida critica e il controller laterale riduce l'angolo dell'acceleratore e applica la forza al pedale del freno.

Per simulazioni più semplici, simulazioni di guida di veicoli a circuito chiuso, il controller PID funziona sufficientemente bene. Se le simulazioni sono più avanzate, è preferibile un cosiddetto modello di driver ibrido, che prende in considerazione più obiettivi basati su situazioni differenti, come l'ottimizzazione della posizione sulla strada e la previsione della velocità ottimale.

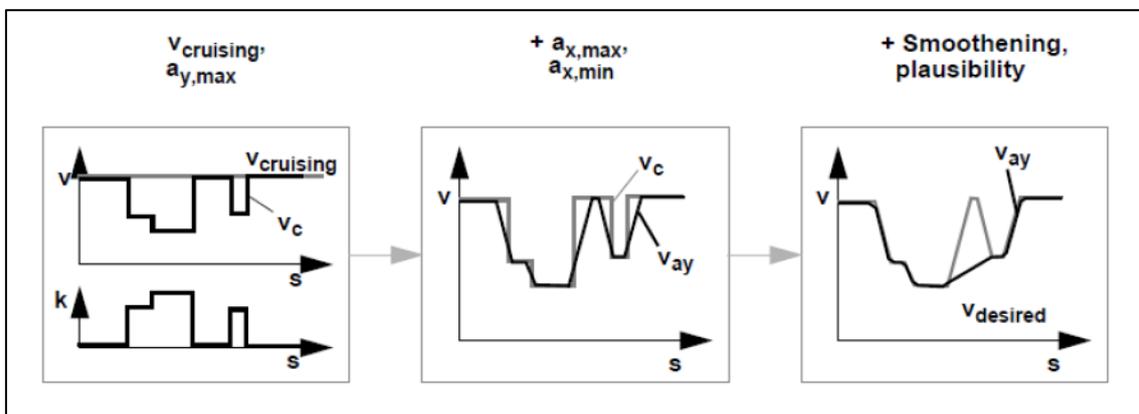
Il modello di comportamento del conducente in CarMaker si basa su un controller PID, ma molto più complesso. Non controlla semplicemente l'attuale situazione di guida, ma effettua una previsione futura utilizzando i polinomi di Taylor. Inoltre, considera gli studi psicologici e le misurazioni di veri collaudatori per approssimare il comportamento del conducente al più realistico possibile.

Visto che il driver è già sviluppato in CarMaker, oltre alla definizione dell'aggressività del driver, che va a definire, come visto, l'accelerazione longitudinale e laterale, è anche possibile cambiare come e quando il guidatore cambia marcia e come velocemente può attuare i pedali, anche se questi parametri riguardano principalmente le trasmissioni manuali, per cui dipende dalla tipologia di trasmissione che viene scelta durante la fase di simulazione (adoperando una trasmissione automatica tali parametri non entrano in gioco).

Per poter modellare diversi tipi di driver, è necessario sviluppare più set di parametri del driver, impostando per esempio un set di parametri del driver difensivo, normale e aggressivo. In termini di danni al gruppo propulsore, diverse combinazioni di

questi potrebbero essere un modo per modellare una grande porzione della popolazione usando solo pochi set di parametri.

Il modello di driver incluso in CarMaker calcola la velocità statica desiderata,  $v$ , in tre fasi, come mostrato nella figura 3.7. Nella prima fase utilizza i limiti di velocità, l'accelerazione laterale massima consentita,  $a_y$  e la curvatura,  $k$ , della pista per calcolare la velocità desiderata. Nella seconda fase l'accelerazione viene livellata per assicurarsi che nessuna accelerazione o decelerazione,  $a_x$ , sia superiore ai limiti massimi consentiti. Nella terza fase, grossi aumenti e decrementi temporanei della velocità vengono attenuati poiché un guidatore normale non cambia pedali spesso. Nella Figura 3.7 viene mostrata un'immagine schematica del processo, dove  $s$  nei grafici è la distanza percorsa.



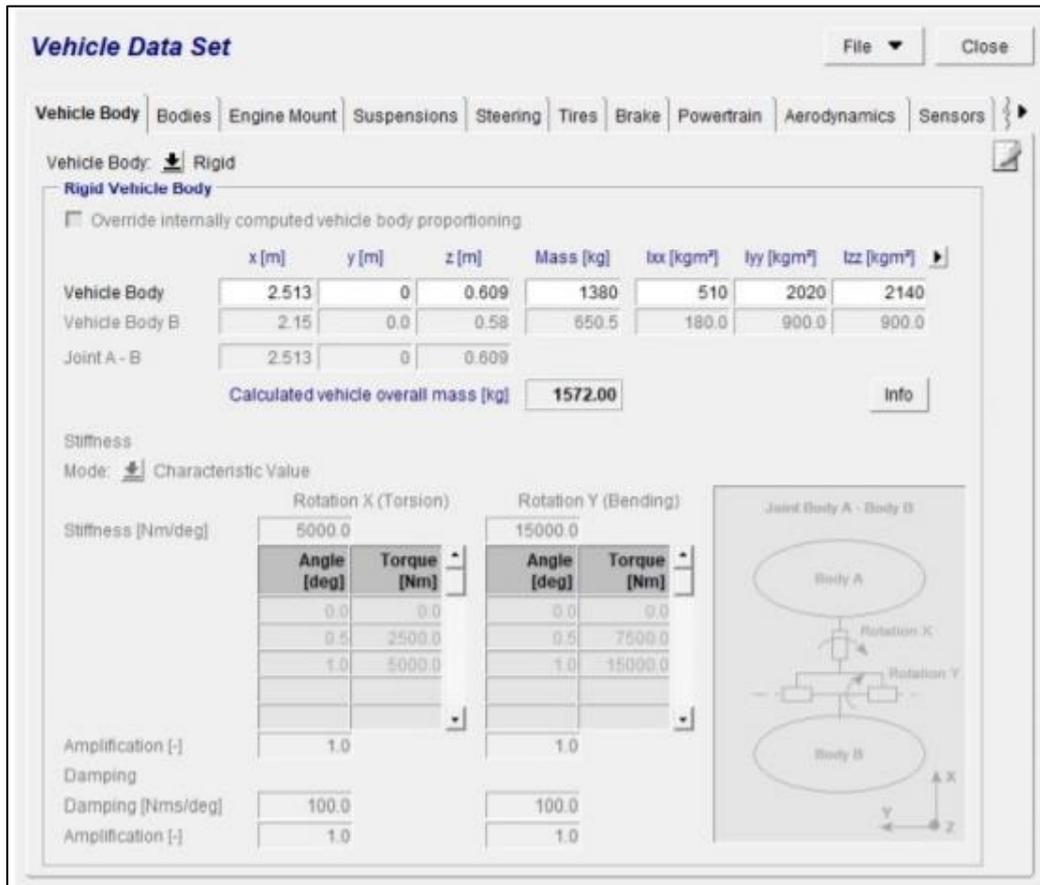
**Fig. 3-7: I tre step per calcolare la velocità desiderata per la propulsione del veicolo**

Per quanto riguarda il modello di dinamica veicolo, CarMaker si basa su modelli fissati (veicolo, sospensioni, pneumatici, ecc.), chiamati data set (Fig. 3.8), le cui proprietà possono essere variate. Una volta selezionato un set di dati, è possibile avviare un TestRun, che rappresenta uno scenario di test in cui tutti i parametri dell'ambiente virtuale (veicolo, conducente, strada, manovra, ecc.) sono sufficientemente definiti.

Le possibilità di tuning sono davvero ampie; è possibile modificare una grande quantità di proprietà e caratteristiche fisiche della macchina simulata:

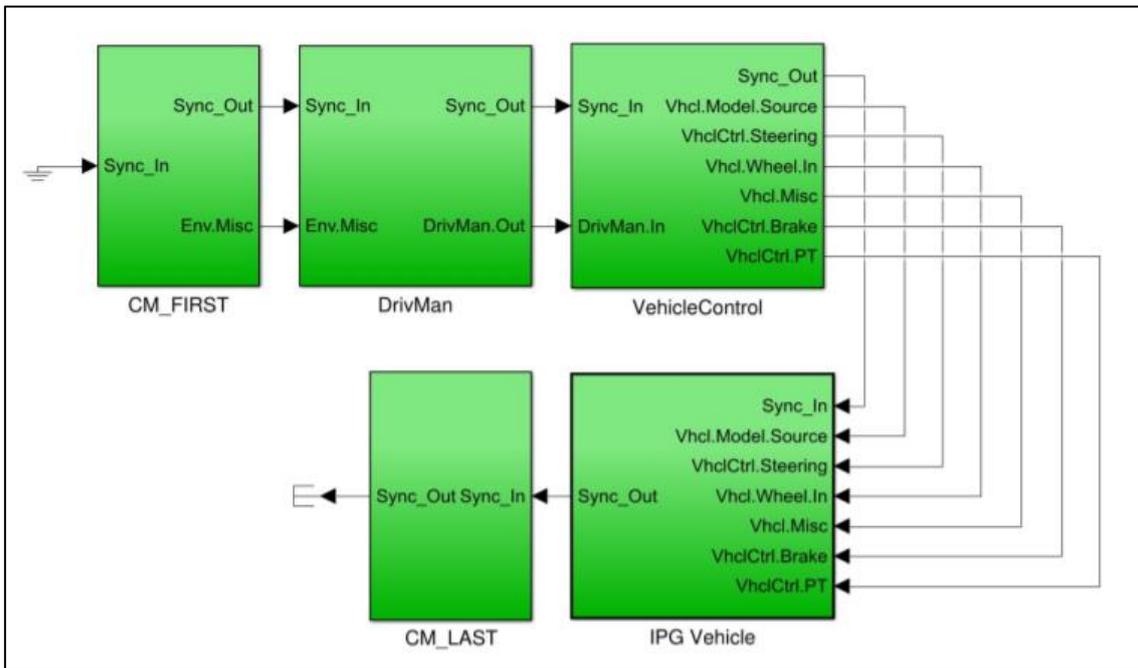
- Informazioni geometriche di carrozzeria e ruote
- Carichi auto e rimorchio
- Pneumatici
- Tipo di sospensione, proprietà elastiche, ammortizzatori, cuscinetti delle ruote
- Engine mounting
- Modello sterzo

- Modello freno
- Modello Powertrain
- Aerodinamica
- Sensori
- Controllo veicolo.



**Fig. 3-8: Data Set Veicolo in IPG CarMaker**

Considerando che alla base di CarMaker ci sia un modello Simulink rappresentativo del veicolo virtuale, questo viene generato e rappresentato come una serie di sottosistemi collegati. Al livello più alto del modello, la divisione in blocchi è quella mostrata in figura 3.9:

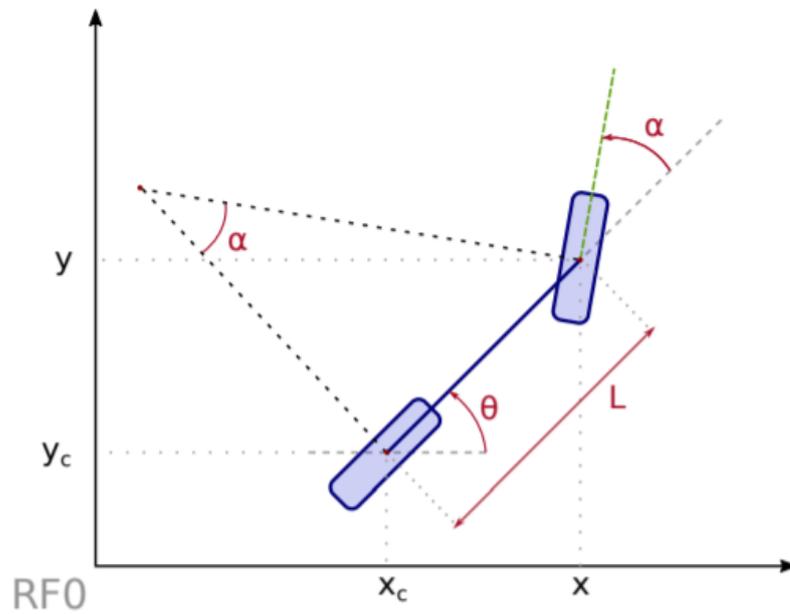


**Fig. 3-9: Modello di veicolo generato in CarMaker**

Dal punto di vista di un utente CarMaker che vuole eseguire una simulazione senza implementare nuovi sistemi di controllo, tutto è pronto per essere utilizzato e non sono necessarie modifiche al modello Simulink. Attraverso l'interfaccia grafica di CarMaker, l'utente può impostare un driver virtuale che agisce sul volante seguendo una regola definita (ad esempio, l'applicazione di un segnale d'onda sinusoidale) e che mantiene la velocità target.

Il modello di veicolo viene rappresentato in maniera semplificata attraverso il modello a bicicletta. Questa approssimazione viene spesso applicata ai veicoli a quattro ruote poiché si adatta bene al comportamento di un'auto standard quando non ci sono elevate forze laterali, ossia in condizioni solitamente standard.

Il modello di bicicletta semplificato è composto da due ruote collegate tramite un corpo rigido di lunghezza arbitraria L. Solo la ruota anteriore è in grado di sterzare, ruotando attorno al suo centro (Fig. 3.10).



**Fig. 3-10: Modello veicolo a bicicletta**

Dove:

- $L$ : baseline, distance between the wheels
- $\alpha$ : steering angle of the steering wheel
- $\theta$ : orientation with respect to the world reference frame (RFO)
- $(x_c, y_c)$ : position of the non-steering (rear) wheel
- $(x, y)$ : position of the steering (front) wheel

Date queste informazioni, lo stato del sistema può essere descritto come:

$$q = [x \ y \ \theta \ \alpha]^T$$

Per ogni ruota viene definito un vincolo per evitare lo slittamento (le ruote non possono muoversi la direzione laterale):

$$\dot{x}_c \sin(\theta + \alpha) - \dot{y}_c \cos(\theta + \alpha) = 0$$

$$\dot{x} \sin(\theta) - \dot{y} \cos(\theta) = 0$$

Un ulteriore vincolo è rappresentato dal collegamento rigido tra le ruote:

$$x_c = x + L \cos \theta$$

$$y_c = y + L \sin \theta$$

Che può essere riscritta come:

$$\dot{x} \sin(\theta + \alpha) - \dot{y} \cos(\theta + \alpha) + L\dot{\theta} \cos \alpha = 0$$

Considerando che il modello di bicicletta si avvicina a un'auto, si ipotizza che la potenza arrivi dalle ruote non sterzanti (trazione posteriore). L'equazione che descrive lo stato del sistema è quindi:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ \frac{1}{L} \tan \alpha \\ 0 \end{bmatrix} v + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega \quad \text{Eq. 3.1}$$

dove  $v$  è la velocità lineare e  $\omega$  è la velocità di rotazione delle ruote.

L'equazione si può anche riscrivere come:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ \frac{1}{L} \tan \alpha \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 3.2}$$

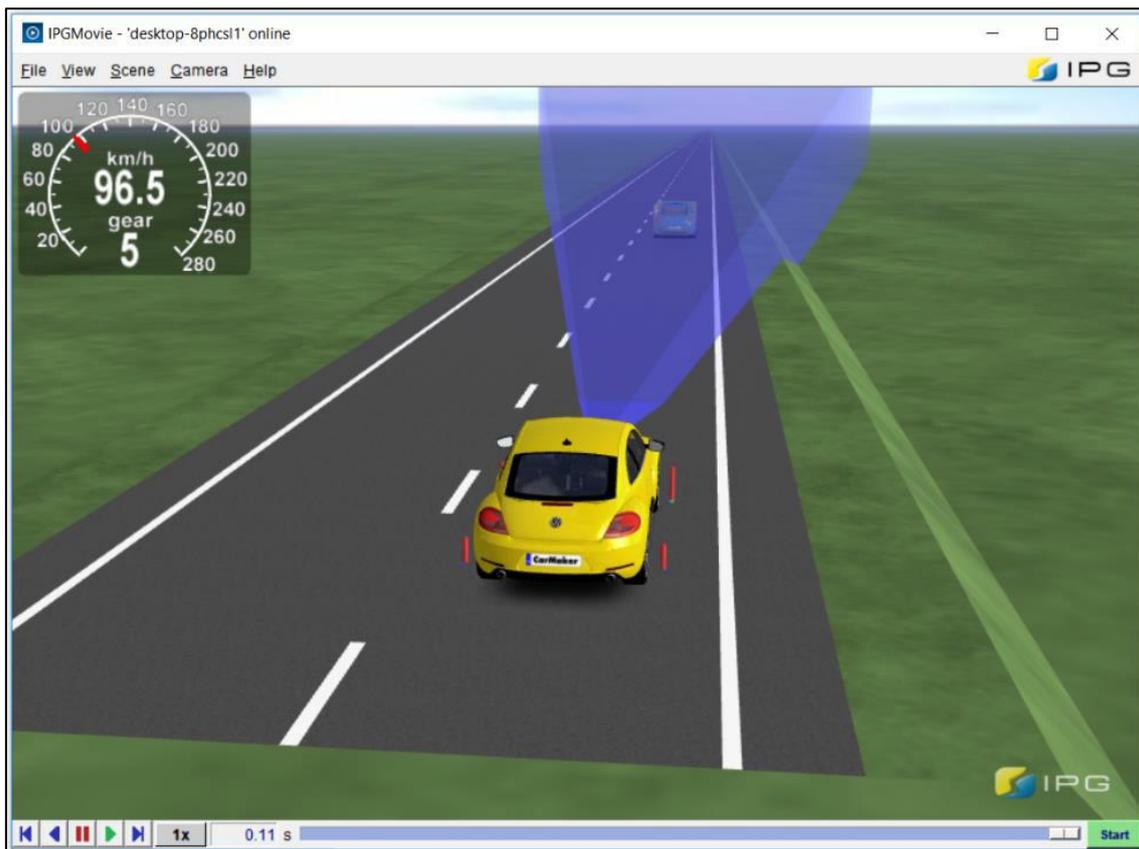
Il primo problema da risolvere è come controllare il modello di bicicletta senza agire direttamente sulla velocità lineare o angolare. Un veicolo simulato CarMaker accetta come input i comandi che un vero guidatore applicherebbe: pressione sul pedale e attuazione sul volante.

### 3.1.3 Ambiente di simulazione virtuale: IPG CarMaker

CarMaker è un software ampiamente utilizzato per i test di guida virtuali e la simulazione dei veicoli. Con CarMaker è possibile generare un veicolo virtuale e l'ambiente che lo circonda con un grado di dettaglio estremo eseguendo dei test drive per testare e validare logiche di controllo.

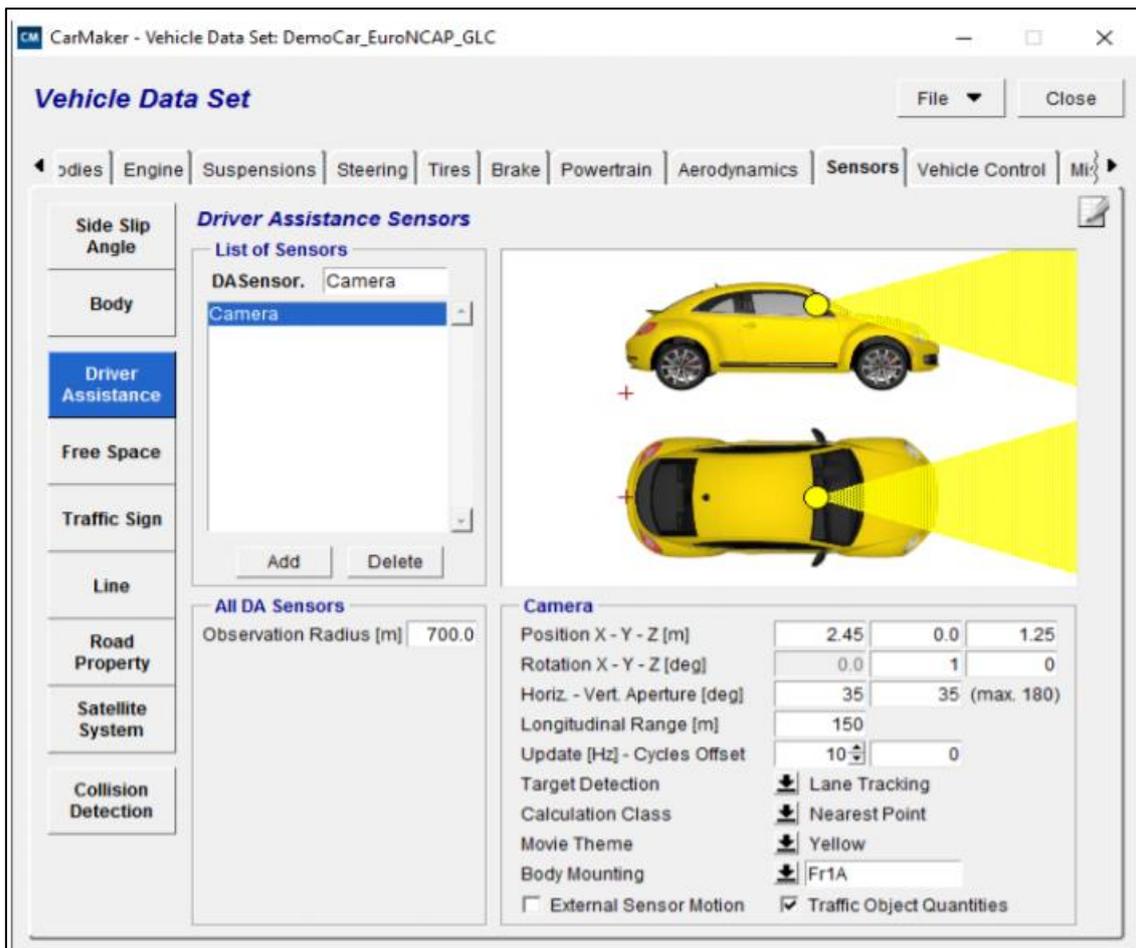
Nell'ambiente CarMaker la creazione e la rappresentazione del modello stradale può essere eseguita in diversi modi. L'ambiente può essere personalizzato in più modi, variando i parametri stradali o anche le condizioni meteorologiche, rendendo facile ricreare una varietà di diversi scenari.

In Fig. 3.11 viene illustrato a titolo di esempio uno screen di una simulazione in ambiente 3D.



*Fig. 3-11: Ambiente 3D di IPG CarMaker*

Nella sezione Sensors (Fig. 3.12) il veicolo può essere dotato di una serie di sensori, quali ad esempio Camera e Radar, i quali possono fornire durante la simulazione le informazioni necessarie per poter testare opportunamente una logica di controllo collegata al sistema X-il under test.



*Fig. 3-12: Sezione Sensors in IPG CarMaker*

A seconda del livello di dettaglio che si vuole ottenere dal sensore simulato, si ha la possibilità di scegliere una diversa tipologia di sensore, come mostrato in Fig. 3.13.

Ideal Sensors	High Fidelity Sensors	Raw Signal Interfaces
Object Sensor	Radar Sensor	Camera RSI
Free Space Sensor	Global Navigation Sensor	
Traffic Sign Sensor		
Line Sensor		
Road Sensor		
Collision Sensor		
Slip Angle Sensor		
Inertial Sensor		

*Fig. 3-13: Tipologie di sensori disponibili in IPG CarMaker*

### 3.1.4 SW di traffic simulation: PTV Vissim

PTV VISSIM è un software che fa parte della linea di prodotti PTV Vision e che permette di effettuare analisi dei sistemi di traffico mediante simulazioni microscopiche. La sua flessibile struttura di rete permette all'utente di modellizzare qualsiasi tipo di infrastruttura di trasporto e differenti comportamenti di guida dei conducenti.

La circolazione viene simulata tenendo conto delle differenti caratteristiche riguardanti la strutturazione delle corsie, la composizione del traffico, la regolazione della precedenza agli incroci e le prestazioni dei veicoli del traffico privato come di quelli del trasporto collettivo. Con PTV VISSIM si possono valutare differenti modi di gestione del traffico attraverso la descrizione qualitativa e quantitativa della circolazione stessa.

PTV VISSIM è completamente integrata con strumenti di simulazione real-time come simulatori dinamici dei veicoli quali CarMaker, al fine di raggiungere un maggiore livello di realtà virtuale 3D e consentire un test dettagliato dei veicoli autonomi. PTV VISSIM può essere utilizzato per trovare soluzioni ad un gran numero di problemi. Alcuni esempi indicativi possono illustrare il vasto campo di possibilità di impiego del programma:

- è possibile effettuare l'analisi della capacità e del funzionamento della circolazione in prossimità di nodi complessi, tenendo conto del transito di tram e bus.
- permette di comparare tra di loro diversi scenari progettuali che includono incroci a precedenza regolata da segnaletica, incroci a rotatoria, incroci semaforizzati, incroci a livelli sfalsati, e di valutare la capacità della strada.
- può essere utilizzato per valutare ed ottimizzare operazioni di traffico in reti con semaforizzazioni attuate e coordinate.
- consente l'analisi della capacità e del funzionamento di complesse stazioni di mezzi di trasporto pubblico su rotaia o su gomma.
- può essere applicato per valutare la flessibilità e l'impatto di mezzi su rotaia in reti stradali urbane.
- può utilizzare diverse logiche di regolazione semaforica. Oltre agli impianti semaforici basati su una sequenza predefinita di fasi a tempo fisso, possono essere simulati impianti semaforici attuati dal traffico le cui logiche di regolazione sono identiche ai pacchetti di software installati sul campo. Alcuni di essi possono essere costruiti a mano, altri possono essere simulati con l'aiuto di un generatore esterno del segnale (VAP).
- La struttura aperta di PTV VISSIM permette l'interfaccia con altre procedure di regolazione. Si sono potuti studiare gli effetti del posizionamento delle fermate rispetto alla capacità degli incroci in caso di priorità delle linee di trasporto pubblico.

