

*Università degli Studi di Modena e  
Reggio Emilia*

---

Dipartimento di Ingegneria “Enzo Ferrari”

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Informatica

**Protocollo IEEE 802.11p e  
controllo di congestione  
decentralizzato DCC**

Relatore:  
Prof. Carlo Augusto Grazia

Candidato:  
Luca Eugenio Corrado

---

Anno Accademico 2021-2022



# Indice

<b>Introduzione</b> .....	<b>1</b>
<b>Protocollo IEEE 802.11p</b> .....	<b>3</b>
<b>1.1 Standard IEEE 802.11 Network Access</b> .....	<b>3</b>
1.1.1 Distributed Coordination Function (DCF) .....	3
<b>1.2 IEEE 802.11p Access</b> .....	<b>5</b>
1.2.1 Hybrid Coordination Function (HCF).....	5
1.2.2 HCF Controlled Channel Access (HCCA) .....	5
1.2.3 Enhanced Distributed Channel Access (EDCA).....	5
<b>1.3 IEEE 802.11p: ETSI ITS G5</b> .....	<b>7</b>
1.3.1 Architettura ETSI DCC .....	8
<b>1.4 Broadcast e Flooding</b> .....	<b>10</b>
1.4.1 Broadcast Suppression .....	11
<b>Approccio Reattivo del protocollo DCC: DCC in ETSI TS 102 687 V1.1.1</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1 Approccio Reattivo DCC</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2 Studio del DCC in ETSI TS 102 687 V1.1.1</b> .....	<b>14</b>
2.2.1 Motivazioni ed obiettivi dello studio .....	14
2.2.2 Valutazione delle prestazioni e metriche di prestazione .....	15
2.2.3 Risultati dello studio effettuato .....	17
2.2.4 Maggiori dettagli sui meccanismi DCC .....	22
2.2.5 Conclusione dello studio e risultati finali.....	25
<b>Metriche CBR per il controllo decentralizzato della congestione nei VANETs</b> .....	<b>26</b>
<b>3.1 Introduzione alle metriche CBR</b> .....	<b>26</b>
<b>3.2 DCC v1.1.2</b> .....	<b>28</b>
3.2.1 Misurazione del Channel Busy Ratio (CBR) .....	28
3.2.2 Motivazioni ed obiettivi dello studio sul CBR.....	29
3.2.3 La correlazione: premesse sulle metriche di performance .....	29
3.2.4 Calcolo della correlazione negli scenari simulati.....	31
3.2.5 Risultati della simulazione .....	32
3.2.6 Conclusione dello studio sulle metriche CBR .....	36
<b>Approccio Adattivo del protocollo DCC e algoritmi correlati</b> .....	<b>37</b>
<b>4.1 Approccio Adattivo DCC</b> .....	<b>37</b>
<b>4.2 Algoritmo LIMERIC</b> .....	<b>37</b>
<b>4.3 Approccio Adattivo ETSI: ETSI TS 102 687 V1.2.1</b> .....	<b>39</b>
<b>4.4 DUAL-<math>\alpha</math> DCC</b> .....	<b>41</b>

<b>4.5 Metriche di prestazione per lo studio .....</b>	<b>42</b>
<b>4.6 Modelli di simulazione e risultati dello studio .....</b>	<b>43</b>
4.6.1 Primo modello: scenario stazionario .....	43
4.6.2 Secondo modello: primo scenario transitorio .....	48
4.6.3 Terzo modello: secondo scenario transitorio .....	50
<b><i>Conclusione</i>.....</b>	<b>53</b>
<b><i>Bibliografia</i> .....</b>	<b>54</b>

## *Introduzione*

IEEE 802.11, in informatica e nelle telecomunicazioni, definisce un insieme di standard di trasmissione per reti WLAN, sviluppato dal gruppo 11 dell'IEEE 802 sotto forma di varie release, specificando sia l'interfaccia tra client e base station (o access point) sia le specifiche tra client wireless.

IEEE 802.11p è un emendamento approvato per l'IEEE 802.11, un insieme di standard di trasmissione per reti WLAN, con l'obiettivo di aggiungere l'accesso wireless in ambienti veicolari.

Definisce quindi i miglioramenti a 802.11 (la base dei prodotti commercializzati come Wi-Fi) necessari per supportare le applicazioni dei sistemi di trasporto intelligenti (ITS).

Ciò include lo scambio di dati tra veicoli ad alta velocità e tra i veicoli e l'infrastruttura stradale, la cosiddetta comunicazione V2X (Vehicle-to-everything) cioè un sistema di comunicazione di informazioni tra un veicolo e una qualsiasi entità che possa influenzare il veicolo stesso e viceversa, nella banda ITS autorizzata di 5,9 GHz (5,85–5,925 GHz).