- Con il modello di assegnazione dinamica, PTV VISSIM risponde anche a tutte quelle problematiche legate alla scelta degli itinerari.

La qualità del modello dei flussi di traffico, che descrive il movimento dei veicoli nella rete, è essenziale per la qualità del modello di simulazione stesso. Contrariamente a modelli più semplici che ipotizzano delle velocità più o meno costanti e dei processi di successione dei veicoli di tipo deterministico, PTV VISSIM impiega il modello di percezione psicofisica di Wiedemann.

L'idea di base del modello sottostà alla nozione che il conducente di un veicolo più rapido comincia a frenare nel momento in cui egli tocca la sua soglia individuale di percezione. Dal momento che non sa stimare in maniera esatta la velocità del veicolo che lo precede, la velocità del suo veicolo diminuisce al di sotto di questa, e ciò ha per conseguenza un'accelerazione dopo il superamento della sua soglia di percezione. Ne risulta una successione di lievi azioni di accelerazione e decelerazione.

Delle funzioni di distribuzione, riguardanti le velocità e il distanziamento tra i veicoli, permettono di tener conto del comportamento distinto di differenti conducenti.

L'idea di base del modello di Wiedemann è l'assunzione che un conducente può trovarsi in una delle quattro modalità di guida:

- *Guida libera*: non vi sono influenze dovute a veicoli che precedono. In questa modalità il conducente cerca di raggiungere e mantenere la propria velocità desiderata. In realtà, la velocità nella guida libera non può essere mantenuta costante, ma oscilla attorno alla velocità desiderata.
- *Approccio*: processo di adattamento della velocità del conducente alla minore velocità del veicolo precedente. Nell'avvicinarsi, un conducente applica una decelerazione tale che la differenza di velocità dei due veicoli è uguale a zero nel momento in cui egli raggiunge la sua distanza di sicurezza.
- *Accodamento*: il conducente segue il veicolo precedente senza una cosciente accelerazione o decelerazione. Egli mantiene la distanza di sicurezza in modo più o meno costante ma, a causa della difficoltà di controllo della velocità e di valutazione della distanza, la differenza di velocità oscilla attorno allo zero.
- *Frenata*: applicazione di una decelerazione medio – alta se la distanza scende al di sotto del valore di sicurezza desiderato. Questo può succedere se la macchina precedente cambia velocità improvvisamente, o se una terza macchina cambia corsia davanti al conducente osservato.

Per ciascuna modalità, l'accelerazione è descritta come il risultato di velocità, differenza di velocità, distanza e caratteristiche proprie del conducente e del veicolo. Il conducente può cambiare da una modalità ad un'altra non appena raggiunge un certo limite che può essere espresso dalla combinazione della differenza di velocità e della distanza.

Per esempio, una leggera differenza di velocità può essere realizzata in piccole distanze, mentre una differenza di velocità maggiore costringe i conducenti che si avvicinano a reagire molto prima. L'abilità di percepire le differenze di velocità e di stimare le distanze varia in funzione del conducente, così come le velocità desiderate e le distanze di sicurezza.

A causa della combinazione di aspetti psicologici e restrizioni fisiologiche della percezione del conducente, il modello è definito modello di percezione psicofisica.

L'assegnazione dinamica in PTV VISSIM è basata sulla simulazione iterata. Questo significa che una rete modellizzata è simulata non solo una volta, ma ripetutamente ed i conducenti scelgono l'itinerario in base alle esperienze che hanno avuto nelle precedenti simulazioni. Per modellizzare questo tipo di "processo di apprendimento" devono essere effettuate diverse elaborazioni:

- Devono essere trovati gli itinerari dai punti di origine (O) a quelli di destinazione (D). PTV VISSIM assume che non tutti utilizzano l'itinerario migliore, ma vengono utilizzati anche gli itinerari meno attrattivi, anche se da una minor parte di conducenti. Questo significa che non deve essere conosciuto solo l'itinerario migliore per ogni relazione O/D, ma anche altri itinerari alternativi. Nel caso ideale si avrebbe l'insieme dei k percorsi migliori, ma non esistono metodi efficienti per calcolare direttamente tali percorsi – almeno non in una maniera sensata per l'assegnazione del traffico. La soluzione adottata in PTV VISSIM è quella di calcolare i percorsi migliori per ciascuna iterazione della simulazione in modo da trovare più di un itinerario, in quanto le condizioni del traffico cambiano da iterazione ad iterazione e così altri percorsi diventano ottimali. Durante le iterazioni PTV VISSIM costruisce un archivio crescente di percorsi dal quale il conducente sceglie il proprio itinerario.
- Per i percorsi trovati deve essere calcolata una valutazione sulla cui base i conducenti possono effettuare la loro scelta. In PTV VISSIM per tutti i percorsi vengono calcolati i cosiddetti costi generalizzati, cioè una combinazione della distanza, del tempo di percorrenza e di "altri" costi (per esempio i pedaggi). La distanza ed i costi sono definiti direttamente nel modello di rete, ma il tempo di percorrenza è un risultato della simulazione. Per questo motivo PTV VISSIM calcola i tempi di percorrenza su tutti i segmenti presenti nella rete durante una simulazione, così il modello di scelta di itinerario nella successiva simulazione può utilizzare questi valori.
- La scelta di un itinerario tra l'insieme dei possibili percorsi è un caso particolare del problema definito "modello di scelta discreta". Dalla quantità dei percorsi e dei costi generalizzati viene calcolata per ogni itinerario la percentuale dei conducenti che lo scelgono. La funzione matematica che viene più di frequente utilizzata per modellizzare questo tipo di scelta è il modello Logit. PTV VISSIM utilizza una variante del modello Logit per gestire la scelta dell'itinerario.

Attraverso quindi il software PTV VISSIM si sono costruiti diversi modelli di traffico, la cui creazione parte da una planimetria che viene importata nel software e che permette di posizionare adeguatamente i nodi, gli archi e di creare quindi un grafo. In generale si definisce rete un grafo ai cui archi è associata una caratteristica quantitativa.

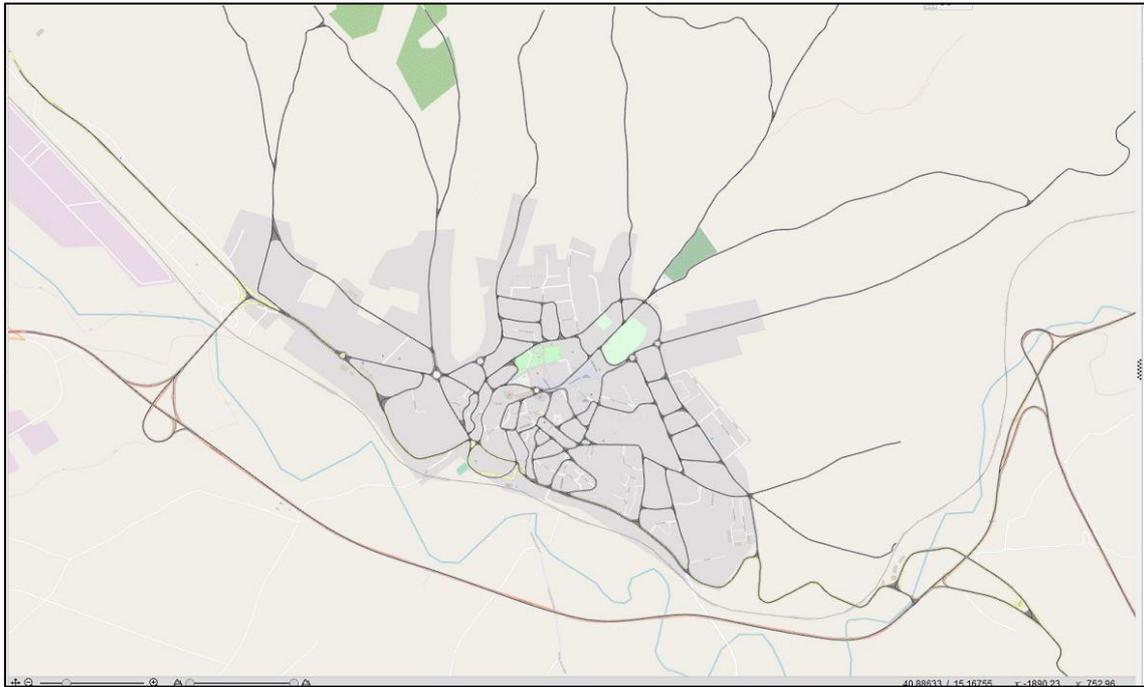
Nello specifico, si riporta il flusso adoperato per la creazione di un particolare scenario di traffico: la ricostruzione della rete stradale del comune di Lioni.

La prima fase ha avuto come obiettivo la ricostruzione della rete stradale tramite l'utilizzo di IPG CarMaker. Gli archi reputati rilevanti per la riproduzione delle prestazioni di interesse per questo lavoro, sono stati: 109 per quanto riguarda il comune di Lioni, più 38 archi esterni a quest'area, che includono la SS691 e la SS7 che è collegata alla SS400 che attraversa Lioni.

Il flusso di lavoro è stato il seguente:

- È stato eseguito un print screen dell'area di interesse da Google Maps al fine di importarlo in IPG CarMaker (dopo averlo opportunamente scalato) per avere le linee guida su cui poter ricostruire le infrastrutture rilevanti;
- sono stati tracciati gli archi attraverso il comando Point List;
- sono state inserite le intersezioni a raso attraverso il comando Junction;
- le rotatorie, non avendo un comando univoco in IPG CarMaker, sono state ricreate tramite questa procedura: è stato tracciato un arco curvo tramite il comando Turn, i due lembi (di inizio e fine curva) sono stati congiunti tramite il comando Connect allo scopo di formare un'infrastruttura a forma di anello. Quest'ultima è stata tagliata tramite il comando Split in corrispondenza dei punti in cui sono state inserite le Junction, che avevano il compito di collegare le infrastrutture di immissione e di uscita dalla rotatoria;
- sono state aggiunte le quote altimetriche, ovvero sia, tramite il sito Free Map Tools sono state rilevate le quote del Comune in ciascun nodo della rete e riportate in IPG CarMaker tramite il comando 3D surface;
- sono stati inseriti dei ponti nei punti in cui, in pianta, vi erano due strade incidenti, ma che nella realtà risultavano essere sfalsate. Tramite il comando Bridge si è, quindi, andata a tracciare la lunghezza dell'oggetto da sopraelevare;
- sono state ricostruite le rampe nelle intersezioni a livelli sfalsati tramite questo procedimento: è stata divisa la strada tramite il comando Split al fine di poter inserire le rampe (tramite il comando Ramp) in ingresso e/o uscita dallo svincolo; è stata creata una corsia di immissione, tramite il comando lane, per favorire lo spostamento in sicurezza dei veicoli nella strada esistente in maniera più dolce, operando infine una lineare riduzione della sua larghezza.

Il risultato ottenuto in pianta è il seguente:



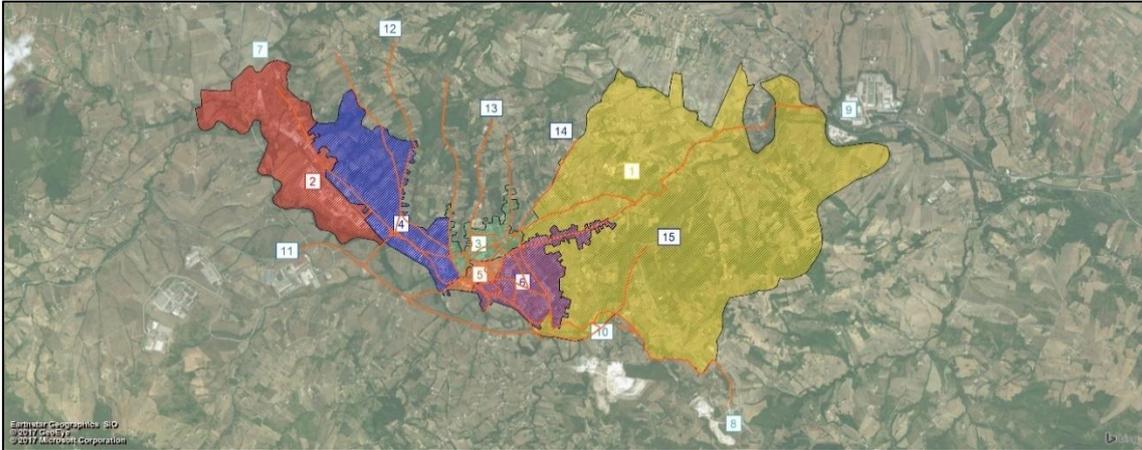
***Fig. 3-14: Rappresentazione grafico della rete stradale di Lioni***

Al termine del lavoro compiuto in IPG CarMaker, il file \*.rd5 è stato convertito in \*.anm per poter essere importato in PTV VISSIM.

È stato poi generato il file di estensione \*.inpx. che è stato soggetto prima a georeferenziazione e poi a correzione, ovvero sia adeguamento geometrico e funzionale della rete nel nuovo software.

Una volta costruita adeguatamente l'offerta si è proceduto alla definizione del modello di domanda.

L'area di studio è stata suddivisa in zone di traffico, partendo dalle sezioni censuarie fornite dall'ISTAT. Esse sono state aggregate, ottenendo un numero discreto di zone di traffico, allo scopo di ottenere porzioni di territorio con caratteristiche omogenee in termini di attività, accessibilità trasportistica, infrastrutture e servizi di trasporto (Fig. 3.15).



**Fig. 3-15: Zonizzazione**

I dati utilizzati per la stima della domanda di mobilità sono stati:

- a. dati forniti dall'ISTAT;
- b. conteggi di traffico nelle sezioni al cordone tramite cui si sono ottenuti gli spostamenti in ingresso e in uscita da Lioni

Inizialmente, per poter stimare la domanda relativa al comune di Lioni, si è fatto ricorso alla matrice di pendolarismo e poi integrati i conteggi nelle sezioni al cordone.

La stima della domanda OD è stata effettuata a valle dell'operazione di zonizzazione, che a sua volta è stata implementata partendo dalle sezioni censuarie fornite dall'ISTAT. Le sezioni censuarie sono state poi aggregate, ottenendo un numero discreto di zone di traffico. Il territorio comunale è stato discretizzato in 6 zone omogenee di traffico.

Una seconda sorgente di dati ISTAT, utilizzata per lo più per comprendere gli spostamenti che l'area di studio "scambia" con l'ambiente esterno è stata la matrice di pendolarismo, che è la matrice origine-destinazione degli spostamenti che avvengono per motivi di lavoro o di studio e si riferisce alla popolazione residente in famiglia o in convivenza.

Il file, messo a disposizione dall'ISTAT, contiene i dati sul numero di persone che si spostano tra comuni o all'interno dello stesso, classificate per: motivo dello spostamento, sesso, mezzo di trasporto utilizzato, fascia oraria di partenza e durata del tragitto. Particolare rilievo hanno avuto i conteggi al cordone, che hanno consentito di quantificare in dettaglio le percentuali di ripartizione degli spostamenti di scambio ed attraversamento tra le diverse sezioni al cordone e di ottenere una matrice completa dell'area di studio.

In questo modo si sono ottenuti gli spostamenti sistematici che avvengono (all'interno dell'area di studio, tra l'interno e l'esterno, e viceversa) nell'ora di punta

della mattina. Per questa fascia oraria è stato estratto il numero degli spostamenti che avvengono in auto.

Per poter confrontare la percorrenza dei diversi veicoli considerati, per dimensioni e impatti, questo valore è stato reso omogeneo con opportuni coefficienti di omogeneizzazione.

Si riportano, dettagliatamente, le fasi operative che sono state eseguite per giungere alla stima della matrice origine – destinazione.

- I. Per ogni sezione censuaria relativa al comune di Lioni sono stati considerati:
  - La popolazione residente che si sposta giornalmente nel comune di dimora, in questo caso Lioni (riportata nel censimento della popolazione con il codice P137);
  - La popolazione residente che si sposta giornalmente fuori dal comune di dimora, in questo caso Lioni (riportata nel censimento della popolazione con il codice P138);
  - La percentuale di addetti (riportata nel censimento dell'industria e dei servizi);
  - La percentuale degli occupanti (riportata nel censimento con il codice P61);
  - Valori assunti come spostamenti sistematici emessi nell'intera giornata indipendentemente dal mezzo utilizzato.

Questi dati sono poi stati aggregati per zone di traffico.

- II. A partire dalla matrice di pendolarismo si sono ricavati:
  - la percentuale degli spostamenti che avvengono in auto;
  - la percentuale degli spostamenti che avvengono nell'ora di punta;
  - il numero di spostamenti sistematici dall'esterno all'interno, utilizzando dei filtri dai quali riusciamo a ricavare la particella censuaria di destinazione.
- III. Grazie ai conteggi al cordone, si sono ottenuti gli spostamenti in ingresso e in uscita da Lioni.
- IV. I dati forniti dall'ISTAT P137 e P138, essendo una percentuale degli spostamenti totali, sono stati corretti con le percentuali ricavate dal 14° rapporto sulla mobilità in Italia, utilizzando come parametri dei valori nell'intorno del valore soglia:
  - % sistematici URB: 0,57;
  - % fascia oraria: 0,12;
  - % spostamenti sistematici di scambio: 0,66.
- V. Per quello che riguarda la percentuale di utilizzo dell'auto è stata determinata sulla base di uno studio della Regione Lombardia, considerando come nel caso precedente un intorno di variazione:

- % auto: 0,55.

VI. A questo punto è stato calcolato ogni elemento della matrice OD (Fig. 3.16), *dod*, che rappresenta il numero medio di spostamenti dall'origine O alla destinazione D.

O/D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	0	1	1	1	3	1	0	0	0	1	0	0	0	1
2	0	0	2	2	4	8	1	1	1	1	1	0	0	0	2
3	1	1	5	5	10	20	3	2	2	1	3	0	0	1	6
4	1	1	6	6	11	24	4	3	2	2	3	0	0	1	6
5	1	1	5	5	10	20	3	2	1	1	2	0	0	0	5
6	0	0	4	4	7	15	2	2	1	1	2	0	0	0	4
7	0	0	0	0	0	10	34	24	18	15	29	3	4	5	59
8	0	0	0	0	0	8	25	18	13	11	22	3	3	4	44
9	0	0	0	0	0	4	13	10	7	6	12	1	1	2	23
10	0	0	0	0	0	12	39	28	20	17	34	4	4	6	67
11	0	0	0	0	0	20	67	48	35	29	59	7	7	11	117
12	0	0	0	0	0	1	3	2	2	1	3	0	0	1	6
13	0	0	0	0	0	2	6	4	3	2	5	1	1	1	10
14	0	0	0	0	0	2	7	5	4	3	6	1	1	1	12
15	0	0	0	0	0	20	67	48	35	29	59	7	7	11	117

*Fig. 3-16: Matrice OD*

Una volta effettuata la zonizzazione ed ottenuta la matrice OD, si è proceduto al calcolo dei flussi di percorso sulla rete. Esso è stato effettuato in ambiente macroscopico (PTV Visum) al fine di sfruttare i vantaggi delle assegnazioni macroscopiche per il calcolo dei percorsi di rete. Essi sono stati calcolati tramite

un'assegnazione stocastica all'equilibrio. Ottenuti i flussi di percorso si è provveduto ad una loro importazione in ambiente microscopico al fine di propagarli opportunamente in esso. Questa operazione è stata effettuata in quanto il pacchetto PTV permette una robusta e veloce integrazione dei due mondi (macroscopico e microscopico) e quindi permette di sfruttare a pieno le peculiarità dei due mondi.

Infine, è stata effettuata una calibrazione, ossia un processo di aggiustamento dei parametri presenti nel modello di micro-simulazione, al fine di permettere al software stesso di fornire dei risultati il più possibile in linea con le informazioni (flusso, velocità, lunghezza code) ottenute mediante appositi rilievi effettuati sul fenomeno oggetto di studio.

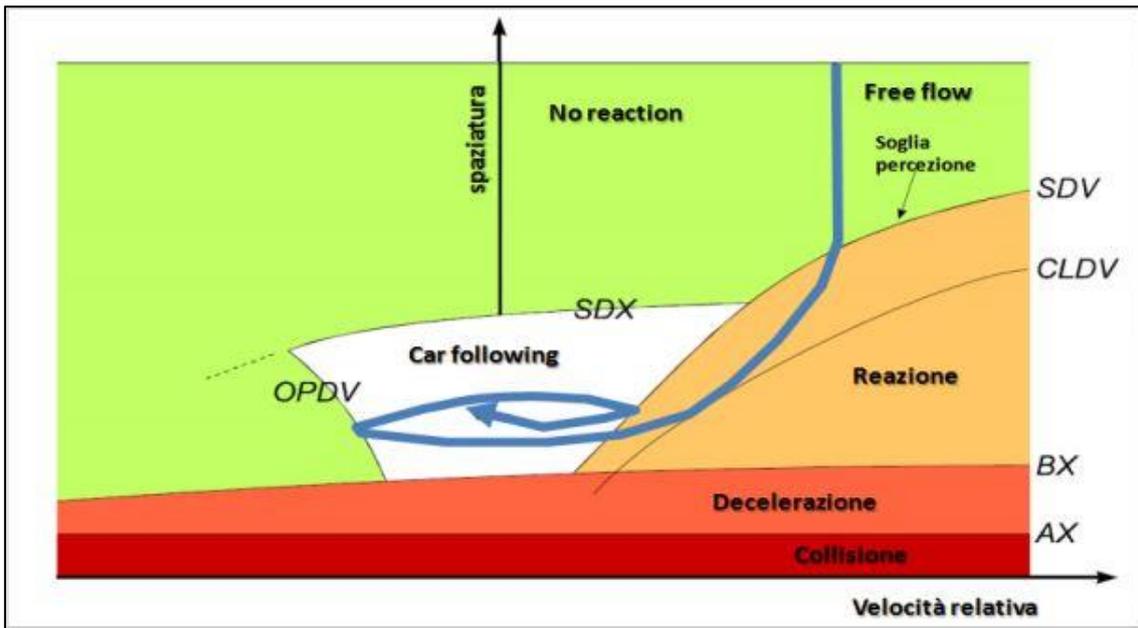
Nessun modello, infatti, è in grado di simulare adeguatamente il reale deflusso veicolare senza un'opportuna calibrazione. Da ciò si evince come l'attività di calibrazione sia assolutamente necessaria e imprescindibile al fine di poter utilizzare un qualsiasi modello per successive attività di simulazione, pianificazione e gestione del traffico. Sono rarissimi i casi per cui i valori di default dei parametri che caratterizzano un modello sono in grado di permettere un'accettabile riproduzione del fenomeno analizzato, perché i valori di traffic composition, geometria della rete, età dei veicoli, cilindrata e altri driver behaviour variano significativamente nelle differenti parti del mondo.

In ogni caso, i benefici prodotti da un'attenta e precisa attività di calibrazione sono molteplici:

- certezza e consapevolezza della qualità del modello sviluppato eventuali errori e difetti di modellazione possono essere scoperti e corretti prima che il modello venga presentato al pubblico o ad eventuali decisori;
- possibilità di utilizzare il modello per analisi e previsioni future.

La maggior parte dei microsimulatori usano il modello di Car-following e di Lane-changing, incluso PTV VISSIM. Questo software basa i parametri di driving behaviour su due modelli: Wiedemann 74 (usato in contesti urbani e di immissione) e Wiedemann 99 (per autostrade e strade di diversione).

Il modello Wiedemann 74 considera i due fattori che influenzano maggiormente la guida: lo spazio tra i veicoli e la velocità relativa. I due fattori vengono rappresentati in un piano, rispettivamente come asse y e asse x e all'interno di tale piano si può individuare un punto rappresentativo delle condizioni operative del veicolo i rispetto al suo leader i-1. Quando un veicolo si muove, la variazione dei due fattori individuati produce una traiettoria nel piano x-y sopra richiamato. In un determinato istante la relazione tra i due veicoli può essere individuata sulla base della localizzazione di tale punto e della suddivisione del piano in zone di funzionamento, come mostrato in Fig. 3.17.



*Fig. 3-17: Zone di funzionamento modello di Wiedermann*

In figura si distinguono alcune zone di funzionamento che definiscono le relazioni tra il veicolo follower ed il suo leader: free flow o no reaction area, approaching o reaction area, following area, deceleration area e collision area.

Sono inoltre riportate le linee di separazione tra le aree: AX distanziamento desiderato tra veicoli fermi; BX distanza minima di accodamento considerata sicura dai guidatori; CLDV punti a breve distanza per i quali i guidatori percepiscono che la propria velocità è più elevata rispetto al veicolo precedente; SDV punti a maggiore distanza per la quale i guidatori percepiscono le differenze delle velocità quando avvicinano veicoli più lenti; OPDV punti a breve distanza per i quali i guidatori percepiscono che la propria velocità è più bassa rispetto al veicolo precedente; SDX: la massima distanza di accodamento che indica il limite superiore del processo di car-following.

In PTV VISSIM i parametri da calibrare sono:

a) parametri generici

IDrivingBehavior	Parameter description	Range	Default
LookBackDistMax	Max. look back distance [m]	50 ~ 200	150
LookAheadDistMax	Max. look ahead distance [m]	100 ~ 300	250
ObsrvdVehs	No. of observed preceding vehicles [veh]	1.00 ~ 5.00	2.00
StandDist	Standstill distance in front of static obstacles [m]	0.00 ~ 3.00	0.50

b) parametri relativi al modello di Lane-changing

IDrivingBehavior	Parameter description	Range	Default
DecelRedDistOwn	Reduction rate for leading (own) vehicle [m]	100 ~ 200	200
AccDecelOwn	Accepted deceleration for leading (own) vehicle [m/s <sup>2</sup> ]	-3.00 ~ 0.50	-1.00
MinHdwy	Min. spacing (headway) [m]	0.50 ~ 3.50	0.50
SafDistFactLnChg	Safety distance reduction factor	0.10 ~ 0.60	0.60
CoopDecel	Max. deceleration for cooperative lane-change/braking [m/s <sup>2</sup> ]	-6.00 ~ 3.00	-3.00
CoopLnChgSpeedDiff	Max. speed difference for cooperative lane-change/braking [m/s]	5.00 ~ 20.00	10.80
MaxDecelOwn	Max. deceleration for leading (own) vehicle [m/s <sup>2</sup> ]	N.A	-4.00
MaxDecelTrail	Max. deceleration for following (trailing) vehicle [m/s <sup>2</sup> ]	N.A	-3.00
DecelRedDistTrail	Reduction rate for following (trailing) vehicle [m]	N.A	200
AccDecelTrail	Accepted deceleration for following (trailing) vehicle [m/s <sup>2</sup> ]	N.A	-0.50

c) parametri di Wiedemann 74 relativi al modello di Car-following

IDrivingBehavior	Parameter description	Range	Default
W74ax	Average standstill distance	0.50 ~ 2.50	2.00
W74bxAdd	Additive factor for security distance	0.70 ~ 4.70	2.00
W74bxMult	Multiplicative factor for security distance	1.00 ~ 8.00	3.00

d) parametri di Wiedemann 99 relativi al modello di Car-following

IDrivingBehavior	Parameter description	Range	Default
W99CC0	Desired distance between lead and following vehicle [m]	0.60 ~ 3.05	1.50
W99CC1DISTR	Headway Time [s] Desired time between lead and following vehicle	0.50 ~ 1.50	0.90
W99CC2	Following Variation [m] Additional distance over safety distance that a vehicle requires	1.52 ~ 6.10	4.00
W99CC3	Threshold for Entering 'Following' State [s] Time in seconds before a vehicle starts to decelerate to reach safety distance (negative)	-15.00 ~ -4.00	-8.00
W99CC4	Negative "Following Threshold" [m/s] Specifies variation in speed between lead and following vehicle	-0.61 ~ 0.03	-0.35
W99CC5	Positive "Following Threshold" [m/s] Specifies variation in speed between lead and following vehicle	0.03 ~ 0.61	0.35
W99CC6	Speed dependency of oscillation [1/ms]	7.00 ~ 15.00	11.44
W99CC7	Oscillation Acceleration: Acceleration during the oscillation process [m/s <sup>2</sup> ]	0.15 ~ 0.46	0.25
W99CC8	Standstill Acceleration [m/s <sup>2</sup> ]	2.50 ~ 5.00	3.50
W99CC9	Acceleration with 80 km/h [m/s <sup>2</sup> ]	0.50 ~ 2.50	1.50

Calibrare anche solo una piccola parte di tali parametri è un'attività piuttosto laboriosa (basti pensare che qualora si scegliessero dieci parametri e per ciascuno di essi cinque valori, le possibili combinazioni risulterebbero  $5^{10} = 9765625$ ). Di conseguenza è necessario individuare quei parametri che influenzano maggiormente il modello e concentrare l'attività di calibrazione su essi.

Considerando che la rete oggetto di studio è tutta in ambito urbano, sicuramente sono da non tenere in considerazione i parametri presenti nella tabella relativa a W99.

Altro aspetto da tenere in considerazione è che la rete è prevalentemente dotata di carreggiate con una corsia per senso di marcia; quindi, si può considerare trascurabile la calibrazione dei parametri relativi al modello di Lane-changing.

In definitiva, i parametri ritenuti indispensabili al processo di calibrazione del modello oggetto di studio sono stati i parametri generali (eccetto quello relativo al numero di veicoli che si riesce a guardare in avanti, per diminuire il tempo e il numero di simulazioni) e quelli relativi al modello di W74.

Si è riportato l'esempio di costruzione dello scenario urbano di Lioni, ma allo stesso modo, mediante questa metodologia possono essere creati altri scenari di traffico per la validazione in real-time di sistemi ADAS. Questo scenario sarà quello adoperato nel capitolo 4.2 per la validazione della funzionalità AEB mediante l'uso della piattaforma di test sviluppata in questa attività di ricerca.

### 3.1.5 Elemento di controllo e data recording: Simulink

Poiché l'elemento di controllo rappresenta un modulo della piattaforma di testing considerata non presente a livello commerciale, esso è stato sviluppato ad hoc mediante Matlab/Simulink. Per tale motivo la descrizione di tale elemento fa parte del secondo step di sviluppo della metodologia di test di tale attività di ricerca, la cui analisi viene dettagliata nel paragrafo 3.2.

## 3.2 Realizzazione del controllore per la stima e la rilevazione dello stato passed/failed del test

Il controllore è stato sviluppato mediante Simulink e lo sviluppo e il testing iniziale di tale elemento è stato effettuato attraverso il Matlab Automated Driving System Toolbox, integrando uno scenario di AEB control con il modello realizzato.

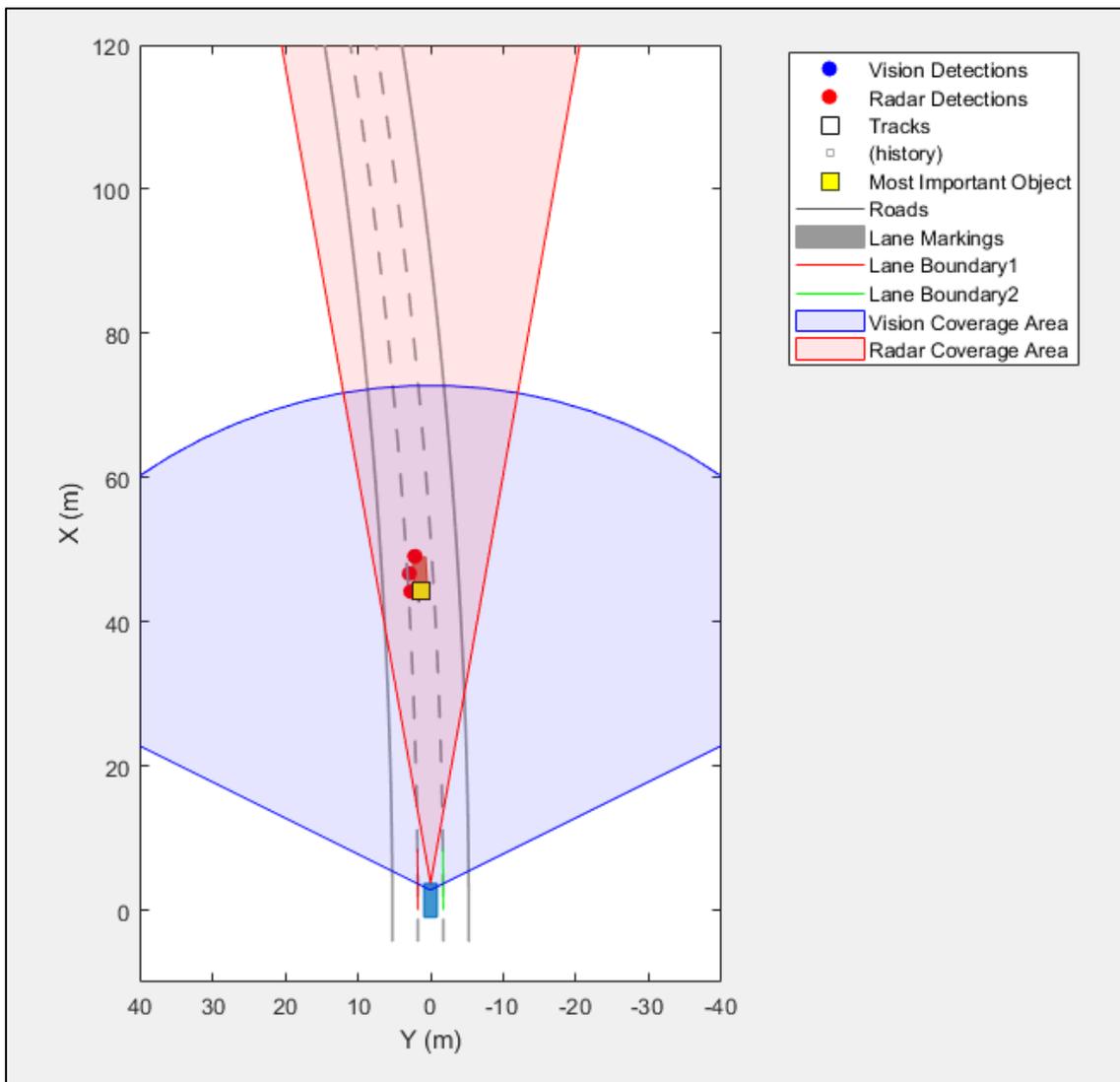
Il toolbox di Matlab DrivingScenarioDesigner permette di:

1. Creare uno scenario di guida (che comprende strade e attori quali auto, track, pedoni e ciclisti);
2. Associare ad ogni attore una traiettoria da percorrere sulla strada definita;

3. Equipaggiare l'egoCar (il veicolo sottoposto a test) con una serie di sensori quali Radar o Camere;
4. Effettuare una simulazione in cui è possibile verificare il movimento lungo la traiettoria assegnata agli attori e i rilevamenti effettuati dai sensori;
5. Esportare i dati restituiti dai sensori, lo scenario creato e informazioni sugli attori per poterli utilizzare in simulazione lato simulink.

I sensori che possono essere introdotti sono di due tipi: Radar e camere. Ognuno avrà delle proprie caratteristiche, può essere posizionato in diversi punti del veicolo e con diversi orientamenti.

In Fig. 3.18 si può visualizzare il cosiddetto "Bird's Eye Plot", ovvero la scena vista dall'alto di uno scenario considerato, che mostra durante la simulazione anche i vari rilevamenti effettuati dal sensore.



**Fig. 3-18: Automated Driving System Toolbox**

Dalla Fig. 3.18 si possono osservare tutte le caratteristiche e le funzionalità di questo toolbox. In particolare, si può osservare:

- Il rettangolo blu è il veicolo leader per il quale le informazioni di posizione e orientamento sono ricavate dal modello implementato;
- Le linee grigie sono quelle che caratterizzano la strada che può essere costruita con un modulo del toolbox detto *drivingScenarioDesigner* così come può essere inserito un altro veicolo, rappresentato dal rettangolo rosso;
- Il veicolo ego è equipaggiato di una camera e un radar; l'area blu è l'area di copertura della camera mentre l'area rossa è l'area di copertura del radar;
- Le linee verdi e rosse sono le linee esterne della corsia dove viaggia il veicolo ego e sono individuate dalla camera; attraverso degli opportuni algoritmi già implementati nel toolbox, l'individuazione di tali linee permette di restituire

una misura di curvatura della strada utile per il controllo della dinamica laterale;

- I pallini rossi e blu rappresentano rispettivamente la posizione di un oggetto individuato da radar e camera;
- Il quadratino giallo è invece la posizione del *Most Important Object* (MIO), ovvero il veicolo leader, la cui posizione è il risultato di una fusione sensoriale delle misure di camera e radar.

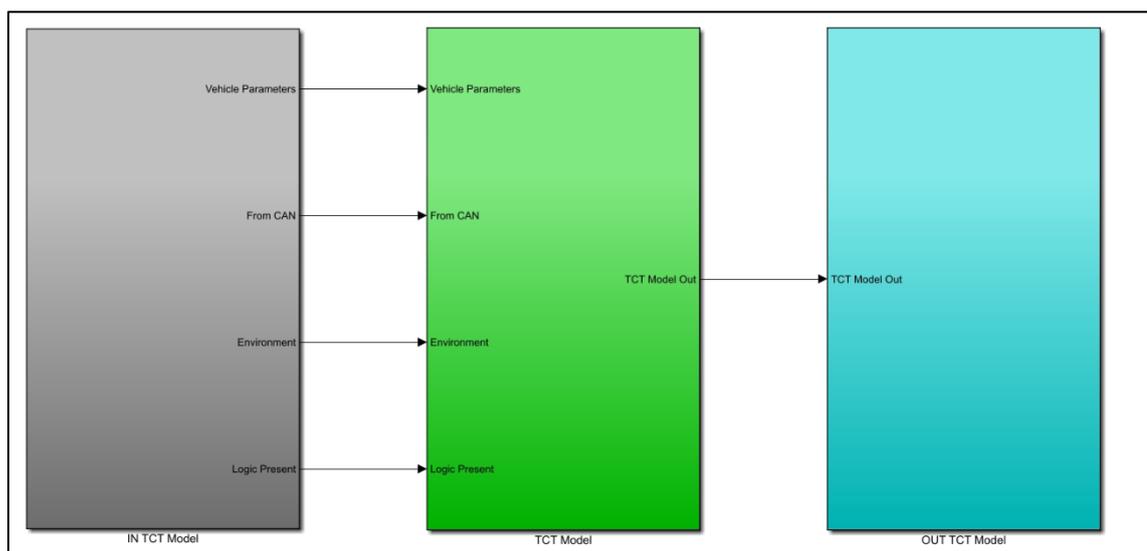
Da tale analisi si nota come il toolbox metta a disposizione tutto il necessario per poter effettuare un controllo di dinamica longitudinale e laterale del veicolo attraverso la generazione opportuna di segnali di riferimento.

Lanciando la simulazione sarà possibile vedere i movimenti degli attori lungo le traiettorie scelte nell'Ego Centric View (un grafico che plotta tutta la simulazione dal punto di vista posteriore dell'egoCar) e nel Bird's Eye Plot, dove è inoltre possibile osservare i rilevamenti dei sensori e le loro aree di copertura.

Gli scenari di test possono essere costruiti secondo le normative EURO NCAP, società che si occupa di definire le modalità di valutazione della sicurezza di automobili nuove tramite l'introduzione e l'uso di specifici protocolli di prova [26].

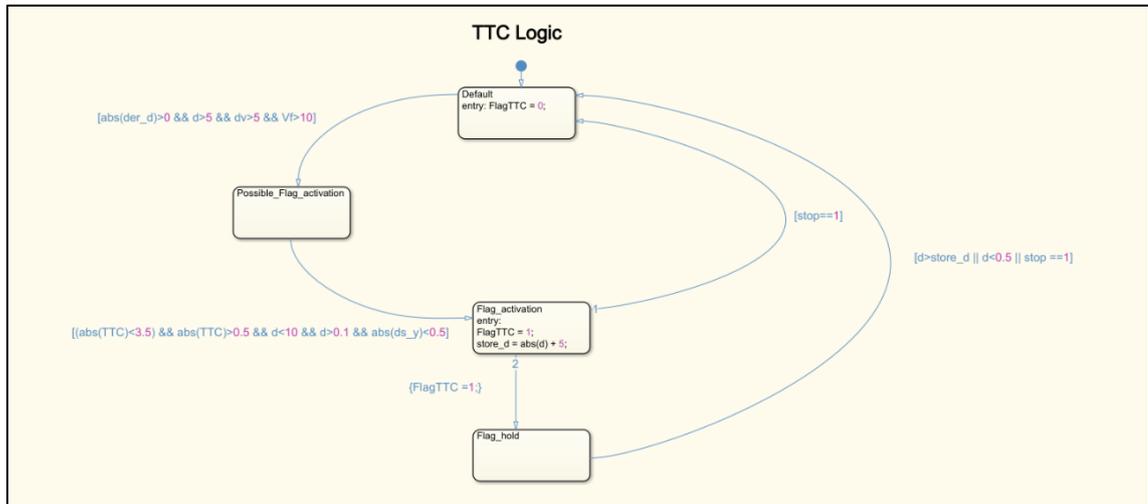
Il controllore è stato realizzato mediante Simulink e, seguendo le definizioni riportate nel paragrafo 2.4, sono stati implementati diversi blocchi di calcolo dei parametri surrogati di sicurezza e del triggering dei vari Flag.

La struttura del modello Simulink viene riportata in Fig. 3.19:

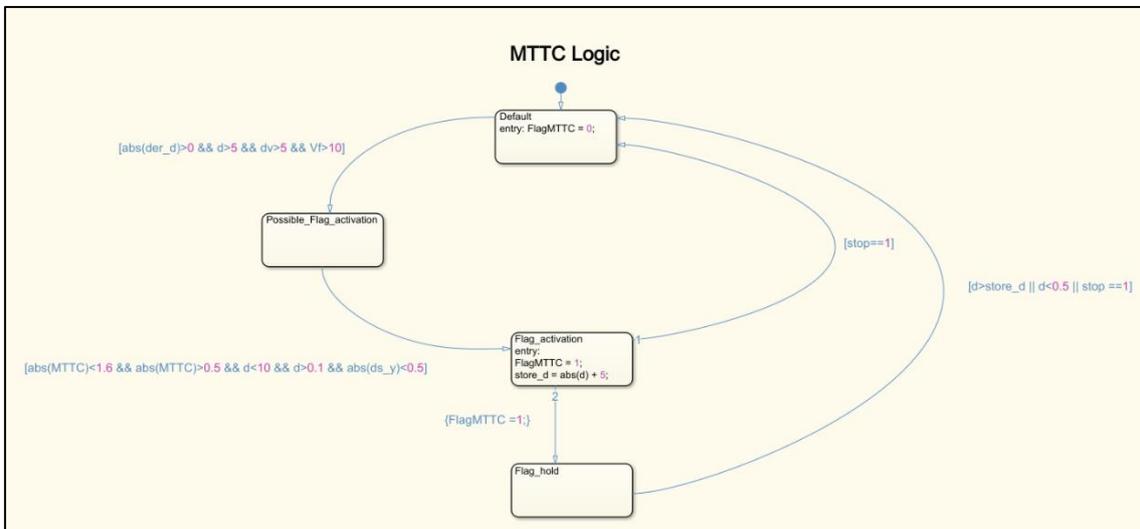


**Fig. 3-19: Schema a blocchi modello controllore Simulink**

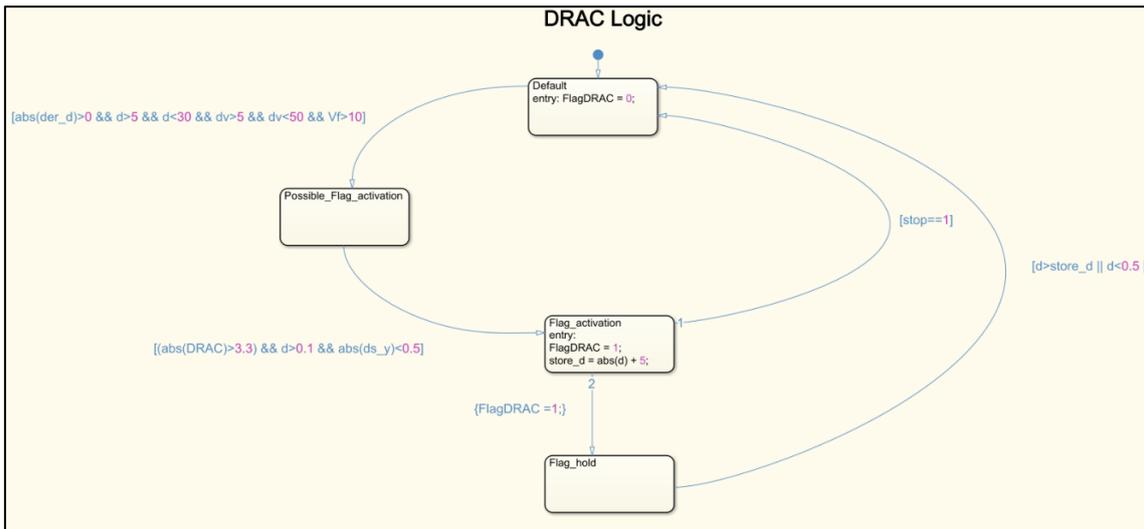
Per il calcolo dei Flag si è adoperato lo Stateflow (sviluppato da MathWorks), che è uno strumento di logica di controllo utilizzato per modellare sistemi reattivi tramite macchine a stati e diagrammi di flusso all'interno di un modello Simulink. In tal modo si è potuto replicare precisamente i Flow Chart definiti nei precedenti capitoli per la definizione del triggering del Flag TTC, Flag MTTC, Flag DRAC, Flag MDRAC e Flag DCIA.



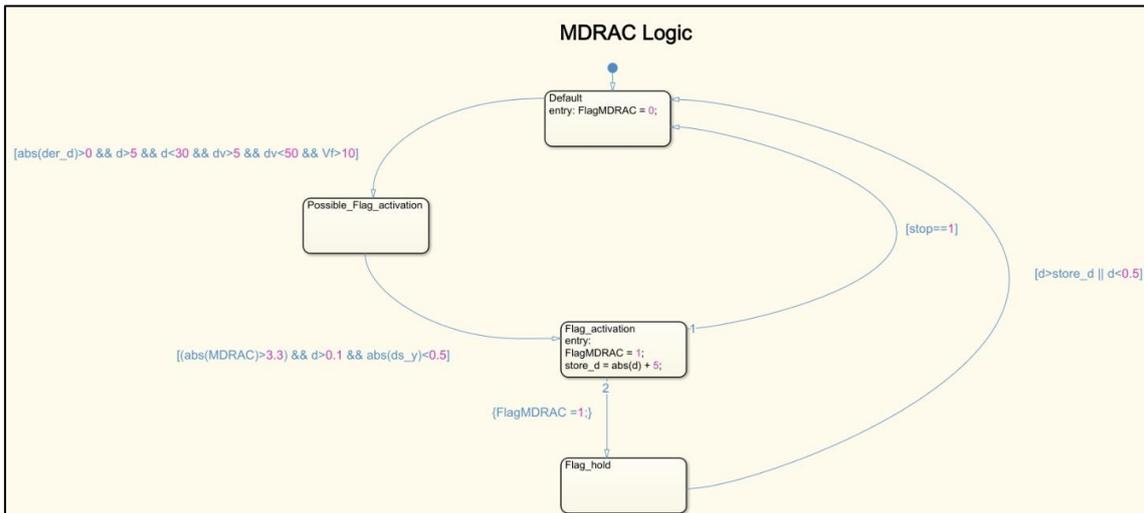
**Fig. 3-20: Stateflow Flag TTC**



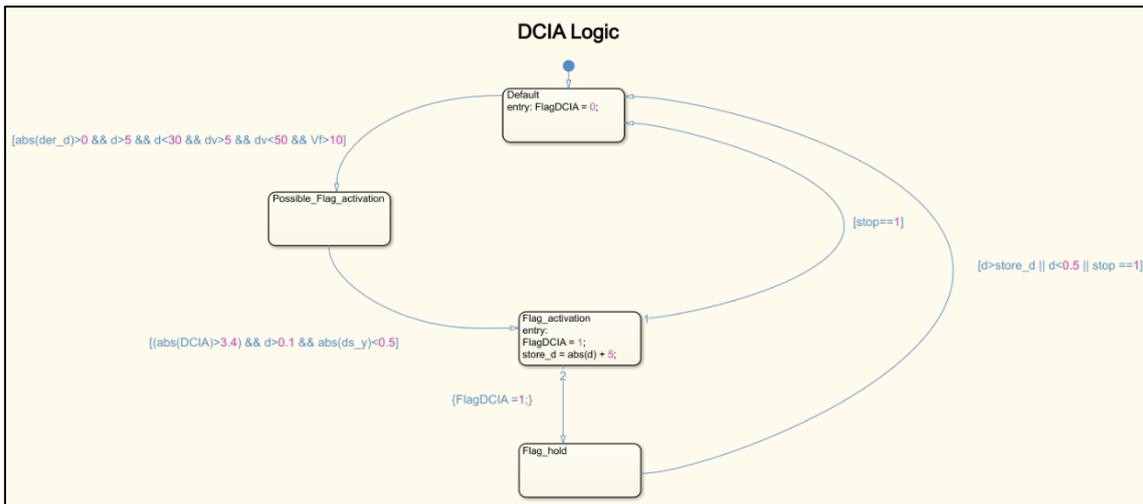
**Fig. 3-21: Stateflow Flag MTTC**



**Fig. 3-22: Stateflow Flag DRAC**



**Fig. 3-23: Stateflow Flag MDRAC**

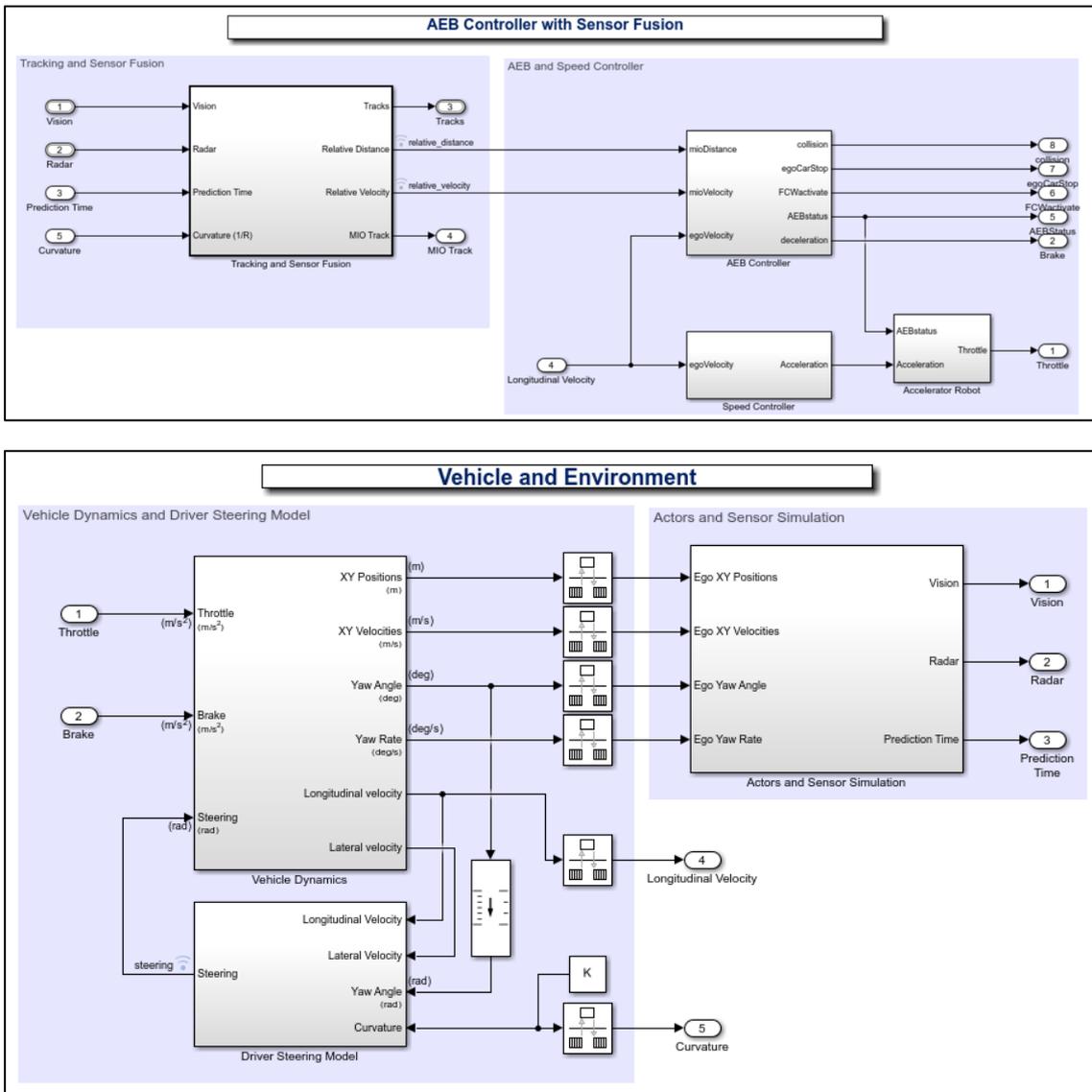


**Fig. 3-24: Stateflow Flag DCIA**

Per il testing del controllore in tale fase si è scelto di adoperare la funzionalità AEB che offre Simulink stesso con un algoritmo di fusione dei sensori utilizzando l'Automated Driving Toolbox.