È anche la base di uno standard europeo per la comunicazione veicolare noto come ETSI ITS-G5.

La maggior parte delle applicazioni emergenti per la sicurezza stradale e la gestione del traffico si basano sul frequente scambio di messaggi di sensibilizzazione tra i veicoli.

Sfortunatamente, il protocollo 802.11 si comporta male in scenari congestionati e non può garantire le esigenze di affidabilità e tempestività nella trasmissione dei messaggi, portando ad un grave calo del livello di sicurezza.

Nel campo delle reti veicolari sono state adottate strategie per evitare la congestione della rete.

Lo stack del protocollo ETSI ITS-G5 considera l'uso di meccanismi di controllo decentralizzato della congestione (DCC), che si applicano su più livelli per evitare la congestione della rete veicolare.

Diversi meccanismi di controllo decentralizzato della congestione (DCC) sono stati proposti e standardizzati per le reti veicolari, al fine di mantenere la stabilità della rete e l'equa allocazione delle risorse per soddisfare i requisiti della rete stessa.

La relazione si divide in quattro capitoli che sono:

- **Capitolo 1:** “Protocollo IEEE 802.11p”
- **Capitolo 2:** “Approccio Reattivo del protocollo DCC:  
DCC in ETSI ITS 192 687 V1.1.1”
- **Capitolo 3:** “Metriche CBR per il controllo decentralizzato della  
congestione nei VANETs”
- **Capitolo 4:** “Approccio Adattivo del protocollo DCC e algoritmi  
correlati”

Il primo capitolo prevede un’analisi del meccanismo d’accesso al canale di comunicazione nel protocollo standard IEEE 802.11.

Viene descritta DCF, la modalità standard per accedere al canale.

Si passa poi alla presentazione del protocollo IEEE 802.11p, un insieme di standard di trasmissione per reti WLAN, con l’obiettivo di aggiungere l’accesso wireless in ambienti veicolari. Vengono presentati HCF, HCCA ed EDCA.

Lo studio si concentra poi sui layers più in alto nello stack, focalizzandosi sullo stack del protocollo ETSI ITS G5 nel quale si considererà l’uso di meccanismi di controllo decentralizzato della congestione (DCC) per evitare la congestione della rete veicolare.

Il secondo capitolo analizza l’approccio reattivo ETSI DCC che consente il controllo dei parametri combinati tra di loro.

A tal proposito viene presentato lo studio del DCC in ETSI ITS V1.1.1 in cui è valutata l’efficacia e la stabilità delle tecniche analizzate, nonché possibili miglioramenti alle politiche DCC specificate.

Nel terzo capitolo viene analizzata la dinamica del CBR (“Channel Busy Ratio”), la metrica alla base dello standard di controllo decentralizzato della congestione (DCC), che restituisce il rapporto quando il canale è stato segnalato come occupato dal livello di accesso in un dato intervallo di tempo.

Verrà presentata una nuova versione che terrà conto di tutto ciò: DCC v1.1.2.

Infine, nel quarto e ultimo capitolo, lo studio si concentra sull’approccio adattivo DCC, cioè sistemi di controllo lineari in cui la variabile di processo è la velocità di trasmissione, e sugli algoritmi correlati.

L’analisi in questo caso prevede tre differenti modelli di simulazione, ciascuno analizzato nel dettaglio.

# Capitolo 1

## Protocollo IEEE 802.11p

### 1.1 Standard IEEE 802.11 Network Access

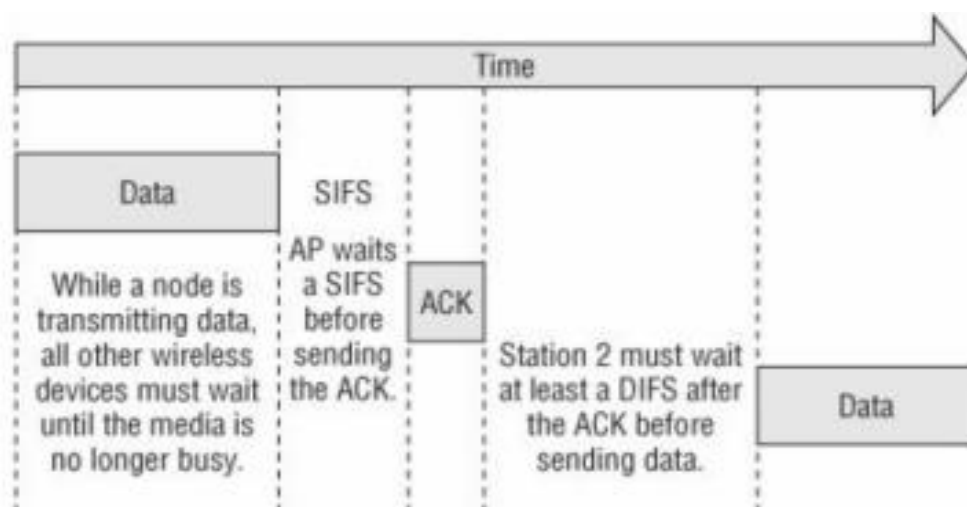
#### 1.1.1 Distributed Coordination Function (DCF)