Il modello si compone di due sottosistemi principali (Fig. 3.21):

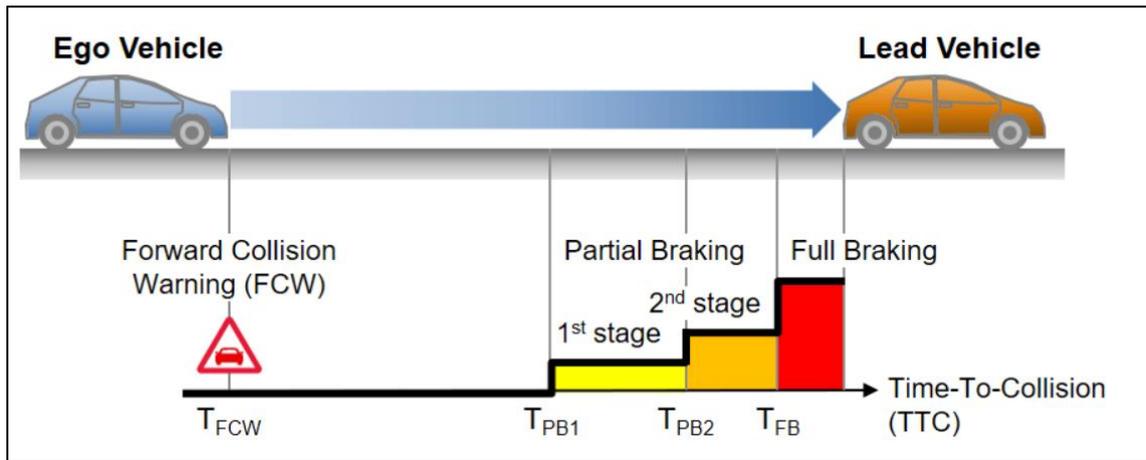
1. AEB con Sensor Fusion, che contiene l'algoritmo di fusione del sensore e il controller AEB.
2. Vehicle and Environment, che modella le dinamiche del veicolo ego e l'ambiente. Include il lettore di scenari di guida e i generatori di rilevamento radar e camera.



**Fig. 3-25: Struttura AEB controller Automated Driving Toolbox.**

Il sistema FCW avvisa il conducente di una collisione imminente con un veicolo in testa. Il conducente dovrebbe reagire all'avviso e applicare il freno con un tempo di ritardo; quando il tempo di collisione (TTC) del veicolo di testa diventa inferiore ad un valore di soglia limite, viene attivato l'allarme FCW.

Se il guidatore non riesce ad applicare i freni in tempo, ad esempio a causa di distrazioni, il sistema AEB agisce indipendentemente dal guidatore per evitare o mitigare la collisione. I sistemi AEB in genere applicano la frenatura in cascata, che consiste nella frenatura parziale in più fasi seguita da una frenata completa, come mostrato in Fig. 3.26.

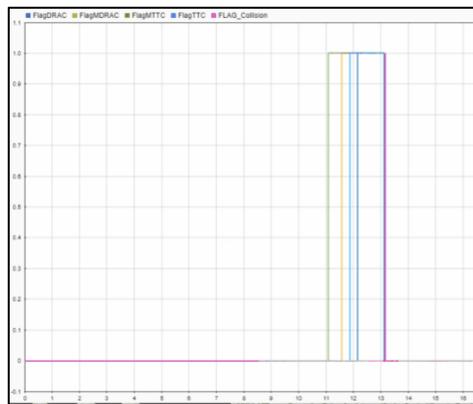
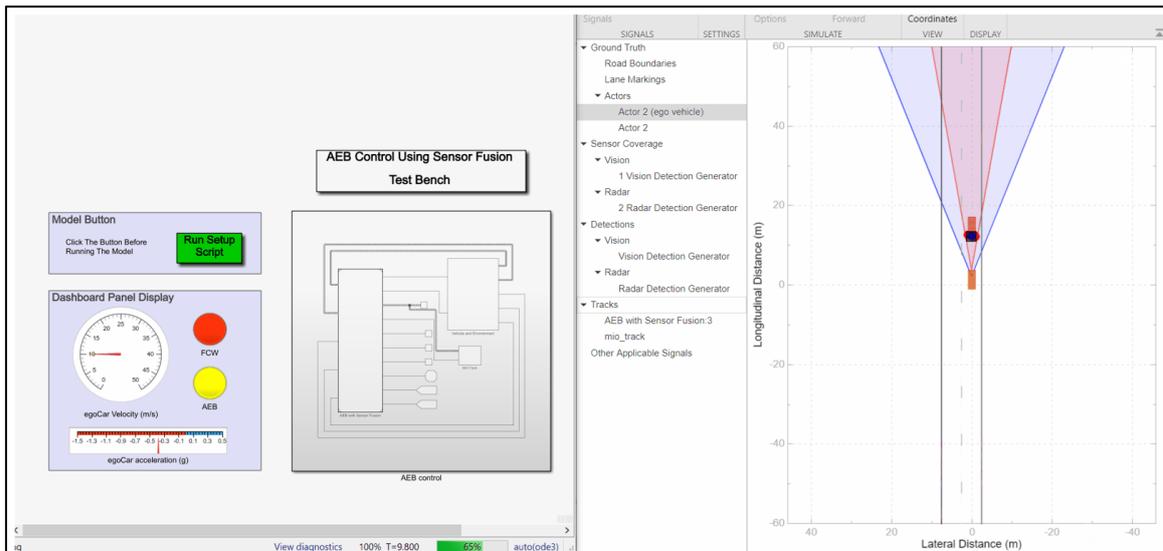


*Fig. 3-26: Frenata AEB in funzione del TTC*

Lanciando così una simulazione in questo ambiente di test, nel momento in cui si verifica il possibile conflitto si attiva il flag basato sul calcolo delle misure surrogate di sicurezza e viene abilitata la registrazione dei dati per un tempo pari al tempo di esposizione del conflitto (TET) più un valore di margine o un delay per registrare leggermente anche al di fuori della finestra temporale di possibile collisione.

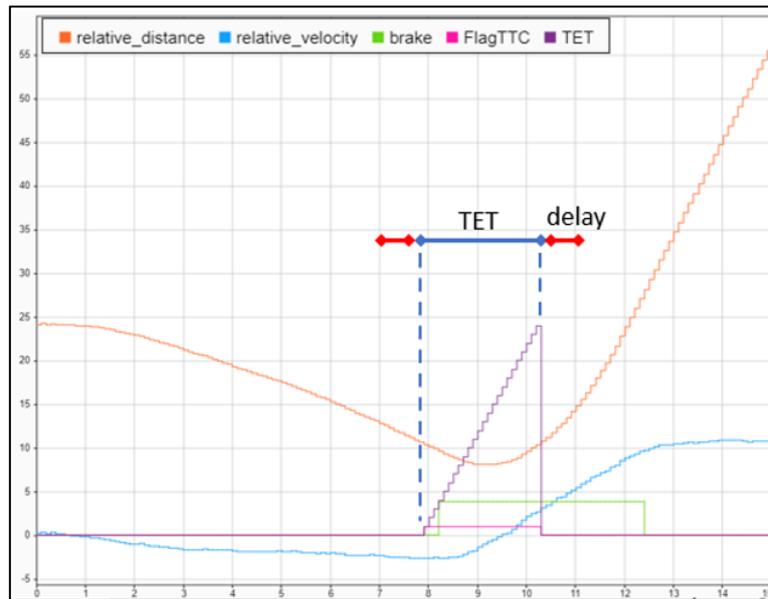
Mediante questo tipo di simulazione real-time, attraverso delle analisi visive, si è quindi potuto verificare la corretta attivazione dei flag in prossimità di situazioni di near-collision: nel momento in cui si creava una situazione di near collision o una collisione vera e propria, il test sul controllore in questa fase consisteva nell'andare a verificare la corretta attivazione del flag prima della situazione di rischio, senza focalizzarsi nel dettaglio sulle tempistiche di attivazione. Questo perché, in tale fase, si sono considerati dei valori di default per i parametri surrogate di sicurezza, prelevati dalla letteratura.

In Fig. 3.27 viene illustrato un esempio di attivazione dei vari Flag in corrispondenza di una situazione di near-collision in cui si attiva il FCW e successivamente l'AEB in virtù di una potenziale situazione di tamponamento tra Ego vehicle e Lead Vehicle.



**Fig. 3-27: Esempio di attivazione dei flag durante una simulazione real-time attraverso il Matlab Automated Driving System Toolbox**

In Fig. 3.28 viene estratto nel dettaglio l'attivazione del flag TTC. Si può notare come, nel momento in cui la distanza relativa raggiunge una determinata soglia minima, il TTC diviene inferiore al TTC limite e il Flag si attiva per un tempo pari al TET, al quale bisognerà considerare un delay e un tempo di margine per analizzare al momento la situazione di near-collision.



**Fig. 3-28: Esempio di attivazione del flag TTC durante una simulazione real-time**

### 3.3 Calibrazione delle soglie dei parametri surrogati di sicurezza

Nella fase di realizzazione del controllore per la stima e la rilevazione dello stato passed/failed dei test si sono impostati i parametri surrogati di sicurezza a valori di default presi dalla letteratura, indicati nella Tabella 3.2.

**Tabella 3-2: Valori di soglia limite di default dei parametri surrogati di sicurezza adoperati**

Parametro surrogato di sicurezza	Valore di soglia limite
TTC	3.5 s
MTTC	1.6 s
DRAC	3.35 m/s <sup>2</sup>
MDRAC	3.35 m/s <sup>2</sup>
DCIA	3.4 m/s <sup>2</sup>

È opportuno, però, calibrare tali soglie per ogni Flag, effettuando un trade off tra la soglia limite e la reale probabilità di incidente, escludendo eccessive attivazioni che sarebbero indice di valutazioni di possibili collisioni con troppa facilità e poche o nulle attivazioni che, invece, rischierebbero di non includere delle collisioni reali.

La calibrazione dei parametri surrogati di sicurezza deve essere tale da ottenere come target un numero di attivazione dei flag maggiore di un fattore X il numero di

collisioni ( $N_{\text{flag}} > X N_{\text{collisioni}}$ ), con  $X$  che deve essere almeno pari ad 1 e deve assumere un valore presumibilmente intorno a  $1.2 \div 1.3$ .

Bisogna, però, anche determinare una valutazione sulle situazioni di near-collision e calibrare i flag in maniera tale da attivarsi anche per situazioni in cui la collisione non si verifica, ma c'è comunque un rischio elevato ed una possibile anomalia della funzionalità ADAS under test. Infatti, proprio l'attivazione e la segnalazione di una tale circostanza consentirebbero allo sviluppatore di perfezionare e migliorare la logica ADAS considerata.

Per calibrare i parametri limite tenendo conto delle situazioni di near-collision deve essere effettuata un'analisi incidentologica, andando a considerare una variabilità degli scenari in situazioni di reale possibilità di conflitto. In questa fase bisogna quindi testare le logiche di attivazione dei flag per scenari ad evento.

Gli scenari considerati per calibrare le soglie dei parametri surrogati di sicurezza sono scenari ad evento definiti da Euro NCAP (European New Car Assessment Programme), in italiano acronimo di "Programma europeo di valutazione dei nuovi modelli di automobili", il quale si occupa di definire le modalità di valutazione della sicurezza passiva e attiva delle automobili nuove tramite l'introduzione e l'uso di specifici protocolli di prova, in modo tale da poter offrire al consumatore informazioni armonizzate.

Euro NCAP ha creato una valutazione della sicurezza espressa in stelle per aiutare i consumatori, le famiglie e le aziende a confrontare i veicoli e scegliere quello migliore in base alle proprie esigenze. La valutazione della sicurezza passa attraverso una serie di test ideati ed eseguiti da Euro NCAP. I test rappresentano scenari di collisioni che potrebbero causare il ferimento o anche la morte degli occupanti del veicolo o di altri utenti della strada.

Per valutare la sicurezza legata alle tecnologie di assistenza alla guida, Euro NCAP ha definito il punteggio Safety Assist, determinato dai test delle più importanti tecnologie di assistenza alla guida che supportano la guida sicura per evitare incidenti e mitigare gli infortuni. In questi test, Euro NCAP verifica la funzionalità e/o le prestazioni del sistema durante la guida normale e nei tipici scenari di incidenti. La principale funzionalità verificata e testata è l'AEB.

Quando Euro NCAP ha iniziato a testare i sistemi AEB nel 2014, i test sono stati suddivisi tra le due funzionalità, assegnando punti nella categoria Sicurezza degli adulti per i sistemi a bassa velocità (AEB City) e Safety Assist per quelli efficaci a velocità elevata/autostradale (AEB Interurbano). Con il tempo, la distinzione tra le due funzionalità è diventata meno netta. La tecnologia dei sensori è sufficientemente avanzata da consentire l'utilizzo di un solo set di sensori per tutte le velocità e i sistemi offrono funzionalità in tutta la gamma di velocità. Di conseguenza, a partire dal 2020, Euro NCAP considera semplicemente l'AEB Car-to-Car, valutandone la funzionalità su

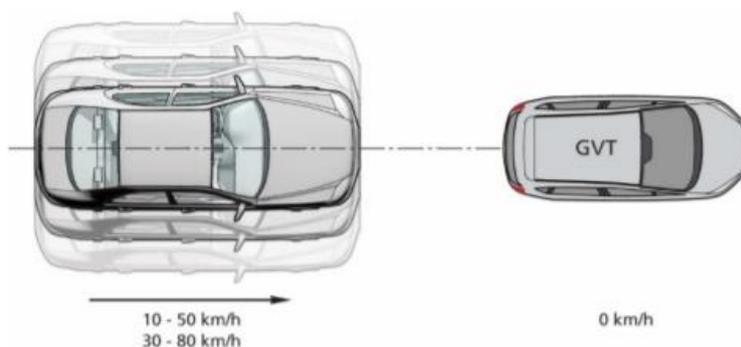
un ampio range di velocità. I sistemi AEB per gli utenti della strada vulnerabili, come pedoni e ciclisti, sono, invece, valutati separatamente.

Nel caso in questione, al fine di calibrare opportunamente le soglie dei parametri surrogati di sicurezza considerati in tale attività di ricerca, sono stati estrapolati alcuni scenari dall'AEB Car-to-Car Test Protocol v3.0.3 (Aprile 2021). Vengono testati tre diversi scenari per un'auto che si avvicina alla parte posteriore di un altro veicolo: avvicinamento a un veicolo che si è fermato (Car-to-Car Rear Stationary - CCRs), avvicinamento a un veicolo che precede a velocità inferiore a quella del veicolo di prova (Car-to-Car Rear Moving - CCRm), e guida dietro a un veicolo che rallenta (Car-to-Car Rear Braking - CCRb), sia bruscamente che dolcemente, a distanze diverse dall'auto di prova. Nei primi due casi (veicolo fermo e in movimento a bassa velocità), i test vengono ripetuti per i disassamenti a sinistra e a destra, dove la linea centrale del veicolo di prova non è in linea con quella dell'altro veicolo. Poiché in questi test disassati i sensori della vettura testata sono in grado di "vedere" il laterale dell'altro veicolo, è stato sviluppato uno speciale target 3D controllato a distanza, noto come Global Vehicle Target (GVT).

Nello specifico, gli scenari considerati sono i seguenti:

- Car-to-Car Rear Stazionario (CCRs)

Lo scenario CCRs è una combinazione di velocità e disassamenti a destra/sinistra con step incrementali di velocità di 5 km/h e 25% di disassamenti laterali, come mostrati nella tabella seguente:

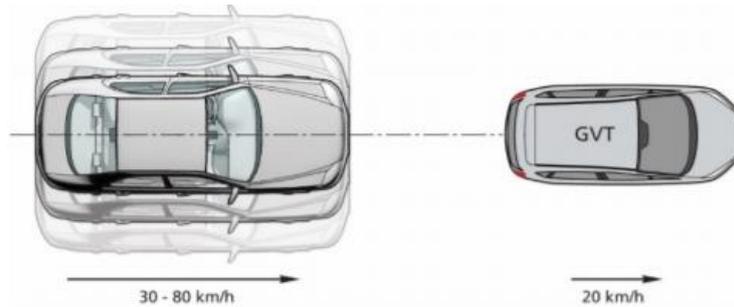


**Tabella 3-3: tabella test AEB CCRs**

	AEB + FCW combined		AEB only	FCW only
	AEB	FCW		
<b>AEB CCRs</b>	10-50 km/h -50%-50%	30-80 km/h -50%-50%	10-80 km/h -50%-50%	30-80 km/h -50%-50%

- Car-to-Car Rear moving (CCRm)

Lo scenario CCRm è una combinazione di velocità e disassamenti a destra/sinistra con step incrementali di velocità di 5 km/h e 25% di disassamenti laterali, come mostrati nella tabella seguente:

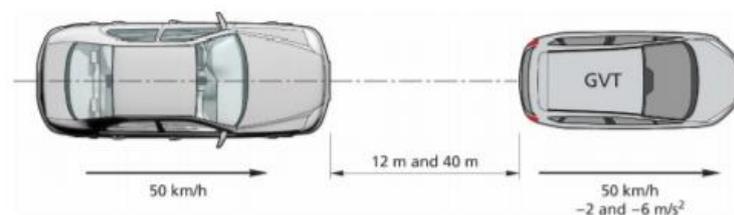


**Tabella 3-4: tabella test AEB CCRm**

	AEB + FCW combined		AEB only	FCW only
	AEB	FCW		
<b>AEB CCRm</b>	30-80 km/h -50%-50%	50-80 km/h -50%-50%	30-80 km/h -50%-50%	50-80 km/h -50%-50%

- Car-to-Car Rear braking (CCRb)

Lo scenario CCRb viene eseguito considerando una velocità fissa di 50km/h sia per il VUT che per il GVT con combinazioni tra -2 ÷ -6 m/s<sup>2</sup> di accelerazione e 12 ÷ 40 m di distanza.



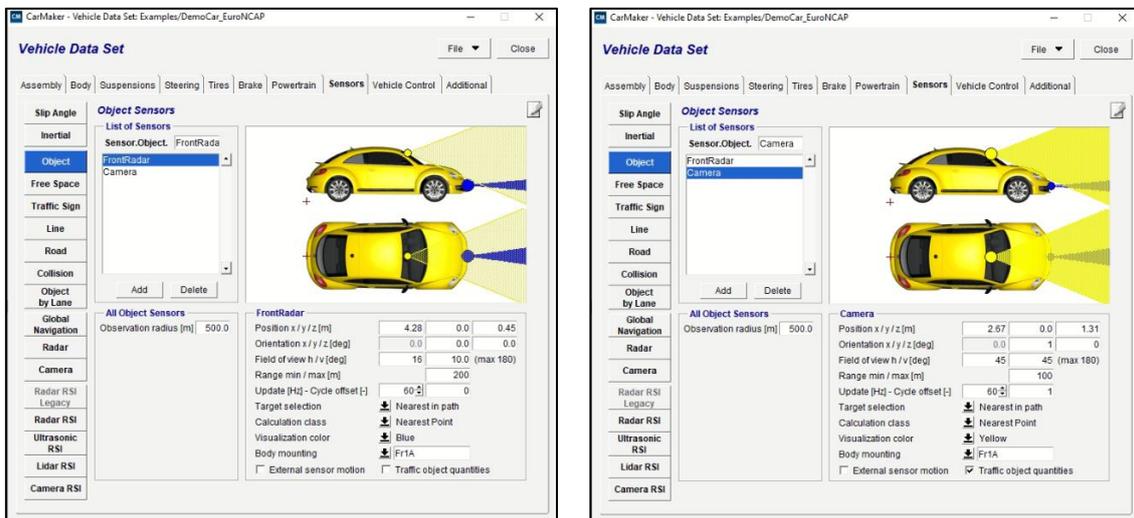
**Tabella 3-5: tabella test AEB CCRb**

		AEB+FCW combined, AEB only & FCW only	
		-2 m/s <sup>2</sup>	-6 m/s <sup>2</sup>
<b>AEB CCRb</b>	<b>12m</b>	50 km/h	50 km/h
	<b>40m</b>	50 km/h	50 km/h

La decelerazione desiderata del GVT deve essere raggiunta entro 1 secondo, dopo il quale il GVT deve permanere per  $\pm 0.5$  km/h rispetto al profilo di velocità di riferimento, finché la velocità non diviene uguale a 1 km/h.

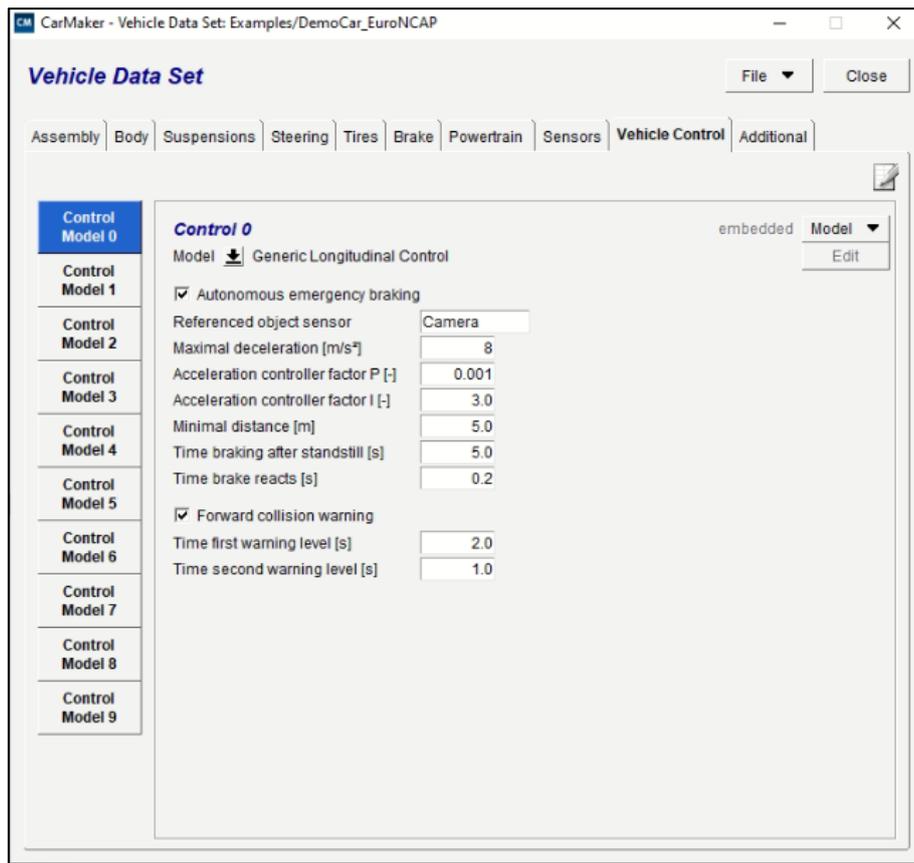
Sulla base di questi scenari, la calibrazione delle soglie dei parametri surrogati di sicurezza considerati in tale attività di ricerca è stata eseguita andando ad effettuare dei test in ambiente MIL attraverso CarMaker for Simulink, integrando il controllore sviluppato in Simulink all'interno dell'ambiente virtuale di IPG.

L'ambiente virtuale di test risulta costituito da un veicolo simulato mediante IPG CarMaker con una precisa dinamica del veicolo e un modello di driver. Sul veicolo si è montato un sensore virtuale di tipo Object per la rilevazione degli oggetti simulati sullo scenario virtuale. Nello specifico si sono considerati due sensori Object: un Radar a lungo raggio (200m) e una Camera simulata per distanze fino a 100 m, ma un field of view più ampio, così come mostrato in figura 3.29.