“Distribueted Coordination Function” (DCF) è la modalità standard con cui i wifi hanno accesso al canale di comunicazione (simile al CSMA/condition avoidance per internet). Non appena un nodo inizia a mandare dati, nessun altro può far riferimento al bus, cioè gli altri dispositivi wireless devono attendere finchè il canale non risulta essere più occupato.

Una volta che una stazione finisce di scrivere sul collegamento wireless i suoi dati, c'è uno "Short Inter Friends State" (SIFS) in cui l'access point (AC) attende prima di mandare un ACK.

Dopo l'ACK, la seconda stazione deve attendere nel "Distribueted Inter Friend Space" (DIFS), una porzione di tempo distribuita tra i nodi, prima di mandare i dati.

E' necessario che  $SIFS < DIFS$ , in quanto, se rispettato, si potrà provare a trasmettere, se non a trasmettere a tutti gli effetti.



In realtà, se il canale risulta essere ancora occupato, non è sufficiente attendere nel DIFS, ma bisogna considerare DIFS + backoff in modo da essere sicuri di non accedere simultaneamente al canale.

Questo backoff è sempre usato quando:

- 1) Qualcuno vuole trasmettere ma il canale risulta essere ancora occupato
- 2) Una coda con priorità maggiore è pronta a trasmettere
- 3) Non ho la presenza di ACK
- 4) Una trasmissione è effettuata con successo

Il backoff rappresenta un valore random nell'intervallo  $[0, CW]$ , con CW che sta ad indicare la congestion window.

Allora, chiaramente, minore sarà CW e minore sarà l'intervallo temporale che dovrò attendere (il valore della CW può variare facilmente, dipende dall'algoritmo che c'è dietro).

Il canale sarà inattivo, per uno slot temporale, nel periodo di contesa in cui posso decrementare di un valore la CW riducendo quindi l'intervallo, specialmente se ho problemi di congestione.

DCF, nonostante sia il meccanismo ideale per condividere il canale tra più stazioni, presenta diverse limitazioni:

- 1) Non c'è controllo di congestione, quindi possono esserci problemi di collisione.
- 2) Multiple collisioni possono causare la limitazione della banda portando a seri problemi di trasmissione.
- 3) Non è garantita alcuna "Quality of Service" (QoS), cioè non esiste alcun modo per prioritizzare i flussi di traffico poiché non c'è alcun modo per distinguerli.

Esiste perciò un'altra soluzione, chiamata "Point Coordination Function" (PCF), che può essere utilizzata solamente con una infrastruttura (non il caso di 802.11p), in cui la connessione è gestita da un access point ed è inclusa la QoS.

Poiché quest'ultima non può essere utilizzata (non è adatta per 802.11p), è necessario includere la QoS direttamente nella "Coordination Function" (CF).



## **1.2 IEEE 802.11p Access**

### **1.2.1 Hybrid Coordination Function (HCF)**

Si parla perciò di “Hybrid Coordination Function” (HCF).

Questa include 802.11e, cioè ciò che definisce QoS per le wireless LAN applications attraverso varie modifiche al MAC LAYER.

Esso prevede quattro differenti "Access Category" (AC) con priorità decrescente: AC\_VO, AC\_VI, AC\_BE, AC\_BK, rispettivamente introdotte per gestire applicazioni VoIP (o real-time), video, best effort e traffico di background.

A ciascuna di queste AC, nei nodi della WLAN, viene associata una coda di pacchetti dedicata, da servire in base alla priorità della AC di appartenenza.

La differenziazione del servizio offerto a ciascuna AC viene gestita, perciò, per mezzo di un nuovo protocollo di accesso multiplo denominato appunto "Hybrid Coordination Function" (HCF).

Quest'ultimo si basa su due meccanismi distinti e complementari, denominati rispettivamente: “Enhanced Distributed Channel Access” (EDCA) e “HCF Controlled Channel Access (HCCA).

HCF definisce delle “Traffic Categories” (TC) che permettono quindi l'introduzione della prioritizzazione (alcune categorie di traffico avranno quindi priorità maggiore).

### **1.2.2 HCF Controlled Channel Access (HCCA)**

HCCA è un meccanismo basato sulla mediazione di un coordinatore centralizzato definito “Hybrid Coordinator” (HC).