**Fig. 3-29: Sensor Objects montati su veicolo simulato**

Il veicolo risulta, inoltre, dotato di una funzionalità di controllo alla guida avanzata, ossia una logica ADAS di Autonomous Emergency Brake (AEB) che può attuare, in aggiunta alle azioni del driver, azioni di frenata quando viene rilevata una distanza dal veicolo target inferiore a 5m. Si è adoperata una logica AEB già sviluppata all'interno di CarMaker, che consente di controllare la dinamica longitudinale tramite i dati misurati in real-time della distanza che rilevano i Sensor Objects rispetto al Lead Vehicle. In CarMaker è possibile andare a settare alcuni parametri di riferimento per la gestione della funzionalità ADAS in questione, come la massima decelerazione longitudinale possibile, il tempo di reazione e la minima distanza sotto la quale si attiva la frenata di emergenza. In Fig. 3.30 vengono mostrati i parametri dell'AEB impostati durante queste simulazioni.



**Fig. 3-30: Configurazione funzionalità AEB in CarMaker**

La calibrazione delle soglie dei parametri surrogati di sicurezza è avvenuta mediante una comparazione tra il delta temporale tra tempi di attivazione dei Flag e i tempi di attivazione dell'AEB rispetto all'istante di tempo in cui la velocità dell'ego vehicle si annulla. Dati questi due valori di delta tempo calcolati per ogni test, si è considerata una percentuale di margine del  $25 \div 30\%$  del delta tempo dei Flag rispetto al delta tempo di attivazione dell'AEB.

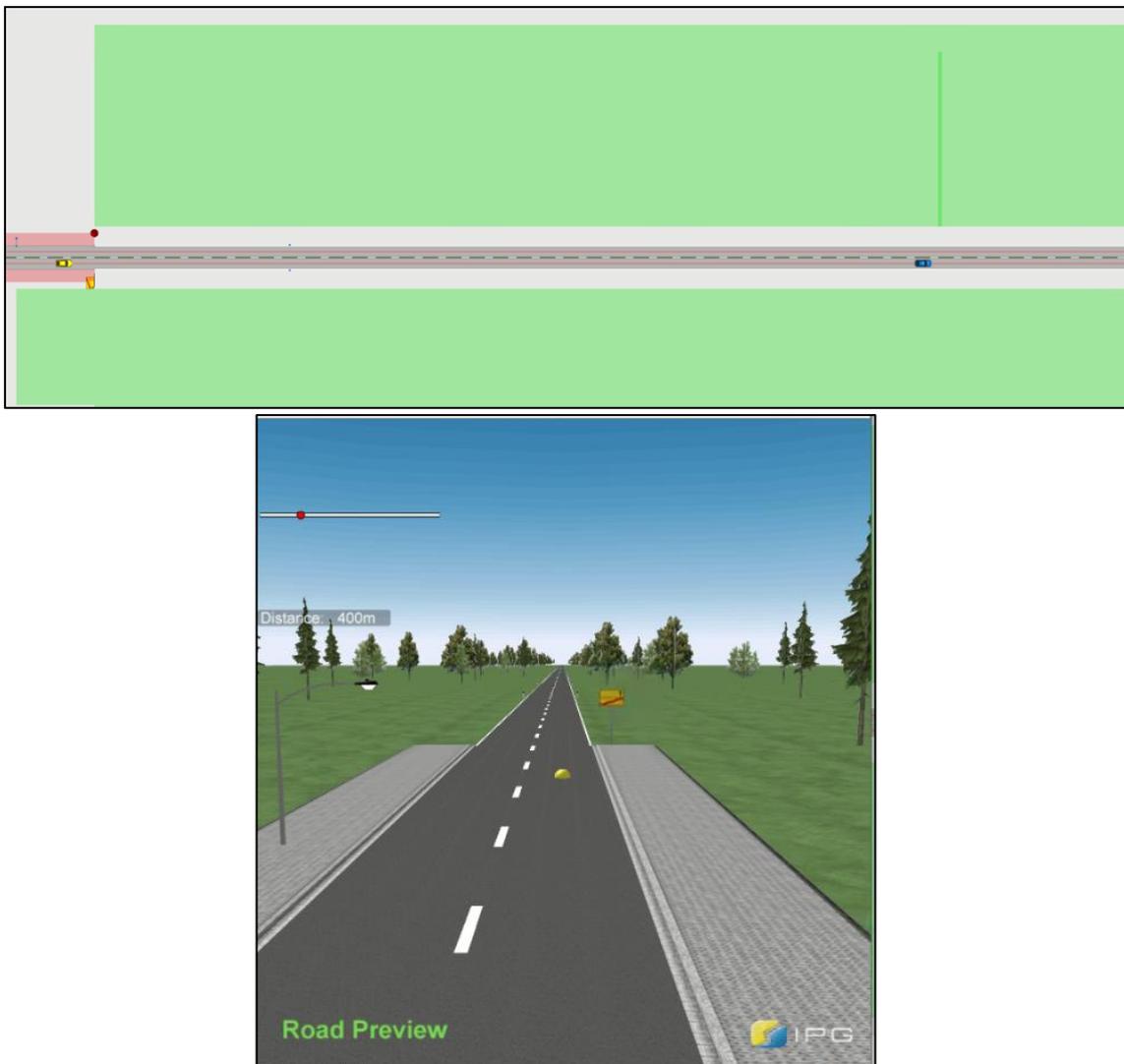
Questo margine fisso e di riferimento per tutti gli scenari e per le varie condizioni di test considerate, ha consentito di tarare opportunamente le soglie di ogni singolo parametro surrogato di sicurezza, variando questi ultimi al fine di ottenere il margine target prefissato.

Questa metodologia di calibrazione adoperata ha mostrato una dipendenza di alcuni parametri surrogati di sicurezza dalla velocità dell'Ego vehicle e del Lead Vehicle ed ha prodotto, in alcuni casi, una vera e propria legge di variazione lineare in funzione del delta velocità, come verrà descritto nel successivo paragrafo.

### 3.3.1 Calibrazione soglie su scenario AEB CCRs

In IPG CarMaker è possibile selezionare e lanciare, tra la libreria di TestRun a disposizione nel tool, il TestRun AEB\_CCRs (Car-to-Car Rear Stationary), in cui è presente un veicolo ego che percorre un tratto rettilineo in direzione ad un veicolo fermo. La velocità dell'ego-veicolo (VUT) è variata tra 10 km/h e 80 km/h. Finché non si verifica alcuna collisione, il TestRun viene valutato con successo; se avviene una o più collisioni il TestRun non va a buon fine.

La road considerata è già preimpostata in IPG CarMaker ed è un semplice tratto rettilineo, come mostrato in Fig. 3.31.



*Fig. 3-31: Road scenario AEB CCRs*

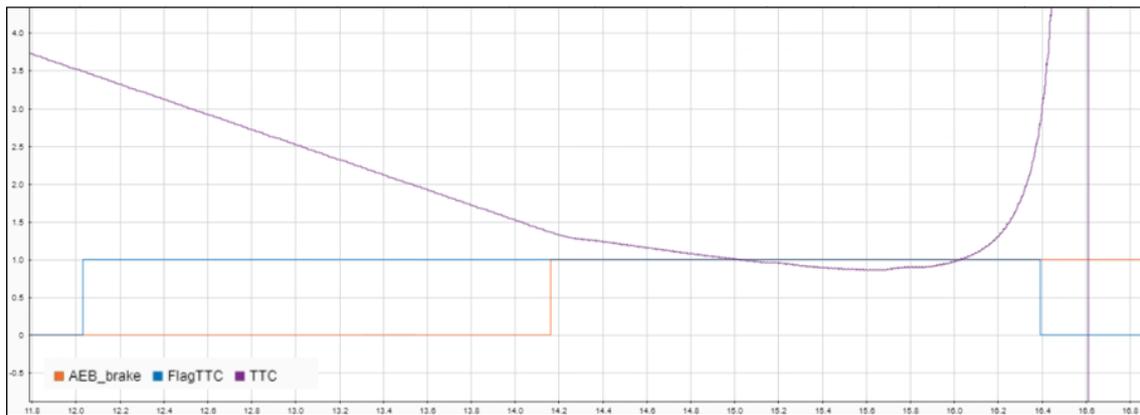
In tabella 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9 vengono illustrati i risultati ottenuti rispettivamente per il Flag TTC, MTTC, DRAC e MDRAC, dove con  $V_f$  viene indicata la velocità dell'ego

vehicle e per ogni TestRun sono indicati diverse soglie dei parametri surrogati finché non si raggiunge una percentuale di margine ritenuta accettabile (25 ÷ 30%), calcolata come:

$$\% \text{ margine} = \frac{\Delta t \text{ AEB}}{\Delta t \text{ Flag}} / \Delta t \text{ AEB}$$

In giallo sono stati evidenziati i valori di soglia ritenuti accettabili per ogni TestRun.

In Fig. 3.32 viene illustrato un estratto di simulazione dei valori considerati per la calibrazione della soglia del TTC. Nel caso considerato, la soglia limite che consentiva l'attivazione del Flag del TTC era impostata a 3.5 secondi e, rispetto all'istante di tempo in cui si attiva l'AEB\_brake, si può notare come il margine di tempo considerato sia molto elevato (89.28%). Un valore di soglia di 2 secondi si avvicina, invece, al margine prestabilito.



**Fig. 3-32: Estratto di dati simulazione AEB CCRs**

Tabella 3-6: tabella test AEB CCRs Flag TTC

TESTRUN 1							
Vf [km/h]	TTC [s]	Attivazione Flag TTC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
50	3,5	12,03	14,162	16,55	2,388	4,52	89,28%
50	1,8	13,728	14,162	16,55	2,388	2,822	18,17%
50	2	13,52	14,162	16,55	2,388	3,03	26,88%

TESTRUN 2							
Vf [km/h]	TTC [s]	Attivazione Flag TTC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
60	2	11,2	11,615	14,49	2,875	3,29	14,43%
60	2,5	10,704	11,615	14,49	2,875	3,786	31,69%
60	2,25	10,96	11,615	14,49	2,875	3,53	22,78%

TESTRUN 3							
Vf [km/h]	TTC [s]	Attivazione Flag TTC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
70	2,25	9,312	9,746	13,08	3,334	3,768	13,02%
70	2,5	9,056	9,746	13,08	3,334	4,024	20,70%
70	2,8	8,752	9,746	13,08	3,334	4,328	29,81%

TESTRUN 4							
Vf [km/h]	TTC [s]	Attivazione Flag TTC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
80	2,8	7,568	8,306	12,102	3,796	4,534	19,44%
80	3	7,36	8,306	12,102	3,796	4,742	24,92%
80	2,5	7,872	8,306	12,102	3,796	4,23	11,43%

TESTRUN 5							
Vf [km/h]	TTC [s]	Attivazione Flag TTC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
10	3	75,088	75,777	76,341	0,564	1,253	122,16%
10	1,5	-	75,777	76,341	0,564	-	-
10	2	75,584	75,777	76,341	0,564	0,757	34,22%

*Tabella 3-7: tabella test AEB CCRs Flag MTTC*

TESTRUN 1							
Vf [km/h]	MTTC [s]	Attivazione Flag MTTC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
50	3,5	12,03	14,162	16,55	2,388	4,52	89,28%
50	1,8	13,728	14,162	16,55	2,388	2,822	18,17%
50	2	13,52	14,162	16,55	2,388	3,03	26,88%

TESTRUN 2							
Vf [km/h]	MTTC [s]	Attivazione Flag MTTC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
60	2	11,2	11,615	14,49	2,875	3,29	14,43%
60	2,5	10,704	11,615	14,49	2,875	3,786	31,69%
60	2,25	10,96	11,615	14,49	2,875	3,53	22,78%

TESTRUN 3							
Vf [km/h]	MTTC [s]	Attivazione Flag MTTC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
70	2,25	9,312	9,746	13,08	3,334	3,768	13,02%
70	2,5	9,056	9,746	13,08	3,334	4,024	20,70%
70	2,8	8,752	9,746	13,08	3,334	4,328	29,81%

TESTRUN 4							
Vf [km/h]	MTTC [s]	Attivazione Flag MTTC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
80	2,8	7,568	8,306	12,102	3,796	4,534	19,44%
80	3	7,36	8,306	12,102	3,796	4,742	24,92%
80	2,5	7,872	8,306	12,102	3,796	4,23	11,43%

TESTRUN 5							
Vf [km/h]	MTTC [s]	Attivazione Flag MTTC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
10	3	75,088	75,777	76,341	0,564	1,253	122,16%
10	1,5	-	75,777	76,341	0,564	-	-
10	2	75,584	75,777	76,341	0,564	0,757	34,22%

*Tabella 3-8: tabella test AEB CCRs Flag DRAC*

TESTRUN 1							
Vf [km/h]	DRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag DRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
80	3,3	7,008	8,306	12,102	3,796	5,094	34,19%
80	2,8	6,416	8,306	12,102	3,796	5,686	49,79%
80	3,8	7,44	8,306	12,102	3,796	4,662	22,81%

TESTRUN 2							
Vf [km/h]	DRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag DRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
70	3,8	9,08	9,746	13,1	3,354	4,02	19,86%
70	3,3	8,608	9,746	13,1	3,354	4,492	33,93%
70	2,8	8,48	9,746	13,1	3,354	4,62	37,75%

TESTRUN 3							
Vf [km/h]	DRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag DRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
60	2,5	10,208	11,618	14,47	2,852	4,262	49,44%
60	3,3	10,688	11,618	14,47	2,852	3,782	32,61%
60	3,8	11,08	11,618	14,47	2,852	3,39	18,86%

TESTRUN 4							
Vf [km/h]	DRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag DRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
50	3,3	13,424	14,162	16,55	2,388	3,126	30,90%
50	3,8	13,696	14,162	16,55	2,388	2,854	19,51%
50	2,5	12,752	14,162	16,55	2,388	3,798	59,05%

TESTRUN 5							
Vf [km/h]	DRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag DRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
40	3,3	17,712	18,276	20,04	1,764	2,328	31,97%
40	3,8	17,936	18,276	20,04	1,764	2,104	19,27%
40	2,8	17,408	18,276	20,04	1,764	2,632	49,21%

TESTRUN 6							
Vf [km/h]	DRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag DRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	Δt AEB	Δt Flag	% di margine
30	2,8	24,416	25,01	26,64	1,63	2,224	36,44%
30	3,3	24,64	25,01	26,64	1,63	2	22,70%
30	3,8	24,816	25,01	26,64	1,63	1,824	11,90%

TESTRUN 7							
Vf [km/h]	DRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag DRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	Δt AEB	Δt Flag	% di margine
20	3,8	-	37,97	39	1,03	-	-
20	3,3	-	37,97	39	1,03	-	-
20	2,8	37,888	37,97	39	1,03	1,112	7,96%

TESTRUN 8							
Vf [km/h]	DRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag DRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	Δt AEB	Δt Flag	% di margine
10	3,8	-	75,793	76,341	0,548	-	-
10	3,3	-	75,793	76,341	0,548	-	-
10	2,8	-	75,793	76,341	0,548	-	-

Tabella 3-9: tabella test AEB CCRs Flag MDRAC

TESTRUN 1							
Vf [km/h]	MDRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag MDRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	Δt AEB	Δt Flag	% di margine
80	3,3	5,488	7,65	11,45	3,8	5,962	56,89%
80	4,5	6,384	7,65	11,45	3,8	5,066	33,32%
80	3,8	5,936	7,65	11,45	3,8	5,514	45,11%

TESTRUN 2							
Vf [km/h]	MDRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag MDRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	Δt AEB	Δt Flag	% di margine
70	3,8	7,696	9,282	12,7	3,418	5,004	46,40%
70	3,3	7,296	9,282	12,7	3,418	5,404	58,10%
70	4,5	8,08	9,282	12,7	3,418	4,62	35,17%

TESTRUN 3							
Vf [km/h]	MDRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag MDRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
60	3,3	9,824	11,618	14,47	2,852	4,646	62,90%
60	3,8	10,16	11,618	14,47	2,852	4,31	51,12%
60	4,5	10,512	11,618	14,47	2,852	3,958	38,78%

TESTRUN 4							
Vf [km/h]	MDRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag MDRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
50	3,3	12,576	14,162	16,55	2,388	3,974	66,42%
50	3,8	12,848	14,162	16,55	2,388	3,702	55,03%
50	4,5	13,136	14,162	16,55	2,388	3,414	42,96%

TESTRUN 5							
Vf [km/h]	MDRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag MDRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
20	3,8	37,296	37,97	39	1,03	1,704	65,44%
20	3,3	37,184	37,97	39	1,03	1,816	76,31%
20	4,5	37,408	37,97	39	1,03	1,592	54,56%

TESTRUN 6							
Vf [km/h]	MDRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag MDRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
10	3,8	-	75,793	76,341	0,548	-	-
10	3,3	-	75,793	76,341	0,548	-	-
10	4,5	-	75,793	76,341	0,548	-	-

### 3.3.2 Calibrazione soglie su scenario AEB CCRm

In IPG CarMaker si può selezionare lo scenario AEB\_CCRm (Car-to-Car Rear Moving), in cui è presente un veicolo ego che percorre un tratto rettilineo in direzione ad un veicolo in movimento. La velocità dell'ego-veicolo (VUT) è variata tra 30 km/h e 80 km/h, mentre il GVT viaggia a una velocità fissa di 20 km/h. Finché non si verifica alcuna collisione, il TestRun viene valutato con successo; se avviene una o più collisioni il TestRun non va a buon fine.

La road considerata è la stessa di quella usata nello scenario AEB CCRs, la cui descrizione è stata fatta nel paragrafo 3.3.1.

In tabella 3.10, 3.11, 3.12 e 3.13 vengono illustrati i risultati ottenuti rispettivamente per il Flag TTC, MTTC, DRAC e MDRAC, dove con Vf viene indicata la velocità dell'ego vehicle e per ogni TestRun sono indicati diverse soglie dei parametri surrogati, finché non si raggiunge una percentuale di margine ritenuta accettabile (25 ÷ 30%), calcolata come:

$$\% \text{ margine} = \frac{\Delta t_{\text{AEB}}}{\Delta t_{\text{Flag}}} / \Delta t_{\text{AEB}}$$

In giallo sono stati evidenziati i valori di soglia ritenuti accettabili per ogni TestRun.

*Tabella 3-10: tabella test AEB CCRm Flag TTC*

TESTRUN 1							
Vf [km/h]	TTC [s]	Attivazione Flag TTC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	Δt AEB	Δt Flag	% di margine
80	2,25	10,686	11,346	15,144	3,798	4,458	17,38%
80	3	9,936	11,346	15,144	3,798	5,208	37,12%
80	2,8	10,144	11,346	15,144	3,798	5	31,65%

TESTRUN 2							
Vf [km/h]	TTC [s]	Attivazione Flag TTC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	Δt AEB	Δt Flag	% di margine
60	1,6	17,808	18,274	21,145	2,871	3,337	16,23%
60	2	17,408	18,274	21,145	2,871	3,737	30,16%
60	2,25	17,152	18,274	21,145	2,871	3,993	39,08%

TESTRUN 3							
Vf [km/h]	TTC [s]	Attivazione Flag TTC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	Δt AEB	Δt Flag	% di margine
50	3	22,864	24,961	27,368	2,407	4,504	87,12%
50	1,6	24,273	24,961	27,368	2,407	3,095	28,58%
50	2	23,872	24,961	27,368	2,407	3,496	45,24%

TESTRUN 4							
Vf [km/h]	TTC [s]	Attivazione Flag TTC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	Δt AEB	Δt Flag	% di margine
40	2,8	35,985	37,973	39,82	1,847	3,835	107,63%
40	2	36,785	37,973	39,82	1,847	3,035	64,32%
40	1,6	37,185	37,973	39,82	1,847	2,635	42,66%

TESTRUN 5							
Vf [km/h]	TTC [s]	Attivazione Flag TTC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
30	2,8	74,897	75,889	77,165	1,276	2,268	77,74%
30	2	75,697	75,889	77,165	1,276	1,468	15,05%
30	2,25	75,441	75,889	77,165	1,276	1,724	35,11%

Tabella 3-11: tabella test AEB CCRm Flag MTTC

TESTRUN 1							
Vf [km/h]	MTTC [s]	Attivazione Flag MTTC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
80	2,25	10,686	11,346	15,144	3,798	4,458	17,38%
80	3	9,936	11,346	15,144	3,798	5,208	37,12%
80	2,8	10,144	11,346	15,144	3,798	5	31,65%

TESTRUN 2							
Vf [km/h]	MTTC [s]	Attivazione Flag MTTC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
60	1,6	17,808	18,274	21,145	2,871	3,337	16,23%
60	2	17,408	18,274	21,145	2,871	3,737	30,16%
60	2,25	17,152	18,274	21,145	2,871	3,993	39,08%

TESTRUN 3							
Vf [km/h]	MTTC [s]	Attivazione Flag MTTC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
50	3	22,864	24,961	27,368	2,407	4,504	87,12%
50	1,6	24,273	24,961	27,368	2,407	3,095	28,58%
50	2	23,872	24,961	27,368	2,407	3,496	45,24%

TESTRUN 4							
Vf [km/h]	MTTC [s]	Attivazione Flag MTTC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
40	2,8	35,985	37,973	39,82	1,847	3,835	107,63%
40	2	36,785	37,973	39,82	1,847	3,035	64,32%
40	1,6	37,185	37,973	39,82	1,847	2,635	42,66%

TESTRUN 5							
Vf [km/h]	MTTC [s]	Attivazione Flag MTTC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
30	2,8	74,897	75,889	77,165	1,276	2,268	77,74%
30	2	75,697	75,889	77,165	1,276	1,468	15,05%
30	2,25	75,441	75,889	77,165	1,276	1,724	35,11%

Tabella 3-12: tabella test AEB CCRm Flag DRAC

TESTRUN 1							
Vf [km/h]	DRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag DRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
80	3,3	10,416	11,346	15,144	3,798	4,728	24,49%
80	2,8	9,952	11,346	15,144	3,798	5,192	36,70%
80	2,5	10,16	11,346	15,144	3,798	4,984	31,23%

TESTRUN 2							
Vf [km/h]	DRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag DRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
60	2	16,624	18,274	21,145	2,871	4,521	57,47%
60	2,5	17,184	18,274	21,145	2,871	3,961	37,97%
60	3	17,552	18,274	21,145	2,871	3,593	25,15%

TESTRUN 3							
Vf [km/h]	DRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag DRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
50	3,3	24,609	24,961	27,368	2,407	2,759	14,62%
50	2	23,776	24,961	27,368	2,407	3,592	49,23%
50	2,5	24,193	24,961	27,368	2,407	3,175	31,91%

TESTRUN 4							
Vf [km/h]	DRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag DRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
40	0,75	35,073	37,973	39,82	1,847	4,747	157,01%
40	2,5	37,665	37,973	39,82	1,847	2,155	16,68%
40	2	37,393	37,973	39,82	1,847	2,427	31,40%

TESTRUN 5							
Vf [km/h]	DRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag DRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
30	3	-	75,889	77,165	1,276	-	-
30	0,6	75,377	75,889	77,165	1,276	1,788	40,13%
30	0,75	75,84	75,889	77,165	1,276	1,325	3,84%

Tabella 3-13: tabella test AEB CCRm Flag MDRAC

TESTRUN 1							
Vf [km/h]	MDRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag MDRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
80	3,8	9,888	11,346	15,144	3,798	5,256	38,39%
80	4,8	10,352	11,346	15,144	3,798	4,792	26,17%
80	4,5	10,24	11,346	15,144	3,798	4,904	29,12%

TESTRUN 2							
Vf [km/h]	MDRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag MDRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
60	4,8	17,398	18,274	21,145	2,871	3,747	30,51%
60	3,8	17,088	18,274	21,145	2,871	4,057	41,31%
60	4,5	17,328	18,274	21,145	2,871	3,817	32,95%

TESTRUN 3							
Vf [km/h]	MDRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag MDRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
50	4,8	24,145	24,961	27,368	2,407	3,223	33,90%
50	3,8	23,92	24,961	27,368	2,407	3,448	43,25%
50	4,5	24,096	24,961	27,368	2,407	3,272	35,94%

TESTRUN 4							
Vf [km/h]	MDRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag MDRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	$\Delta t$ AEB	$\Delta t$ Flag	% di margine
40	4,8	37,361	37,973	39,82	1,847	2,459	33,13%
40	4,5	37,313	37,973	39,82	1,847	2,507	35,73%
40	2	36,545	37,973	39,82	1,847	3,275	77,31%

TESTRUN 5							
Vf [km/h]	MDRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag MDRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	Δt AEB	Δt Flag	% di margine
30	4,8	76,4	75,889	77,165	1,276	0,765	-40,05%
30	1	75,457	75,889	77,165	1,276	1,708	33,86%
30	2	76,4	75,889	77,165	1,276	0,765	-40,05%

### 3.3.3 Calibrazione soglie su scenario AEB CCRb

In IPG CarMaker si può selezionare anche lo scenario AEB\_CCRb (Car-to-Car Rear Braking), in cui è presente un veicolo ego che percorre un tratto rettilineo in direzione ad un veicolo in movimento. La velocità dell'ego-veicolo (VUT) è di 50 km/h, così come quella del GVT e si può variare la distanza relativa tra i due veicoli da 12 a 40 metri e la decelerazione da -2 a -6m/s<sup>2</sup>. Si è scelto di considerare la distanza minore, che corrisponde al worst case, e si sono eseguiti due test, uno a -2 m/s<sup>2</sup> e uno a -6 m/s<sup>2</sup>. Finché non si verifica alcuna collisione, il TestRun viene valutato con successo; se avviene una o più collisioni il TestRun non va a buon fine.

La road considerata è la stessa di quella usata nello scenario AEB CCRs, la cui descrizione è stata fatta nel paragrafo 3.3.1.

In tabella 3.14, 3.15, 3.16 e 3.17 vengono illustrati i risultati ottenuti rispettivamente per il Flag TTC, MTTC, DRAC e MDRAC, dove con Vf viene indicata la velocità dell'ego vehicle e per ogni TestRun sono indicati diverse soglie dei parametri surrogati, finché non si raggiunge una percentuale di margine ritenuta accettabile (25 ÷ 30%), calcolata come:

$$\% \text{ margine} = \frac{\Delta t_{\text{AEB}}}{\Delta t_{\text{Flag}}} / \Delta t_{\text{AEB}}$$

In giallo sono stati evidenziati i valori di soglia ritenuti accettabili per ogni TestRun.

*Tabella 3-14: tabella test AEB CCRb Flag TTC*

TESTRUN 1 -> distanza 12 m e decelerazione -2 m/s <sup>2</sup>							
Vf [km/h]	TTC [s]	Attivazione Flag TTC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	Δt AEB	Δt Flag	% di margine
50	2,2	12,146	12,85	14,66	1,81	2,514	38,90%
50	1,6	12,45	12,85	14,66	1,81	2,21	22,10%
50	3,5	11,674	12,85	14,66	1,81	2,986	64,97%
50	2	12,242	12,85	14,66	1,81	2,418	33,59%

TESTRUN 2 -> distanza 12 m e decelerazione -6 m/s							
Vf [km/h]	TTC [s]	Attivazione Flag TTC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	Δt AEB	Δt Flag	% di margine
50	3	10,834	10,818	12,63	1,812	1,796	-0,88%
50	1,6	-	10,818	12,63	1,812	-	-
50	3,5	10,76	10,818	12,63	1,812	1,87	3,20%
50	4	10,706	10,818	12,63	1,812	1,924	6,18%
50	4,8	10,666	10,818	12,63	1,812	1,964	8,39%

*Tabella 3-15: tabella test AEB CCRb Flag MTTC*

TESTRUN 1 -> distanza 12 m e decelerazione -2 m/s <sup>2</sup>							
Vf [km/h]	MTTC [s]	Attivazione Flag MTTC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	Δt AEB	Δt Flag	% di margine
50	4,5	10,357	12,85	14,66	1,81	4,303	137,73%
50	2	10,357	12,85	14,66	1,81	4,303	137,73%
50	3,3	10,357	12,85	14,66	1,81	4,303	137,73%

TESTRUN 2 -> distanza 12 m e decelerazione -6 m/s							
Vf [km/h]	MTTC [s]	Attivazione Flag MTTC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	Δt AEB	Δt Flag	% di margine
50	4,5	10,265	10,818	12,63	1,812	2,365	30,52%
50	2	10,265	10,818	12,63	1,812	2,365	30,52%
50	3,3	10,265	10,818	12,63	1,812	2,365	30,52%

*Tabella 3-16: tabella test AEB CCRb Flag DRAC*

TESTRUN 1 -> distanza 12 m e decelerazione -2 m/s <sup>2</sup>							
Vf [km/h]	DRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag DRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	Δt AEB	Δt Flag	% di margine
50	0,8	11,888	12,85	14,66	1,81	2,772	53,15%
50	4,5	12,594	12,85	14,66	1,81	2,066	14,14%
50	4	12,562	12,85	14,66	1,81	2,098	15,91%
50	2	12,309	12,85	14,66	1,81	2,351	29,89%

TESTRUN 2 -> distanza 12 m e decelerazione -6 m/s							
Vf [km/h]	DRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag DRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	Δt AEB	Δt Flag	% di margine
50	3,3	-	10,818	12,63	1,812	-	-
50	1,6	-	10,818	12,63	1,812	-	-
50	0,6	10,76	10,818	12,63	1,812	1,87	3,20%

*Tabella 3-17: tabella test AEB CCRb Flag MDRAC*

TESTRUN 1 -> distanza 12 m e decelerazione -2 m/s <sup>2</sup>							
Vf [km/h]	MDRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag MDRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	Δt AEB	Δt Flag	% di margine
50	2,2	12,146	12,85	14,66	1,81	2,514	38,90%
50	1,6	12,45	12,85	14,66	1,81	2,21	22,10%
50	3,5	11,674	12,85	14,66	1,81	2,986	64,97%
50	2	12,242	12,85	14,66	1,81	2,418	33,59%

TESTRUN 2 -> distanza 12 m e decelerazione -6 m/s							
Vf [km/h]	MDRAC [m/s <sup>2</sup> ]	Attivazione Flag MDRAC [s]	Attivazione AEB [s]	Tempo di margine (Vf = 0)	Δt AEB	Δt Flag	% di margine
50	0,8	10,828	10,818	12,63	1,812	1,802	-0,55%
50	0,6	10,77	10,818	12,63	1,812	1,86	2,65%
50	0,3	10,639	10,818	12,63	1,812	1,991	9,88%

### 3.3.4 Analisi e definizione soglie limite

Sulla base dei dati ottenuti attraverso i TestRun considerati, è stato possibile andare a determinare una possibile correlazione tra i valori di soglia “ideali” per ogni simulazione e alcune variabili contenute nelle formule di calcolo dei parametri surrogati di sicurezza, andando a definire il coefficiente di correlazione.

Il coefficiente di correlazione è una misura specifica usata nell'analisi della correlazione per quantificare la forza della relazione lineare tra due variabili. Nei report, tale coefficiente è indicato con la lettera r.

Il coefficiente di correlazione r, anche detto *indice di Pearson*, è un valore privo di unità di misura e compreso tra -1 e 1. La significatività statistica è indicata tramite un p-value. Pertanto, le correlazioni in genere vengono scritte ricorrendo a due numeri fondamentali: r = e p =.

Più r si avvicina a zero, più la correlazione lineare è debole.

Un valore r positivo è indice di una correlazione positiva, in cui i valori delle due variabili tendono ad aumentare in parallelo.

Un valore r negativo è indice di una correlazione negativa, in cui il valore di una variabile tende ad aumentare quando l'altra diminuisce.

I valori 1 e -1 rappresentano le correlazioni "perfette", una positiva e l'altra negativa. Due variabili perfettamente correlate mutano insieme a velocità fissa. In questo caso, si dice che hanno una relazione lineare perché, se inseriti in un grafico a dispersione, tutti i punti di dati possono essere collegati tra loro tramite una linea retta.

Il coefficiente di correlazione campione si può rappresentare con una formula:

$$r = \frac{\sum [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 * \sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

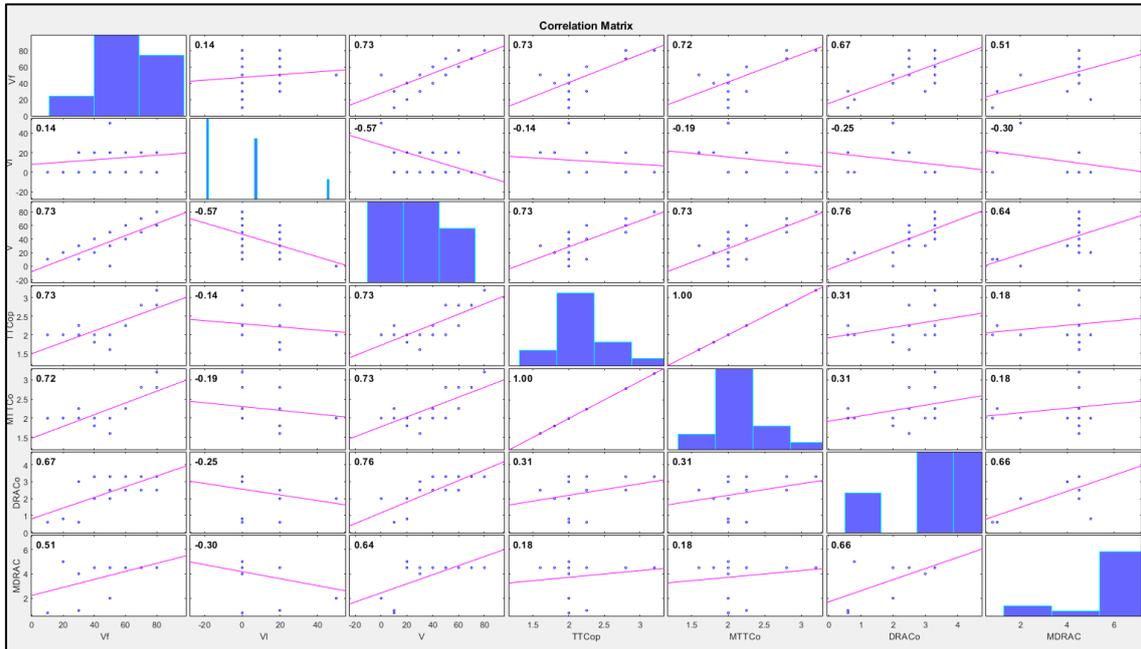
The diagram includes the following annotations:

- Value of X**: points to  $x_i$
- Value of Y**: points to  $y_i$
- Summation: "Take The Sum Of"**: points to the summation symbol  $\sum$
- Mean of X Variable**: points to  $\bar{x}$
- Mean of Y Variable**: points to  $\bar{y}$
- Sample Correlation Coefficient**: points to  $r$
- Sum of the squared deviations for X**: points to  $\sum (x_i - \bar{x})^2$
- Sum of the squared deviations for Y**: points to  $\sum (y_i - \bar{y})^2$
- Square Root**: points to the square root symbol  $\sqrt{\quad}$

Per calcolare il coefficiente di correlazione si può adoperare la funzione "corrplot(X)" di Matlab, che crea una matrice di grafici che mostrano le correlazioni tra coppie di variabili in X. Gli istogrammi delle variabili appaiono lungo la diagonale della matrice; i grafici a dispersione delle coppie di variabili vengono visualizzati nella diagonale off. Le pendenze delle linee di riferimento dei minimi quadrati nei grafici a dispersione sono uguali ai coefficienti di correlazione visualizzati.

In Fig. 3.33 viene mostrata la matrice di correlazione tra i parametri surrogati di sicurezza e le variabili Vf, VI e V, che risultano rispettivamente la velocità dell'ego

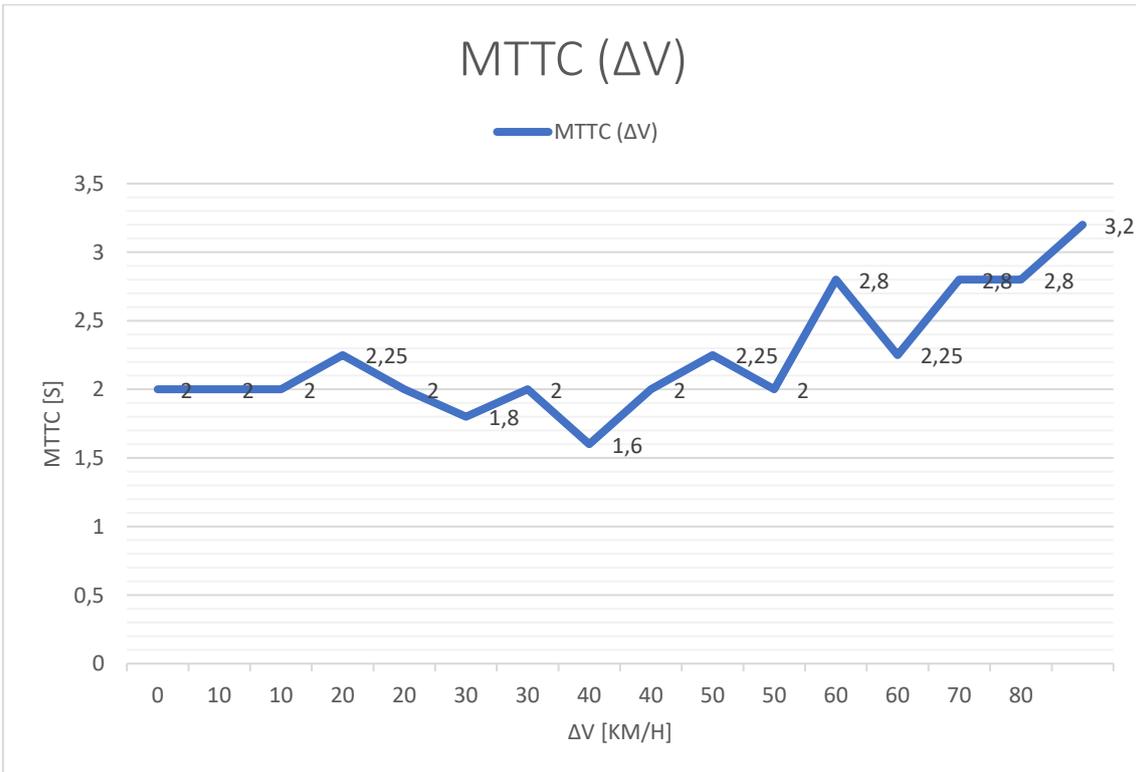
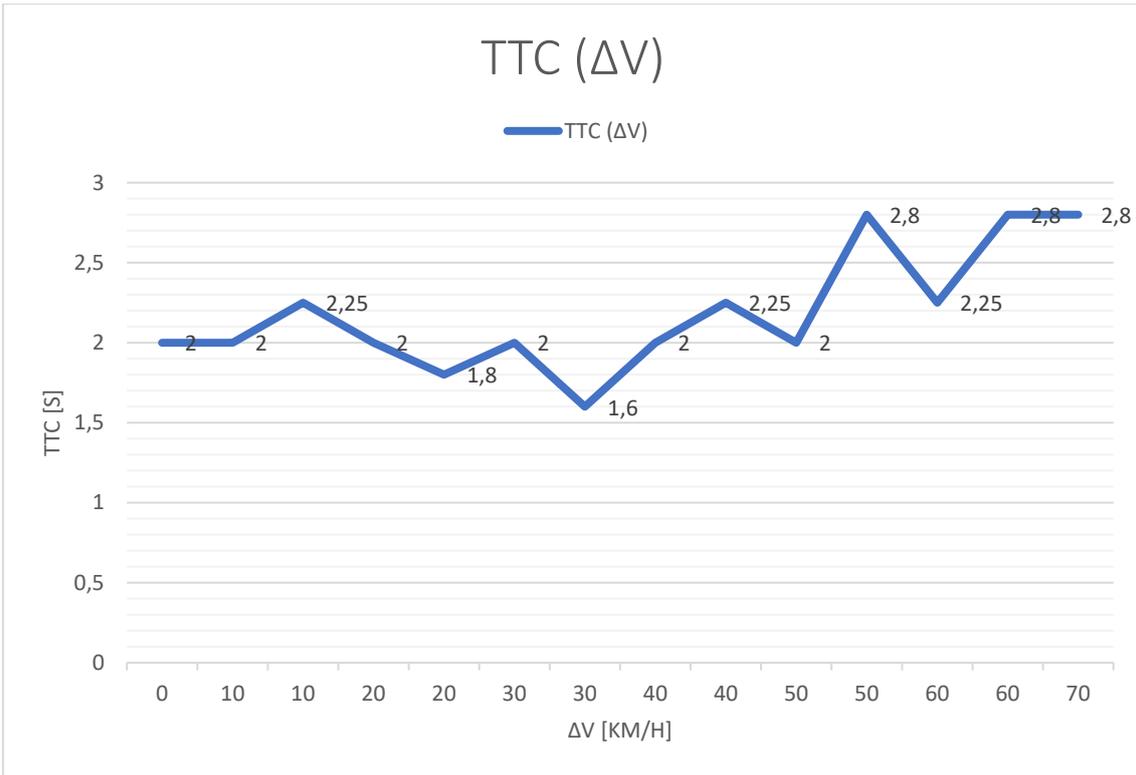
vehicle, del lead vehicle e il delta velocità ( $\Delta V$ ) tra ego vehicle e lead vehicle, valutato come ( $V_f - V_l$ ).

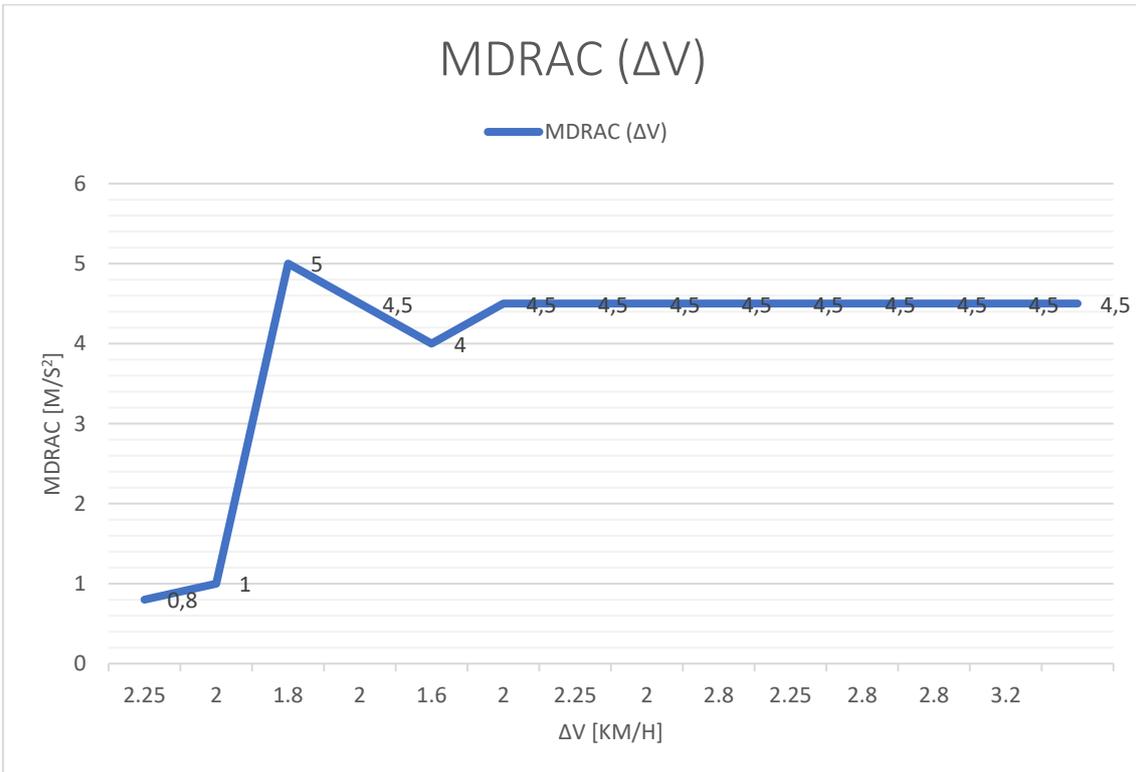
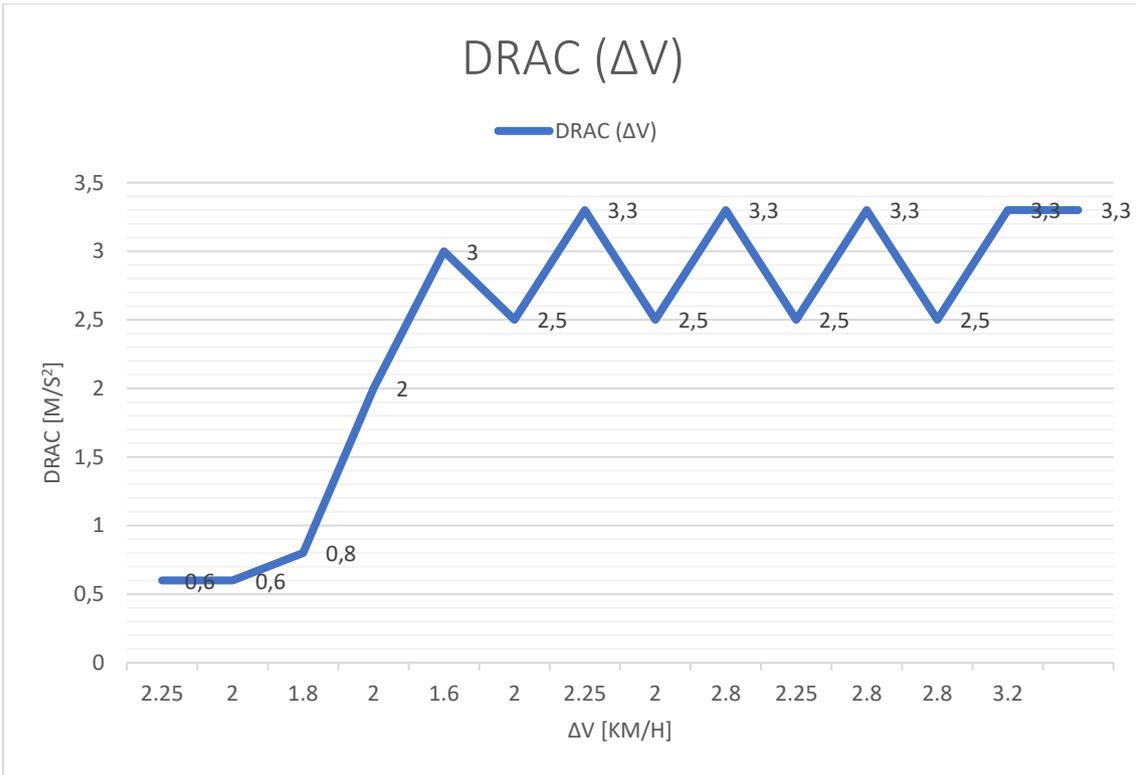


**Fig. 3-33: Matrice di correlazione tra TTC, MTTC, DRAC e MDRAC in funzione di  $V_f$ ,  $V_l$  e  $\Delta V$**

Dall'analisi di tale matrice si può evincere che la variabile  $\Delta V$  produce con tutti i parametri surrogati di sicurezza un indice  $r$  positivo e prossimo ad 1, il che è indice di una correlazione positiva, in cui i valori delle due variabili tendono ad aumentare in parallelo. Nello specifico il valore di  $r$  correlato tra TTC, MTTC, DRAC e MDRAC con il  $\Delta V$  assume un valore rispettivamente di 0.73, 0.73, 0.76 e 0.64. Si ha quindi una buona correlazione e maggiore rispetto alle altre due variabili  $V_f$  e  $V_l$ .

Racchiudendo tutti i dati di simulazione in un unico grafico, è stato possibile a questo punto andare a graficare i vari parametri surrogati di sicurezza in funzione del delta velocità ( $\Delta V$ ), come mostrato di seguito:





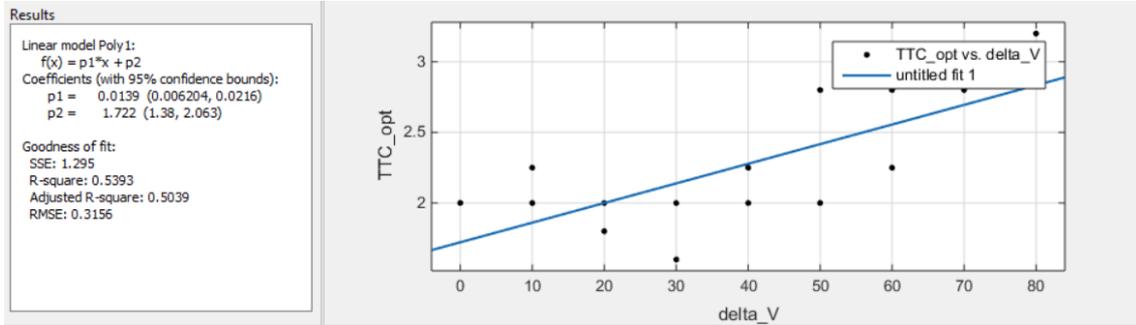
Mediante la funzionalità di curve fitting di Matlab si è potuta così determinare una legge lineare del primo ordine per rappresentare il TTC ( $\Delta V$ ):

$$TTC(\Delta V) = p1 * \Delta V + p2$$

dove p1 e p2 sono i Coefficienti (con limiti di confidenza al 95%):

$$p1 = 0.0139 (0.006204, 0.0216)$$

$$p2 = 1.722 (1.38, 2.063)$$



Con la stessa legge si è determinato l'MTTC ( $\Delta V$ ), mentre per il DRAC ( $\Delta V$ ) e MDRAC ( $\Delta V$ ) non è stato possibile andare a determinare una legge lineare, ma si è definita per punti la correlazione tra le due variabili.

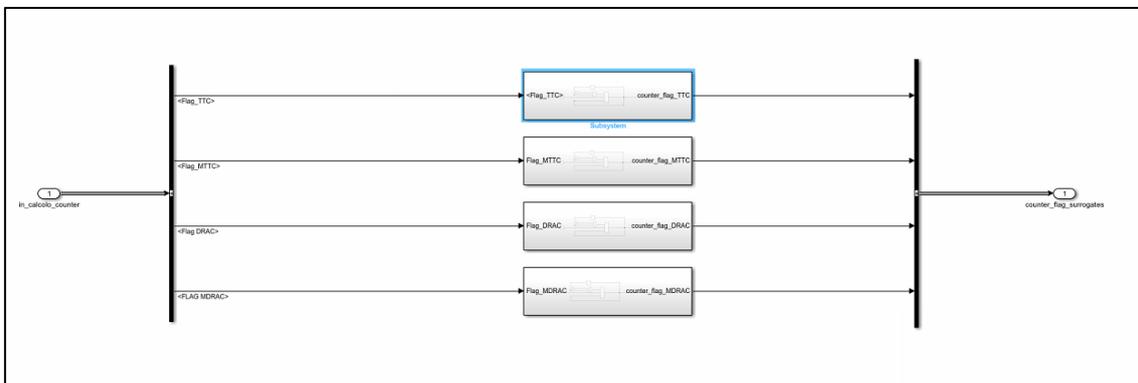
## 4 Validazione e testing della metodologia

In questo capitolo verrà descritta la validazione e il testing della metodologia, che richiede l'implementazione del controllore all'interno della piattaforma integrata.

Il primo passo per consentire la validazione della metodologia è stato quello di integrare i vari elementi descritti attraverso la realizzazione di opportuni case studies, andando quindi a realizzare dei TestRun di scenari in continuo con la coo-simulazione in real-time di tutti i software e hardware inclusi nell'ambiente di testing considerato e sviluppato in tale attività di ricerca, o parte di essi.