Esso può interrogare i dispositivi della WLAN garantendo ad essi (per intervalli di durata limitata) accesso al canale privo di collisioni.

In questo modo, risulta più semplice garantire limiti prestazionali sul ritardo di consegna dei pacchetti.

### **1.2.3 Enhanced Distributed Channel Access (EDCA)**

EDCA è una semplice variante della "Distributed Coordination Function" ed implementa un algoritmo di accesso multiplo di tipo CSMA/CA parametrizzato ad hoc per ciascuna AC.

In particolare, per ciascuna delle quattro AC sono definiti in maniera differenziata i parametri del relativo algoritmo di accesso multiplo CSMA/CA in modo che il servizio risultante sia in linea con la graduazione delle priorità previste nello standard.

I parametri soggetti a differenziazione sono l'ampiezza della Contention Window e gli Inter-Frame Space, i quali influenzano i tempi di attesa medi di accesso al canale condiviso.

Quindi le AC a priorità più elevata utilizzeranno Contention Window e Inter-Frame Space più piccoli.

EDCA fornisce accesso al canale senza contese per un periodo chiamato "Transmit Opportunity" (TXOP).

Questo è un intervallo di tempo limitato durante il quale una stazione può inviare più frames possibili (posso considerare il canale mio e inviare pacchetti a burst).

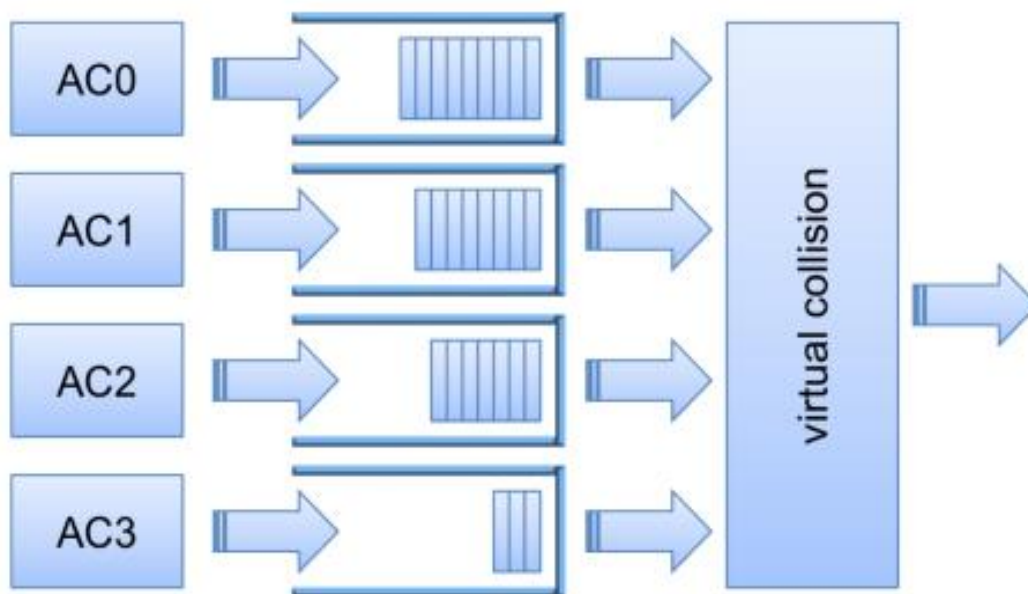
Durante un TXOP una stazione non ha bisogno di utilizzare lo standard EDCA per accedere al canale.

Questo meccanismo è utilizzato per ridurre l'overhead del canale e incrementare il throughput.

In EDCA quindi i dati sono classificati in 4 categorie d'accesso: da AC0 (priorità più bassa) a AC3 (priorità più alta).

Infatti a ciascuna di queste AC, nei nodi della WLAN, viene associata una coda di pacchetti dedicata, da servire in base alla priorità della AC di appartenenza.

Ogni AC presenta, quindi, valori differenti per CW (finestre di contesa), AIFS e TXOP.



## 1.3 IEEE 802.11p: ETSI ITS G5

Dopo aver visto il modo di accedere al canale 11p, è possibile valutare i layers più in alto nello stack.

Questo stack relativo ad un contesto veicolare nasce in modi differenti a seconda se siamo in USA o in Europa.

Si farà sempre riferimento allo stack ETSI, considerato anche come stack standard.

Lo stack del protocollo ETSI ITS-G5 considera l'uso di meccanismi di controllo decentralizzato della congestione (DCC) che si applicano su più livelli per evitare la congestione della rete veicolare, dal momento che il protocollo 802.11 si comporta male in scenari congestionati e non può garantire le esigenze di affidabilità e tempestività nella trasmissione dei messaggi.

DCC sta a significare che si vuole applicare il controllo di congestione in un modo completamente decentralizzato, ovvero tutti i nodi devono garantire il loro personale contributo.

La maggior parte dei meccanismi DCC derivano dall'idea che c'è alla base del concetto di controllo della congestione in una rete: la modulazione del traffico che entra nella rete. Questa modulazione può essere ottenuta attraverso diversi modi, come il controllo del numero di messaggi che un veicolo può inviare, la potenza di trasmissione utilizzata per inviare messaggi e la velocità di trasmissione dei dati del canale.

Dal punto di vista dei messaggi, lo stack ETSI permette di codificare specifiche tipologie di messaggi.

Si considerano solo due tipologie di messaggio: CAM (Cooperative Awareness Message) e DENM (Decentralized Environmental Notification Message).

I messaggi CAM, molto piccoli, in genere minori di 1500 byte, sono usati per informazioni periodiche legate alla sicurezza (sono infatti messaggi di sicurezza) e includono informazioni sullo stato dei veicoli quali velocità, locazione, GPS (se attivo).

Diverse applicazioni di sicurezza sono legate a messaggi CAM quali ingorgo stradale, incidenti stradali e gestione degli incroci.

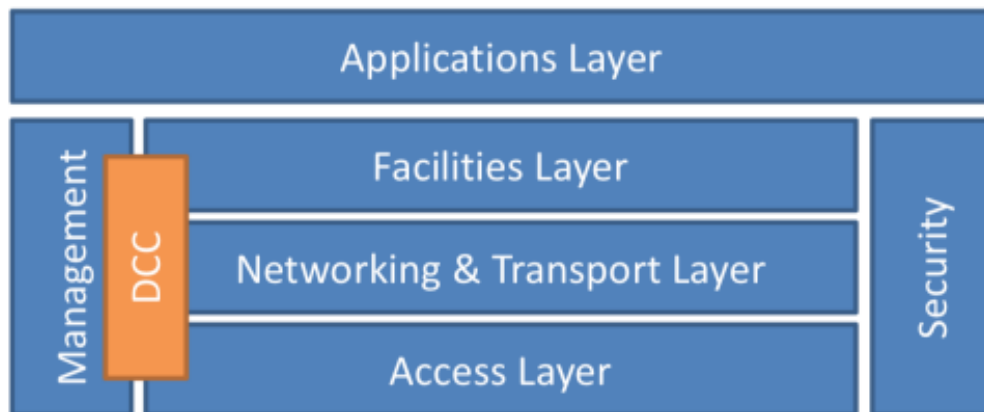
Questi messaggi possono inoltre essere generati da variazioni d'angolo durante il movimento, variazione di posizione (5m), variazione di velocità (1 m/s).

I messaggi DENM non sono periodici bensì sono legati agli eventi, cioè a specifiche situazioni quali, ad esempio, brusche frenate, incidenti, collisioni imminenti, problemi di visibilità ecc.

Questi messaggi non sono legati al concetto di sicurezza ma, appunto, alle diverse situazioni che possono verificarsi.

### 1.3.1 Architettura ETSI DCC

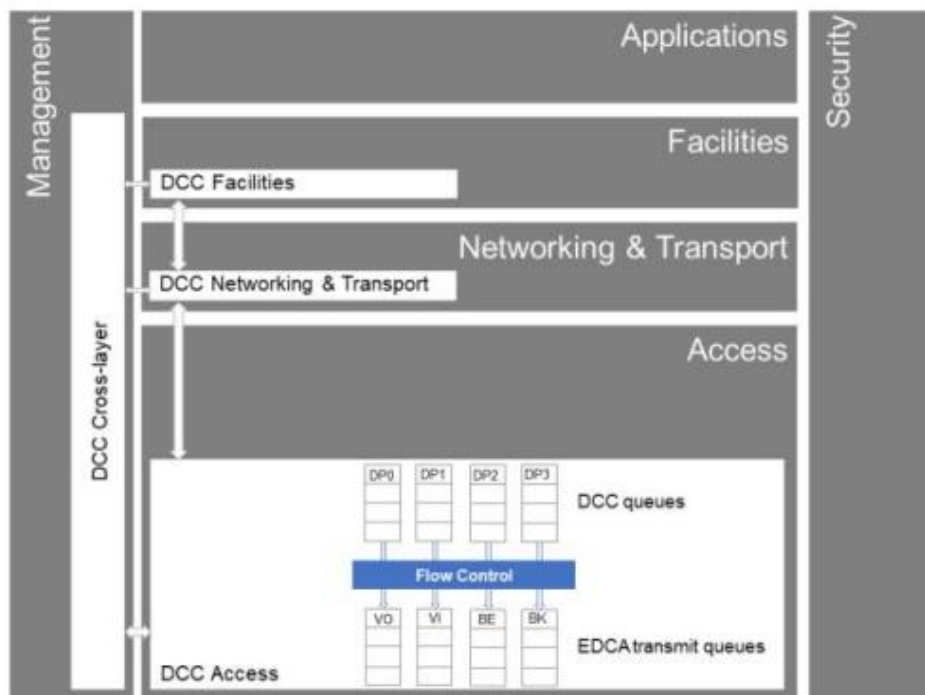
L'architettura ETSI DCC è costituita da componenti che si trovano su livelli diversi all'interno dello stack del protocollo di rete veicolare ETSI quali Access Layer, Networking & Transport Layer, Facilities Layer, Management.