Questo può includere, pertanto, la realizzazione del database CAN per l'integrazione e comunicazione degli elementi hardware (Speedgoat e Xpack4) e la costruzione di un modello di traffico per la realizzazione di una rete stradale mediante IPG CarMaker e PTV VISSIM. Tali aspetti sono stati già descritti nei precedenti paragrafi.

La validazione della metodologia viene effettuata anche attraverso l'analisi in post-processing delle simulazioni del numero di volte di attivazione dei vari Flag definiti nel paragrafo 2.4. È stato, infatti, implementato nel modello di calcolo dei vari Flag anche un blocco che funge da contatore, incrementando il counter ogni qualvolta il Flag si attiva (Fig. 4.1).



**Fig. 4-1: Blocco di calcolo in output al controllore (counter flag)**

Sulla base di questi counter, per poter validare la metodologia sarà necessario verificare che:

$$n^{\circ} \text{ flag parametri surrogati} \geq n^{\circ} \text{ flag collisioni}$$

Questo consente di assicurarsi che il numero minimo di attivazione dei Flag sia almeno pari al numero di collisioni che avvengono durante la simulazione.

Inoltre, considerando la possibilità di effettuare simulazioni in continuo di diversa tipologia, si possono effettuare delle ulteriori valutazioni sulla base della tipologia di driver o sulla tipologia di funzionalità ADAS considerata.

#### 4.1 1° Case study: ambiente MIL con IPG CarMaker

Un primo case study è stato realizzato in ambiente MIL usando IPG CarMaker for Simulink (non ambiente HIL con Mathworks SpeedGoat), andando a integrare al sistema un modello di simulazione del traffico stocastico che fornisce IPG CarMaker, in quanto non è possibile coo-simulare PTV Vissim con CarMaker for Simulink.

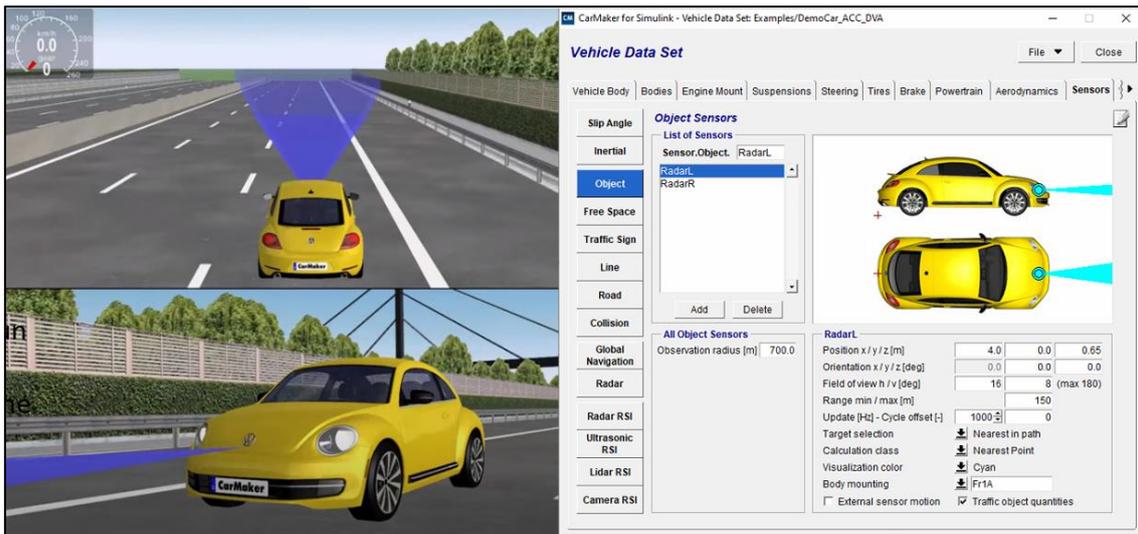
Rispetto quindi alla piattaforma completa, tale applicazione risulta semplificata, per non introdurre troppe variabili nella prima fase di testing della metodologia.

Sono stati considerati diversi TestRun di simulazioni in continuo considerando un tempo di simulazione di 10000s, il che equivale a circa 300km  $\forall$  simulazione.

Sono stati considerati tre set di simulazioni:

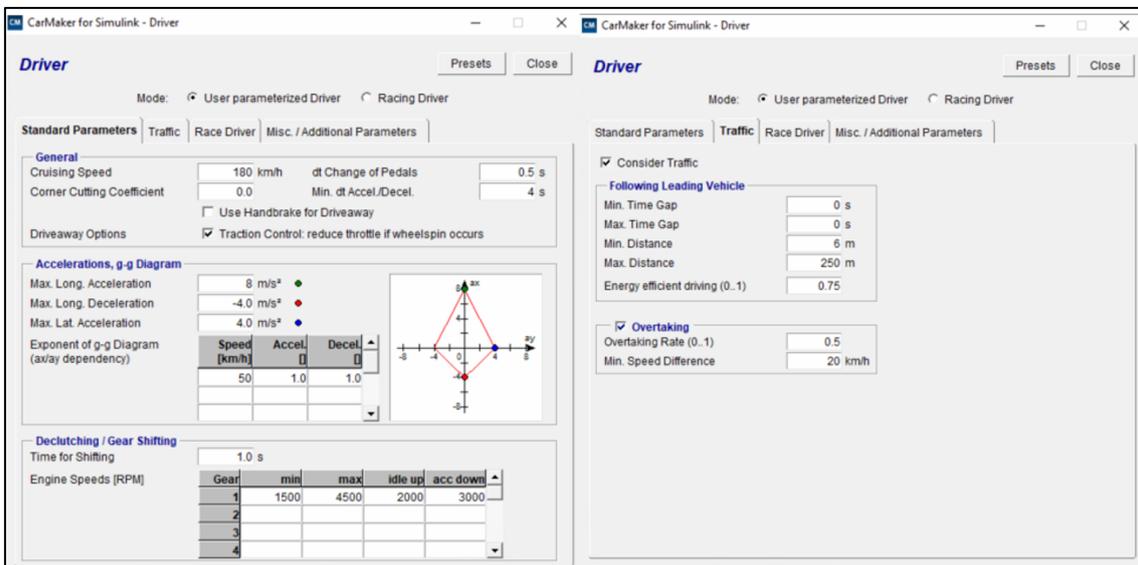
- a) Driver simulato che non considera il traffico e senza logica ADAS
- b) Driver simulato che considera il traffico
- c) Driver simulato che considera il traffico + logica AEB.

Il caso a) è rappresentato, nello specifico, da una guida autonoma incondizionata con driver simulato che esegue azioni di accelerazione e frenata. Si ha un Radar a lungo raggio (150m) e un Radar a corto raggio (10m) che rilevano gli oggetti, ma nessuna azione evasiva che eviti i conflitti con il traffico può essere attuata.



**Fig. 4-2: Configurazione simulazione caso a)**

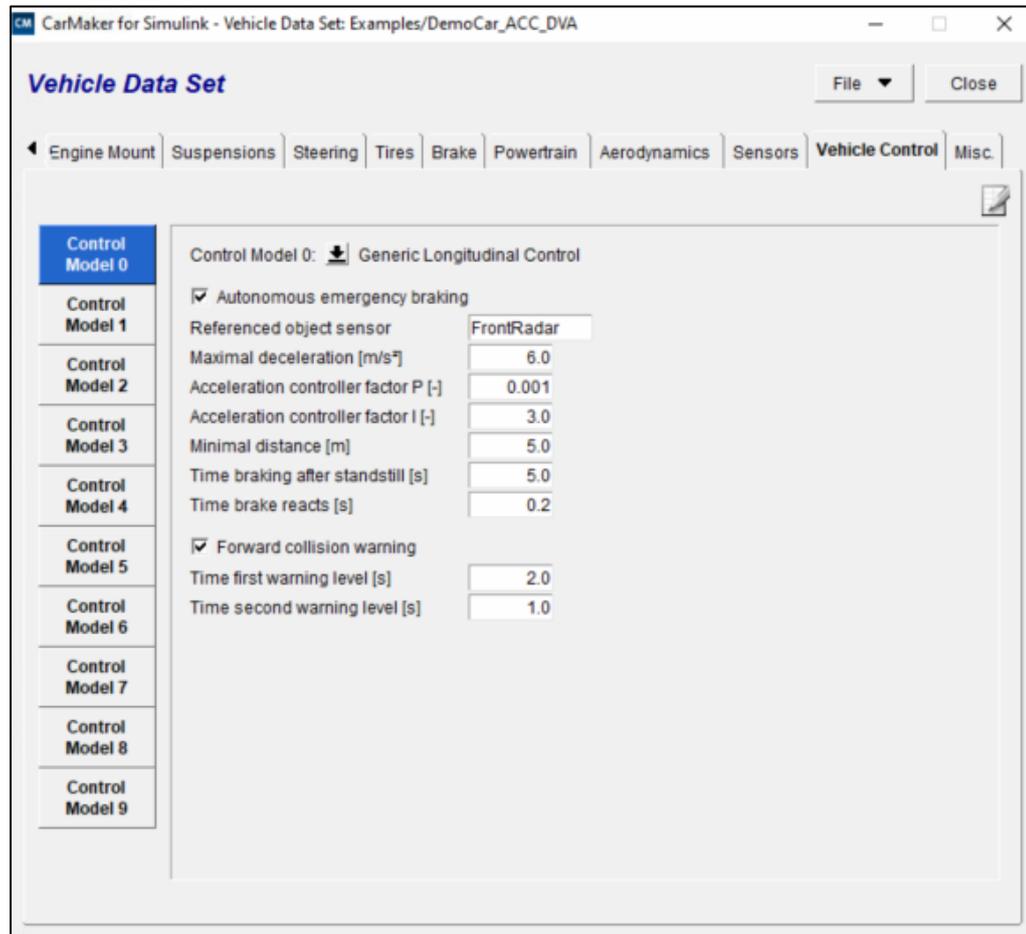
Il caso b) è rappresentato da una guida autonoma condizionata dalla presenza di un modello di driver che considera il traffico e può attuare, a causa di oggetti rilevati, azioni di frenata, sorpasso e accelerazione. Tale modello viene configurato in CarMaker e si è impostata un Rate di sorpasso dello 0,5 con una differenza minima di Velocità di 20 km/h, poiché si è osservato che con un rate più alto il modello andava in instabilità.



**Fig. 4-3: Configurazione simulazione caso b)**

Il caso c) è rappresentato da una guida autonoma condizionata da un modello di driver e da una logica ADAS di Autonomous Emergency Brake (AEB) che può attuare, in aggiunta alle azioni del driver, azioni di frenata quando viene rilevata una distanza dal

veicolo target inferiore a 5m. Anche in tal caso si è adoperata una logica ADAS già sviluppata all'interno di CarMaker, allo stesso modo di quanto effettuato per lo sviluppo e testing del controllore nel paragrafo 3.2.



*Fig. 4-4: Configurazione simulazione caso c)*

Oltre alla valutazione del numero di attivazioni dei Flag rispetto al numero di collisioni rilevate, in questo Case study si possono effettuare delle ulteriori valutazioni sulla base della tipologia di driver e sulla tipologia di funzionalità ADAS considerata.

In tal caso si possono considerare i seguenti parametri in simulazione:

- Counter Flag collision;
- Counter Flag TTC, MTTC, DRAC, MDRAC, DCIA;
- N° interventi del driver;
- N° interventi dell'AEB.

In assenza di driver, il veicolo risulterà privo di possibili azioni di anti-collisione; di conseguenza si genereranno N collisioni che permetteranno di valutare la correttezza dei calcoli dei flag, in quanto il conteggio dei flag dovrà quantomeno essere pari al numero N di collisioni.

In presenza di un modello di driver simulato dovranno prevedersi N-X collisioni, mentre con l'aggiunta della logica AEB si dovranno prevedere un numero di collisioni ancora inferiori, ossia N-X-Y. I parametri da considerare quindi per la validazione della metodologia in tal caso sono:

- n° flag parametri surrogati  $\geq$  n° flag collisioni
- n° flag parametri collisioni caso b)  $<$  n° flag parametri collisioni caso a)
- n° flag parametri collisioni caso c)  $<$  n° flag parametri collisioni caso b)

Le simulazioni hanno dimostrato che l'attivazione dei flag legati ai parametri di sicurezza surrogati rileva correttamente tutte le collisioni, in quanto vi è almeno un flag che si attiva 211 volte, ovvero un numero maggiore delle 210 collisioni verificate; inoltre, con la presenza dei driver e della logica AEB, il numero di counter flag diminuisce, attestando l'effettiva efficienza e miglioramento che apportano sia il guidatore che la logica di controllo, poiché in questo caso le collisioni vengono ridotte o addirittura annullate.

In tabella 4.1 vengono mostrati i risultati ottenuti:

**Tabella 4-1: Risultati 1° case study**

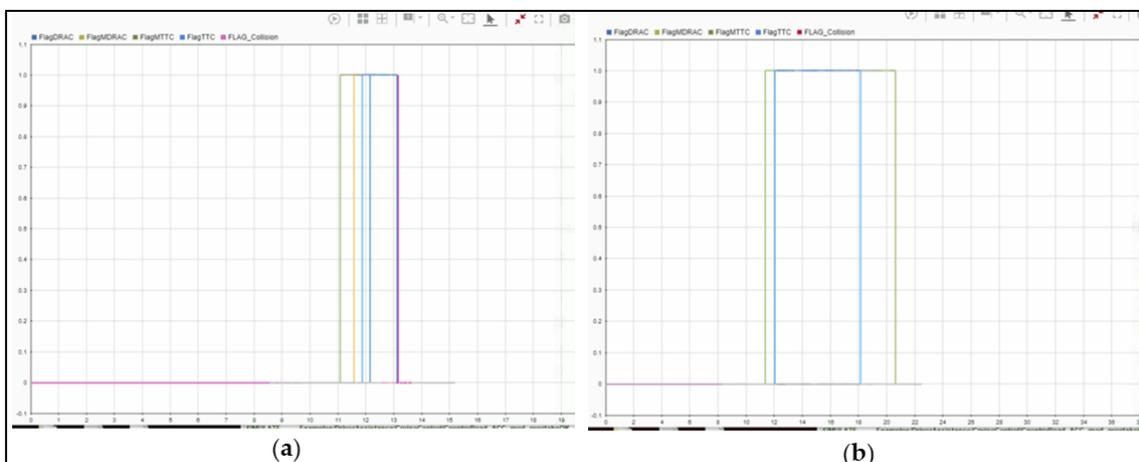
MIL simulation	N° Collision flag	N° TTC, MTTC, DRAC, MDRAC flag	N° driver interventions	N° AEB interventions
a) Driver simulato che non considera il traffico e senza logica ADAS	210	211 – 209 – 208 – 208	-	-
b) Driver simulato che considera il traffico	8	18 – 37 – 5 – 18	63	-
c) Driver simulato che considera il traffico + logica AEB	0	21 – 34 – 1 – 16	55	44

In Fig. 4.5 si può osservare un fermo immagine della simulazione:



**Fig. 4-5: Estratto della simulazione del 1° case study**

In Fig. 4.6 viene mostrato un confronto tra il caso a) senza driver e senza logica ADAS e il caso c), con modello di driver simulato e logica AEB.



**Fig. 4-6: Confronto calcolo Flag parametri surrogati di sicurezza in real-time per il caso a) e caso c)**

Nel caso a) (4.6 a), c'è prima un'attivazione dei flag dei parametri surrogati e poi il flag di collisione (in viola), mentre nel caso c) (4.6 b), alcuni flag dei parametri surrogati si attivano, senza però avere una collisione, poiché c'è l'azione del guidatore e la logica di controllo che impedisce il conflitto.

In particolare, osservando sempre la Fig. 4.6, il parametro più indicativo e preciso risulta essere l'MTTC (in verde) (Modified Time to Collision), ossia il tempo necessario affinché due veicoli collidano, che tiene conto di accelerazioni o decelerazioni, a differenza invece del TTC (Time to Collision), che considera velocità e direzione costante. L'MTTC riesce ad attivarsi un istante prima del TTC, segno che la calibrazione effettuata per tale parametro consente di prevenire in anticipo una possibile collisione.

L'analisi dei risultati ottenuti dalle simulazioni mostra che si generano molti conflitti. Il caso a) è privo di azioni anticollisione ed è stato predisposto solo per poter validare in modo più accurato la metodologia introdotta. Infatti, il maggior numero di collisioni possibili è stato creato appositamente per testare meglio il calcolo dei parametri di sicurezza surrogati in tempo reale. I casi b) e c) considerano ancora un gran numero di conflitti, poiché è stato considerato un modello di driver impreciso, in quanto lo scopo di queste simulazioni non era quello di ottenere zero collisioni, ma di evidenziare le differenze caso per caso, tenendo sempre conto dell'obiettivo dell'esperimento, ovvero validare una nuova metodologia di test per sistemi ADAS in un ambiente virtuale.

## 4.2 2° Case study: validazione funzionalità AEB

Il 1° case study è servito per validare la metodologia, concentrandosi più sulla verifica della correttezza dei risultati ottenuti da tre diversi casi, piuttosto che sulla validazione della funzionalità ADAS under test.

In questo secondo case study si vuole, invece, andare ad effettuare una validazione della funzionalità AEB di IPG CarMaker in un ambiente di test più complesso, costituito da tutti gli elementi considerati nella piattaforma di testing sviluppata in tale attività di ricerca.

In tal modo si può anche effettuare un'analisi di correlazione tra la frequenza di collisioni e la situazione di traffico che si verifica nell'istante di collisione o possibile collisione.

Per la descrizione del case study verrà dettagliato di seguito il veicolo, la road e lo scenario considerato, per poi analizzare i risultati ottenuti dalle simulazioni.

### 4.2.1 Veicolo simulato

Il veicolo considerato in tale case study è rappresentato da un veicolo presente nella libreria di CarMaker: un BMW Serie 5 dotato di un Sensor Object, il RadarL (vedi Fig. 4.7), con una rilevazione di oggetti fino ai 150 m e dotato di un controllo longitudinale rappresentato da una funzionalità AEB che inizia ad agire quando la distanza tra il veicolo rilevato diviene inferiore ai 5 m e può imporre una decelerazione massima di  $6\text{m/s}^2$  (vedi Fig. 4.8).

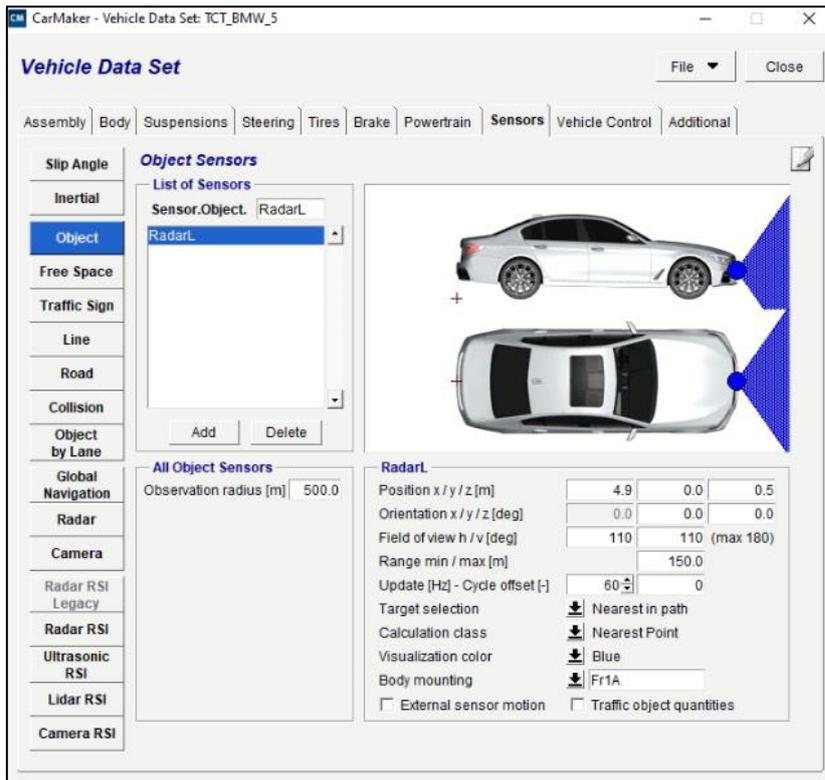


Fig. 4-7: Sensor objects considerati nel veicolo simulato del 2° case study

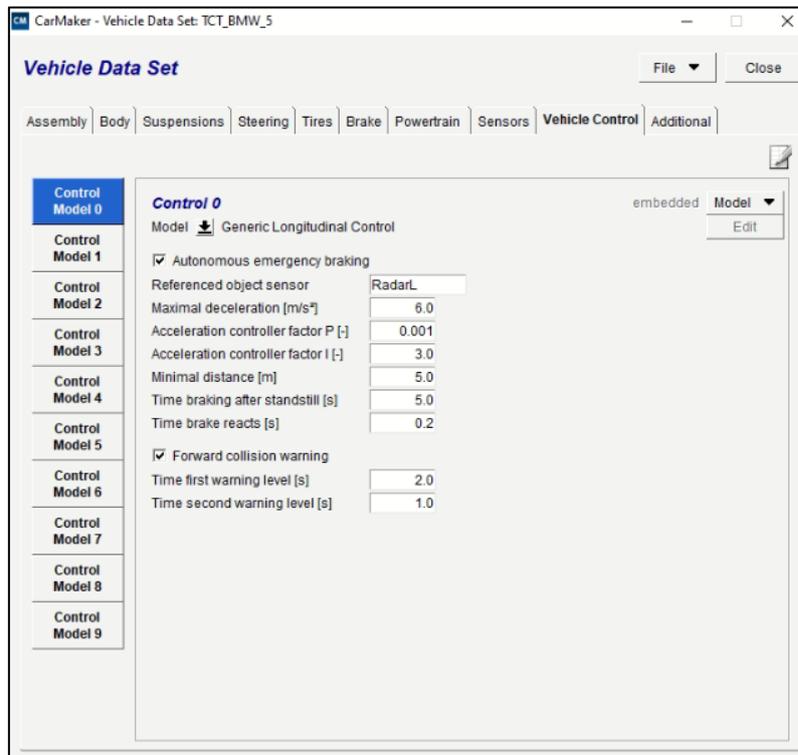
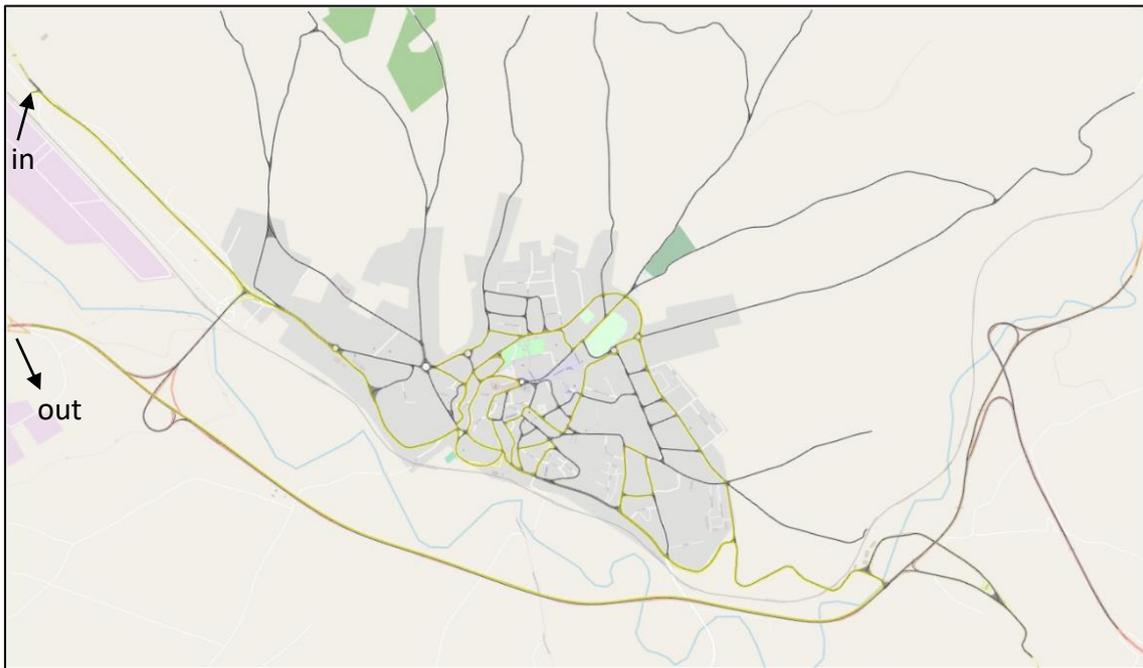


Fig. 4-8: Configurazione AEB

#### 4.2.2 Road

Come Road si è considerata la rete stradale di Lioni, la cui realizzazione nel sw IPG CarMaker, con successiva conversione per il sw PTV Vissim, è stata già descritta nel paragrafo 3.1.4.