A seconda dei diversi livelli dello stack del protocollo ETSI, è possibile definire le seguenti componenti:

- 1) DCC-Access [2], agisce sui parametri dei livelli MAC e PHY;
- 2) DCC-Net [5], logicamente a livello di rete e di trasporto, è in fase di studio con l'obiettivo di mappare classi di traffico di messaggi CAM ai profili DCC;
- 3) DCC-Facility [6], agirà sulla generazione e sui profili CAM e DENM;
- 4) DCC-Management, avrà lo scopo di interagire tra le diverse entità DCC specifiche di ciascun livello e di gestire tutte le funzionalità DCC in modo da arrivare a un quadro trasversale stabile ed efficace.

Un certo numero di servizi nel Layer Facility, come il servizio di base “Cooperative Awareness” [1], adattano la frequenza di generazione dei messaggi in base alla tariffa loro assegnata da DCC, mentre altri come il servizio di base di “Notifica Ambientale Decentralizzata” non considerano DCC quando generano loro messaggi (messaggi DENM) per la natura del servizio stesso.



La figura in alto mostra le interazioni tra i componenti del meccanismo DCC nei diversi livelli del protocollo ETSI.

Il componente DCC Access, l'unico che è stato definito [2], rileva il "Channel Busy Ratio" (CBR) a cui reagiscono o si adattano i meccanismi di congestione.

Sono stati standardizzati i seguenti meccanismi:

- TPC (Transmit power control), che adatta la potenza di trasmissione
- TRC (Transmit rate control), che adatta l'intervallo tra i pacchetti trasmessi
- TDC (Transmit datarate control), che adatta la velocità di trasmissione dei dati a pacchetto
- DSC (DCC sensivity control) che fornisce un'indicazione dell'occupazione del canale durante la ricezione di pacchetti
- TAC (Transmit access control) che apre e chiude dinamicamente l'accesso dei pacchetti con una data priorità alla relativa coda di trasmissione.

I messaggi generati dai servizi al livello facilities sono assegnati a profili di dati (DP) con quattro diverse priorità: da DP0 a DP3, con DP0 che ha la massima priorità (ad esempio i messaggi DENM e CAM corrispondono rispettivamente ai profili di dati DP0 e DP2).

Questi messaggi scendono nello stack protocollare fin a quando non arrivano al livello di accesso dove il meccanismo di controllo del flusso limita la velocità con cui vengono inviati alle code di trasmissione EDCA (Enhanced Distribution Coordination Access).

Le code di trasmissione EDCA fanno parte del meccanismo di controllo dell'accesso medio [9] utilizzato dallo stack del protocollo ETSI.

I pacchetti in attesa al livello di accesso, a causa della limitazione della velocità del meccanismo DCC, vengono archiviati in code in base al loro profilo (code DP).

Quando il meccanismo DCC consente di inviare un pacchetto alle code EDCA, il pacchetto inviato è il primo nella coda DP con priorità più alta.

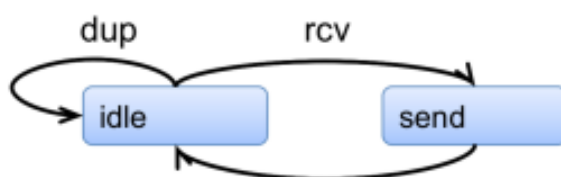
I profili dati DP0, DP1, DP2 e DP3 sono mappati rispettivamente alle categorie voce, video, best effort e accesso in background (AC).

Queste AC (Access Categories) hanno proprietà diverse per fornire la qualità del servizio, con periodi di arbitrato Inter-Frame Space (AIFS) più brevi per i messaggi con priorità più elevate.

Questa architettura DCC è utilizzata dai due approcci standardizzati per il controllo della congestione ETSI: reattivo e adattivo.

## 1.4 Broadcast e Flooding

Nel contesto broadcast è strettamente necessario evitare il flooding, cioè quella modalità di instradamento utilizzata dai router che prevede l'inoltro di un pacchetto in ingresso su tutte le linee ad eccezione di quella da cui proviene, perché, se si vuole raggiungere un nodo ad una certa distanza, bisogna indicare a tutti i nodi di mandare nuovamente i pacchetti, cioè effettuare il "ri-broadcast" di un messaggio per raggiungere quel nodo.



Ciò che è quindi possibile per un nodo è essere nello stato "idle" (inattivo) o nello stato "send" (attivo, capace di inviare messaggi).

Come si può passare da uno stato all'altro?

Se un nodo generico riceve un nuovo messaggio (quindi una nuova informazione), è importante ritrasmetterlo per garantire il flusso di nuove informazioni tra gli altri nodi e, una volta effettuato ciò, è possibile tornare nello stato idle.

Se viene ricevuto un messaggio duplicato, è obbligatorio restare nello stato idle.

Un problema che può presentarsi in questi casi riguarda la ritrasmissione illimitata (è possibile solo se c'è un numero di nodi illimitato che copre l'area di interesse) oppure la ritrasmissione che si propaga con un numero sempre maggiore di nodi.

Questo può causare interferenza, collisione e riduzione della contesa (impedisce un altro nodo di trasmettere nuove informazioni).

Il problema introdotto, tipico del contesto broadcast, può essere risolto attraverso due approcci differenti:

1) Approccio classico ("probabilistic flooding"): la ritrasmissione avviene solamente in base ad una precisa percentuale di probabilità.

Queste considerazioni sono più adatte per reti wireless che per reti veicolari.

2) VANET solution: Broadcast Suppression.

Con la considerazione del secondo approccio, non è necessario avere né informazioni sui nodi vicini, né messaggi di controllo (in generale non è necessario scambiare messaggi). Inoltre è massimizzata la distanza tra gli hop ed è minimizzata la perdita di pacchetti informativi.

Tutto ciò è possibile grazie a questo nuovo approccio, andando a stimare la distanza dal mittente ogni volta che si riceve un messaggio e, di conseguenza, andando a decidere ogni volta se eliminare il messaggio o se mandarlo in broadcast.

### 1.4.1 Broadcast Suppression

Regola generale: Alla ricezione di un pacchetto dal nodo  $i$ , il nodo  $j$  controlla l'ID del pacchetto e ritrasmette con probabilità  $P_{ij}$  se riceve il pacchetto per la prima volta; in caso contrario scarta il pacchetto.

Se un nodo è molto lontano, è improbabile che si vada a ritrasmettere il messaggio, di conseguenza, se i due nodi coprono la stessa area di interesse, con molta probabilità una metà sarà coperta da entrambi mentre un'altra no, proprio perché i due nodi risultano essere molto distanti tra di loro.

Viceversa, se i due nodi sono molto vicini tra loro, non è necessario la ritrasmissione visto che entrambi i nodi coprono la stessa identica area.

Quindi il valore della distanza dal mittente si basa su  $R$  ("radius"), cioè su quanta area medesima è coperta da entrambi i nodi.

Questa distanza può essere GPS (geografica) o RSS (fisica).

Nel primo caso, se la distanza è prossima a zero, non è necessaria la ritrasmissione.

Se invece la distanza è compresa tra 0 ed  $R$ , cioè tra zero e l'area di copertura, allora la ritrasmissione ha probabilità proporzionale alla distanza.

Negli altri casi (non dovrebbero esserci in realtà), la ritrasmissione del pacchetto è obbligatoria.

In termini matematici, sia  $D_{ij}$  la distanza geografica GPS tra i nodi  $i$  e  $j$ , allora:

$$p_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{if } D_{ij} < 0 \\ \frac{D_{ij}}{R}, & \text{if } 0 \leq D_{ij} < R \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Nel secondo caso, non c'è accesso al GPS quindi non c'è un valore assoluto preciso. Possono esserci due valori, max e min, che si basano sulle diverse situazioni possibili. Il broadcast si ha per un valore compreso tra min e max attraverso una formula precisa:

$$p_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{if } RSS_{ij} \geq RSS_{max} \\ \frac{RSS_{max} - RSS_{ij}}{RSS_{max} - RSS_{min}}, & \text{if } RSS_{min} \leq RSS_{ij} \leq RSS_{max} \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}$$

dove  $RSS_{ij}$  è l'RSS del pacchetto broadcast ricevuto al nodo j.

$RSS_{max}$  e  $RSS_{min}$  corrispondono al possibile valore massimo e minimo di RSS misurati nell'ambiente considerato.

Entrambi possono essere ottenuti sperimentalmente oppure applicando un modello di propagazione appropriato.