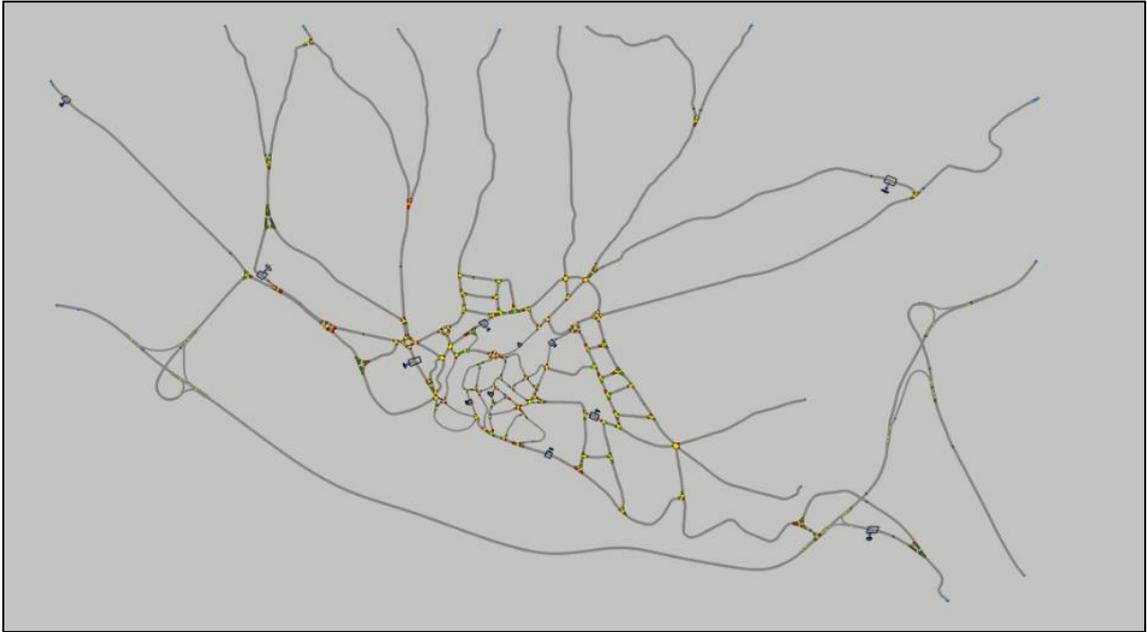
La route considerata per l'ego vehicle copre una distanza di circa 14 km per ogni simulazione e percorre un tratto di strada sia urbano che extraurbano, come si può vedere dalla Fig. 4.9, in cui la route viene evidenziata in giallo.



*Fig. 4-9: Route definita nello scenario di Lioni*

La generazione del traffico su questa Road viene demandata al sw PTV Vissim, che consente di considerare, come detto nel paragrafo 3.1.4, una matrice O/D e di far variare il flusso di veicoli in maniera automatica ad ogni TestRun lanciato tra una simulazione ed un'altra. Il numero di traffic objects considerati per ogni simulazione è di circa 200.

La Road di Lioni importata nel sw PTV Vissim è riportata in Fig. 4.10.



**Fig. 4-10: Road di Lioni importata in PTV Vissim**

#### 4.2.3 Scenario

La manovra consiste nell'eseguire una guida libera fino a quando non termina la percorrenza della route considerata. Il driver impostato ha una guida di tipo normale e viene considerato il traffico con possibilità di eseguire sorpassi quando la differenza di velocità tra ego vehicle e lead vehicle è almeno pari a 20 km/h (Fig. 4.11).



**Fig. 4-11: Impostazione driver**

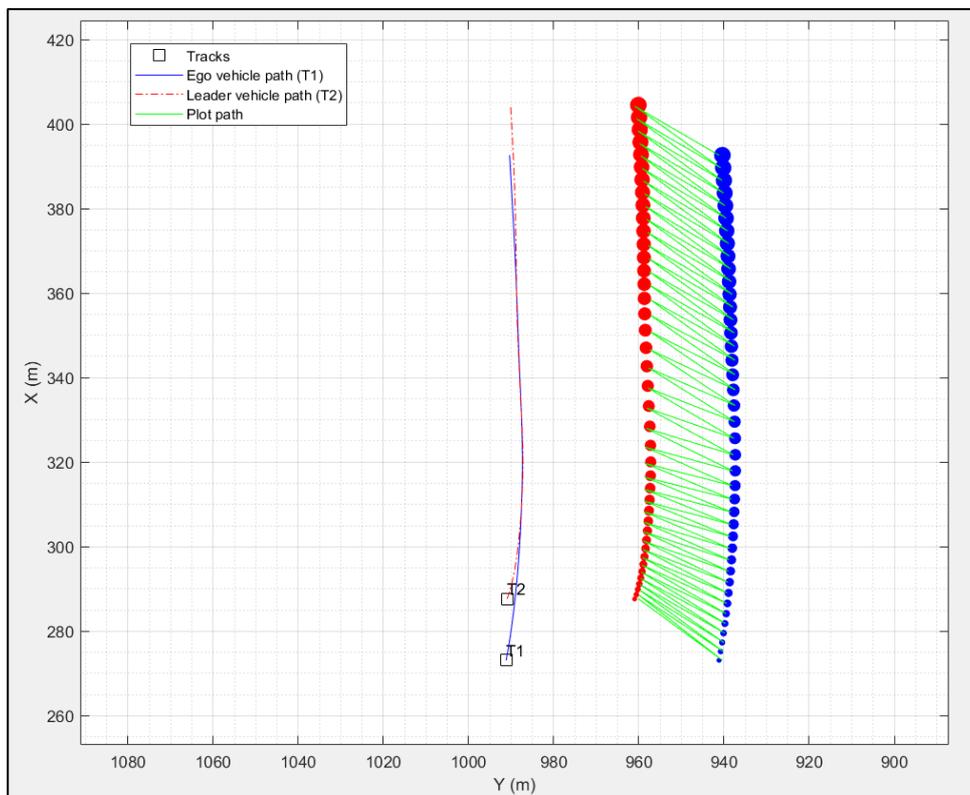
#### 4.2.4 Analisi dei risultati

Sono state lanciate 45 simulazioni che coprono un numero di km pari a 662 per un totale di 62278 secondi di simulazione real-time. Per ogni simulazione è stata effettuata un'analisi dei risultati mediante lo sviluppo di uno script di post-processing in Matlab.

Lo script ha l'obiettivo di andare ad estrarre gli eventi critici (situazioni di near-collision o collision) e di prelevare le informazioni necessarie per poter effettuare una classificazione dell'evento. Per ogni evento critico viene plottata la traiettoria dell'ego vehicle e del lead vehicle in modo tale da poter classificare l'evento in uno dei seguenti casi:

- Rischio o collisione per tamponamento;
- Rischio o collisione per sorpasso;
- Rischio o collisione per impatto laterale;
- Rischio o collisione per manovra di cut in o cut out;
- Rischio o collisione per immissioni in carreggiata o rotatorie;
- Rischio o collisione per veicoli provenienti da direzione opposta.

In Fig. 4.12 viene mostrato un esempio di plot grafico di un evento critico prodotto dallo script in Matlab.



*Fig. 4-12: Plot in post-processing di un evento critico*

In blu e in rosso si possono visualizzare le traiettorie rispettivamente dell'ego vehicle e del lead vehicle, la cui posizione iniziale è rappresentata dai riquadri T1 e T2. Tali traiettorie vengono costruite attraverso la funzione "comet" di Matlab, che è un'animazione di un marker (testa) e una linea (coda) che tracciano una linea crescente sui punti dati. La coda è una linea continua che traccia l'intera funzione. Questa funzione permette di verificare in maniera semplice ed immediata, in fase di post-processing, il solo tratto di simulazione nell'intorno dell'evento critico rilevato da uno dei parametri surrogati di sicurezza.

Inoltre, sullo stesso plot, per facilitare anche la visualizzazione senza animazione, viene riportata, con un offset laterale, una rappresentazione per punti. Una linea unisce punti che si trovano allo stesso istante di tempo: tale linea rappresenta la distanza longitudinale o laterale tra l'ego vehicle e il lead vehicle e può far comprendere meglio la situazione considerata, poiché dà idea di una reale collisione o meno. Un'unione orizzontale dei punti rappresenterebbe, infatti, una collisione tra i due veicoli.

Grazie al post-processing realizzato si è potuta effettuare una classificazione delle situazioni di near-collision e collision che sono state rilevate durante le simulazioni considerate in questo case study.

I risultati mostrano un numero di interventi riportati in tabella 4.2

***Tabella 4-2: Risultati 2° case study***

<b>n° interventi TTC</b>	121
<b>n° interventi MTTC</b>	538
<b>n° interventi DRAC</b>	938
<b>n° interventi MDRAC</b>	252
<b>n° interventi DCIA</b>	444
<b>n° collisioni</b>	19

Tramite lo script di post-processing si sono analizzati e classificati i casi di interventi per TTC e per collisioni, andando così ad effettuare una classificazione degli eventi riportata in tabella 4.3 e 4.4.

**Tabella 4-3: Classificazione eventi legati ad attivazione su base TTC**

Rischi per tamponamenti	18
Rischi per sorpassi	48
Rischi per impatti laterali	3
Rischi per cut in o cut out	1
Rischi per immissioni in carreggiata o rotonde	4
Rischi per veicoli direzione opposta	6

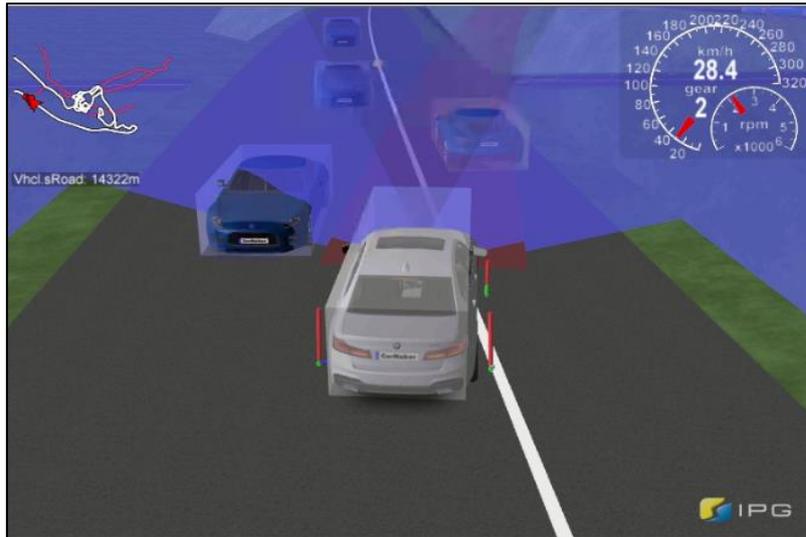
**Tabella 4-4: Classificazione eventi legati ad attivazione per collisioni**

Collisioni per tamponamenti	0
Collisioni per sorpassi	12
Collisioni per impatti laterali	3
Collisioni per cut in o cut out	1
Collisioni per immissioni in carreggiata o rotonde	1
Collisioni frontale veicolo direzione opposta	2

Sulla base di queste classificazioni sono state effettuate delle analisi grafiche su IPG CarMaker per evidenziare e capire ancora meglio le situazioni critiche considerate. Nelle successive figure vengono illustrati alcuni dei casi critici in questione.



**Fig. 4-13: Rischio per tamponamento**



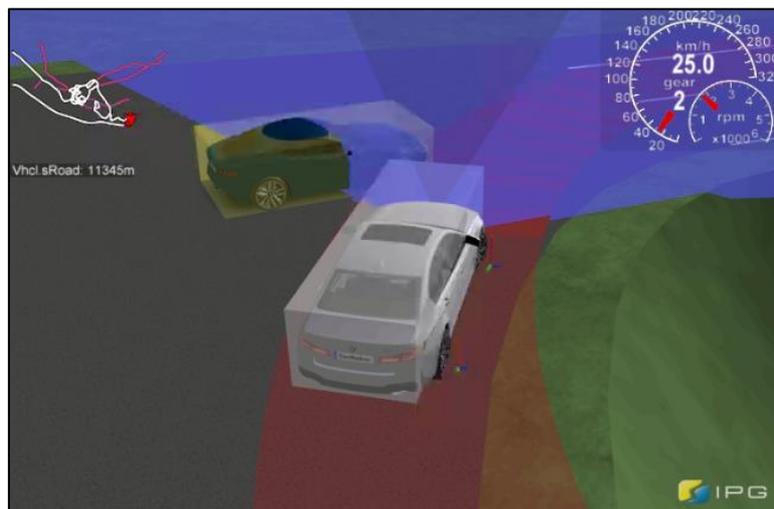
*Fig. 4-14: Rischio per rientro da manovra di sorpasso*



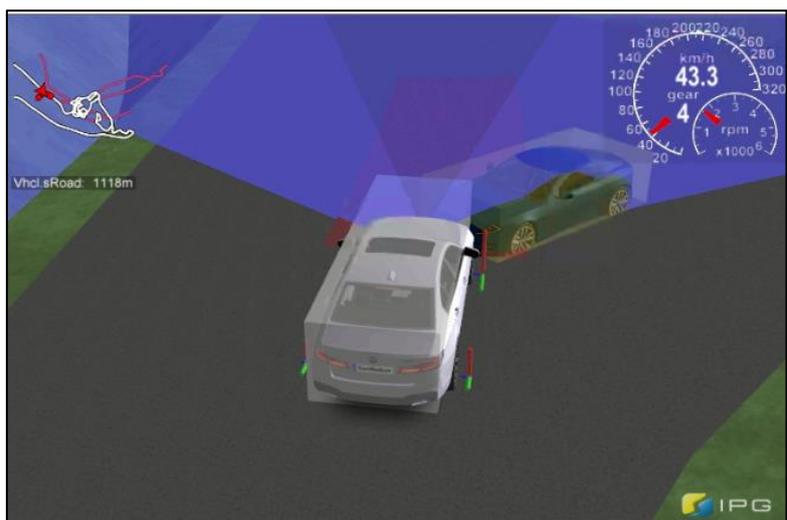
*Fig. 4-15: Collisione per rientro da manovra di sorpasso*



*Fig. 4-16: Collisione per manovra di cut in*



*Fig. 4-17: Rischio per impatto laterale*



***Fig. 4-18: Collisione per impatto laterale***

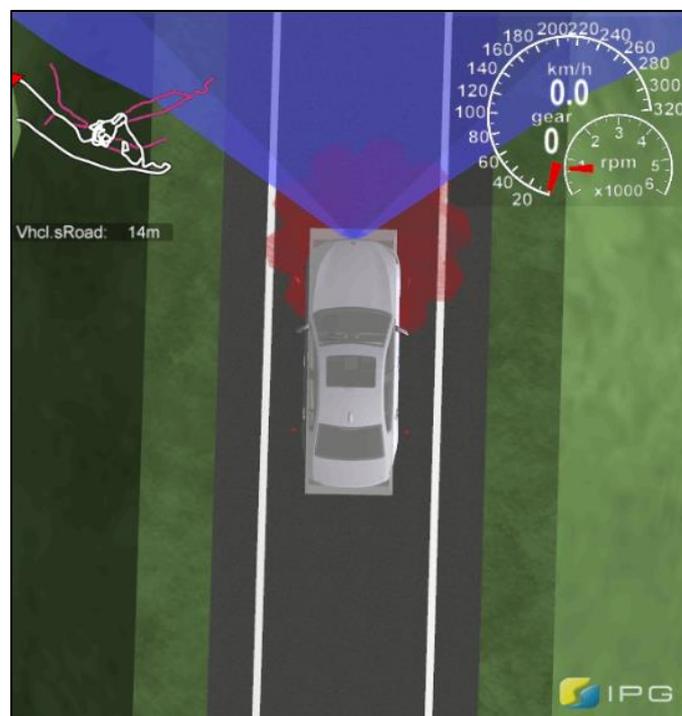


***Fig. 4-19: Rischio per immissione in carreggiata***

La classificazione emersa consente di affermare che la funzionalità AEB testata riesce ad evitare la totalità delle collisioni per tamponamenti, ossia per impatti longitudinali, in quanto si verificano e si registrano delle situazioni di rischio per tamponamento, ma non si registra alcun caso di collisione per tamponamento.

Ci sono, invece, delle criticità su scenari differenti da quelli costituiti da un lead vehicle posto in direzione frontale rispetto all'ego vehicle, ossia per tutte le situazioni di impatto laterale, cut in, immissioni in carreggiata o rotatorie.

Questo risultato è, però, in linea con la direzione che i produttori di auto stanno seguendo per il futuro sviluppo di funzionalità ADAS, che è quella di munire il veicolo di più sensori radar e camere ed effettuare una “fusion” tra le informazioni rilevate da ognuno di questi elementi. Infatti, nel case study considerato, il veicolo è stato munito di un solo sensore Radar posto nella mezzeria della parte anteriore dello stesso. Una tale configurazione, così come evidenziato dalla metodologia proposta in tale attività di ricerca, riesce a soddisfare i requisiti di attivazione della funzionalità per impatti longitudinali per tamponamento, ma non riesce a rilevare in maniera adeguata degli oggetti che possono comparire lateralmente, in quanto il field of view (FOV) del Radar riesce a coprire solo una parte della visuale laterale esposta al contatto con un altro veicolo (vedi Fig. 4.20).



*Fig. 4-20: FOV del Radar object simulato (in blu)*

## Conclusioni e Sviluppi Futuri

La metodologia proposta rappresenta una piattaforma di test per sistemi ADAS in ambiente virtuale che permette di validare una qualsiasi funzionalità per milioni di km, andando a rilevare in maniera automatica le possibili anomalie durante i cicli di simulazione mediante l'attivazione dei Flag che sono stati ideati sulla base di misure surrogate di sicurezza e sulle tecniche dei conflitti di traffico.

Quando uno di questi flag è attivo, il data logging è abilitato e sarà quindi possibile, attraverso questa metodologia, analizzare eventuali anomalie durante la fase di post-processing, riducendo sensibilmente il flusso di dati da registrare in simulazioni continue di milioni di km.

I flag legati ai parametri surrogati di sicurezza sono più significativi della collisione, poiché permettono di analizzare dei tratti di simulazione in cui c'è il rischio collisione o comunque in cui si presenta un evento critico. Mediante l'analisi di tali tratti, così come ad esempio è stato fatto con lo script di post-processing sviluppato per il 2° case study, si può ottimizzare la logica di controllo under test cercando di ridurre il più possibile il numero di eventi critici, ossia di attivazione di flag.

Tale metodologia è versatile e può essere quindi adattata ad una qualunque architettura di testing MIL, HIL, o VIL poiché l'elemento cardine che funge da "controllore" è stato realizzato mediante Matlab/Simulink ed è, pertanto, applicabile sulla maggior parte dei software MIL ed hardware HIL a disposizione a livello commerciale. E' anche possibile "buildare" questo sistema di controllo su una vera e propria ECU o hardware portatile per montarla a bordo veicolo ed effettuare delle rilevazioni real-time direttamente su un sistema vehicle in the loop.

Il secondo case study considerato nella validazione e testing della metodologia ha messo in evidenza le potenzialità del metodo introdotto, poiché ha messo alla luce delle criticità della funzionalità AEB testata nel momento in cui questa si basa su un solo sensore Radar per la rilevazione degli oggetti di traffico. Seguendo gli aggiornamenti e sviluppi dei sistemi ADAS, si potrà simulare sul veicolo la presenza anche di Radar laterali e attraverso la stessa metodologia si potranno verificare le migliorie e i progressi associati.

Ulteriori case studies possono essere presi in considerazione per validare ulteriormente la metodologia e per effettuare un'analisi statistica per provare a trarre informazioni sulle correlazioni delle cause di collisioni (es. range di velocità critici, curvatura strada, numero di corsie).

L'attualità del tema di ricerca trattato si può ricercare nella nuova normativa che andrà in vigore per la regolazione dei sistemi di sicurezza attiva, i quali dovranno a breve termine equipaggiare gli autoveicoli di nuova progettazione. Tale normativa si

rifà al Regolamento europeo 2019/2144, denominato “General Safety Regulation” (GSR).

Seguendo i dettami di tale normativa, il 6 luglio 2022 sarà cruciale per la sicurezza sulle nostre strade: tutti gli autoveicoli di nuova omologazione a partire da quella data dovranno essere equipaggiati con una serie di dispositivi di ausilio attivo alla guida e di protezione attiva di nuova generazione che riguarderanno non soltanto conducenti e passeggeri, ma anche le categorie di utenti indicate come “vulnerabili”, ovvero ciclisti e pedoni. Il successivo step avverrà nel 2024, anno nel quale tutti gli autoveicoli di nuova produzione (dunque anche quelli omologati precedentemente al 2022) ne saranno provvisti.

La metodologia proposta si adatta bene anche in ottica di testing della funzionalità ADAS all’interno di una infrastruttura di rete dotata di sistemi di trasporto intelligenti cooperativi (cooperative intelligent transport systems, C-ITS).

Infatti, affinché il veicolo veramente autonomo possa guidare senza l'intervento umano, dati di tutti i tipi devono essere condivisi continuamente e in tempo reale con altri veicoli e con l'infrastruttura circostante. Ciò accadrà utilizzando i sistemi di comunicazione da veicolo-tutto (V2X). Le applicazioni V2X possono condividere e coordinare le informazioni per estendere la portata effettiva di ADAS fino a diversi chilometri.

Considerando quindi veicolo-infrastruttura un unico ente, i Flag potrebbero essere collegati ad informazioni provenienti dall’ambiente circostante (ad es. da OBU che ricevono a loro volta informazioni da RSU), in modo tale da andare a verificare il comportamento del veicolo nel momento in cui viene scambiata un’informazione potenzialmente pericolosa (es. alert di prossimità incidente, oppure alert di condizioni stradali potenzialmente dannose).

Ciò rende la metodologia un ottimo trampolino di lancio anche per future applicazioni dove sarà importante andare a testare una determinata funzionalità ADAS non solo all’interno del contesto veicolare, ma anche all’interno dell’infrastruttura e della rete di trasporto pubblico, consentendo una calibrazione dei due ambienti.

Sarebbe interessante, in futuro, provare in tal senso a realizzare una applicazione della metodologia includendo elementi quali OBU e RSU, testando un sistema C-ITS e la compatibilità tra l’infrastruttura e il veicolo.

## Bibliografia

- [1] Automotive Presentation, Infineon, 2016.
- [2] European Road Safety Observatory, «Advanced Driver Assistance System,» 2016.
- [3] «Che cosa sono gli “Adas” e perché i sistemi di assistenza avanzata alla guida ci salveranno la vita,» La Stampa, 01 05 2018. [Online]. Available: <http://www.lastampa.it/2018/05/01/motori/che-cosa-sono-gli-adas-e-perch-i-sistemi-di-assistenza-avanzata-alla-guida-ci-salveranno-la-vita-cY6QInGNjgSFZo0QInoahK/pagina.html>.
- [4] V. d. Automobilindustrie, «Automation: From Driver Assistance Systems to Automated Driving,» 2015.
- [5] «CAR OEMS TARGET 2021 FOR ROLLOUT OF SAE LEVELS 4 AND 5 OF AUTONOMOUS DRIVING,» 11 2016. [Online]. Available: <https://jahoffmann.com/2016/11/28/car-oems-target-2021-for-rollout-of-sae-levels-4-and-5-of-autonomous-driving/>.
- [6] ABI Research, «Car OEMs Target 2021 for Rollout of SAE Levels 4 and 5 of Autonomous Driving,» 17 11 2016.
- [7] C. H. Ph.D, «Future developments of ADAS systems,» 2016.
- [8] Maria S.Greco, IEEE Radar Conference, «Automotive Radar,» 2012.
- [9] «What is driving the automotive LiDAR and RADAR market?,» 25 07 2017. [Online]. Available: <https://automotive.electronicsspecifier.com/sensors/what-is-driving-the-automotive-lidar-and-radar-market>.
- [10] L. Inc, «The Automotive LiDAR Magazine,» 2017.
- [11] Portland State University, «Light Detection and Ranging (LiDAR)».
- [12] S. Technologies, «Automotive Cameras for Safety and Convenience Applications,» 2017.
- [13] M. A. B. H. M. G. a. I. G. H. N. I. Kareem Abdelgawad, «A Scalable Framework for Advanced Driver Assistance Systems Simulation,» 2014.
- [14] A. Laurent Raffaëlli and Frédérique Vallée, I.-A. Guy Fayolle, E. Philippe De Souza, I. Xavier Rouah, M. Matthieu Pfeiffer, P. Stéphane Géronimi, T. Frédéric Pétrot e V. Samia Ahiad, «Facing ADAS validation complexity with usage oriented testing,» 2016.

- [15] Capgemini, «Verification and Validation Strategy for Smart Connected Vehicles,» 2019.
- [16] A. E. G. H. M. F. B. R. Demin Nalic, «Development of a Co-Simulation Framework for Systematic Generation of Scenarios for Testing and Validation of Automated Driving Systems,» in *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, Auckland (NZ), 2019.
- [17] S. R. Perkins, Traffic conflict characteristics-accident potential at intersections, 1968.
- [18] F. e. H. Amundsen, in *Atti del Primo Workshop sul Traffic Conflct*, Oslo, Norway, 1977.
- [19] C. HYDEN, «THE DEVELOPMENT OF A METHOD FOR TRAFFIC SAFETY EVALUATION: THE SWEDISH TRAFFIC CONFLICTS TECHNIQUE,» Sweden, 1987.
- [20] D. C. P. A. S. M. R. C. M. John Darzentas, «Simulation of road traffic conflicts at T-junctions,» *Transactions of The Society for Modeling and Simulation International*, 1980.
- [21] K. Vogel, «A comparison of headway and time to collision as safety indicators,» in *Accident Analysis and Prevention*, 2003.
- [22] J. Hayward, «Near misses as a measure of safety at urban intersections,» 1971. [Online]. Available: [https://scholar.google.it/scholar?hl=it&as\\_sdt=0%2C5&q=near+misses+as+a%0A+measure+of+safety+at+urban+intersections%2C&btnG=%22](https://scholar.google.it/scholar?hl=it&as_sdt=0%2C5&q=near+misses+as+a%0A+measure+of+safety+at+urban+intersections%2C&btnG=%22).
- [23] M. e. a. Saffarzadeh, «A general formulation for time-to-collision safety indicator,» *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport*, 2013.
- [24] A. R. A. e. a. Van Der Horst, «Traffic conflicts on bicycle paths: A systematic observation of behaviour from video,» *Accident Analysis and Prevention*, 2014.
- [25] AASHTO, «A Policy on Geometric Design of Highways and Streets,» *American Association of State Highway and Transportation Officials*, 2004.
- [26] T. E. NCAP, AEB systems, Version 2.0.1, 2017.