In conclusione, le considerazioni tra le due distanze GPS e RSS sono simili, cioè più un nodo è lontano, più è probabile che quel pacchetto debba essere ritrasmesso.



## Capitolo 2

### Approccio Reattivo del protocollo DCC: DCC IN ETSI TS 102 687 V1.1.1

#### 2.1 Approccio Reattivo DCC

L'approccio reattivo è un meccanismo DCC che è stato inizialmente definito in ETSI TS 102 687 V1.1.1 nel 2011 e aggiornato nel 2018 [4].

È un meccanismo DCC basato su una macchina a stati finiti (FSM) con tre stati principali: rilassato, attivo e restrittivo (in ordine crescente di congestione del canale), ciascuno con una soglia CBR (“Channel Busy Ratio”) per raggiungere uno stato vicino, dal momento che tutti gli stati possono essere raggiunti solamente da uno vicino.

Le diverse transizioni di stato sono guidate da condizioni di carico del canale (CL) misurate localmente da ciascun nodo durante un intervallo di campionamento.

Il CL è calcolato come la frazione di tempo durante la quale il segnale ricevuto è al di sopra della soglia CCA, cioè il canale viene rilevato come occupato.

MINCHANNELLOAD è il CL minimo al di sotto del quale il canale è praticamente libero e lo stato DCC sarà rilassato.

MAXCHANNELLOAD è il CL massimo al di sopra del quale il canale è considerato sovraccarico e lo stato DCC sarà restrittivo.



Come passare da uno stato all'altro?

Nello stato "Relaxed" l'unica cosa che bisogna fare è controllare il MINCHANNELLOAD nell'intervallo di 1 secondo.

Se nell'intervallo di 1 secondo, più del 50% del tempo qualcuno sta trasmettendo, lo stato non è completamente rilassato, quindi bisogna spostarsi nello stato "Active".

Se la congestione aumenta, cioè si supera nettamente la soglia del 50% o, più nel dettaglio,  $\geq 40\%$ , si passa nello stato "Restricted".

In entrambi i casi è possibile tornare indietro, nel primo caso se la soglia è minore del 15%, nel secondo caso se è minore del 40%, come descritto in figura nella pagina precedente.

Tutti i nodi seguono questo FSM, cioè tutti i nodi sono sensibili alla percentuale di tempo di ogni canale contemporaneamente.

Solo nello stato "Active" è possibile introdurre il concetto di "Quality of Service" (QoS), cioè è possibile distinguere i vari servizi e, di conseguenza, proteggere determinati flussi di traffico rispetto ad altri.

A seconda dello stato in cui mi trovo, ho diversi valori di default che limitano parametri come potenza di trasmissione o velocità di trasmissione.

L'approccio reattivo ETSI DCC consente il controllo sia di ciascun parametro individualmente sia dei parametri combinati tra di loro.

## **2.2 Studio del DCC in ETSI TS 102 687 V1.1.1**

### **2.2.1 Motivazioni ed obiettivi dello studio**

Nonostante i preziosi obiettivi delle tecniche DCC specificati dall'ETSI, finora solo pochi lavori ne hanno studiato le prestazioni.

Per un'analisi completa dell'insieme dei meccanismi DCC più adatti per applicazioni di sicurezza cooperativa, in questo lavoro, il focus è sulle tecniche TPC, DSC, TRC.

TABLE II  
DCC PARAMETERS

Scheme	Metric	RELAXED	ACTIVE	RESTRICTIVE
TPC	$P_t$	33 dBm	15 dBm	-10 dBm
DSC	$CSThresh$	-95 dBm	-85 dBm	-65 dBm
TRC	Packet interval	0.04s	0.5s	1s

Il TDC non è valutato perchè c'è un ampio consenso nel fissare 6 Mbps come velocità di trasmissione dei dati per i messaggi di sicurezza [3].

In questo studio vengono confrontati i singoli meccanismi DCC al fine di ottenere informazioni sull'impatto di ciascun parametro di trasmissione sulle prestazioni complessive. Per completezza viene valutato anche lo schema DCC dove TPC, TRC e DSC sono contemporaneamente attivi.

Tutti questi schemi vengono confrontati con la soluzione legacy in cui il livello MAC 802.11p non è dotato di meccanismi di controllo della congestione DCC.

Il confronto si basa su un insieme di metriche di performance specifiche per valutare l'efficacia e la stabilità delle tecniche analizzate.

Lo studio mira anche a fornire suggerimenti su possibili miglioramenti alle politiche e alle impostazioni DCC attualmente specificate.

### 2.2.2 Valutazione delle prestazioni e metriche di prestazione

I veicoli vengono posizionati casualmente in una griglia larga 750m di 6x6 strade a doppia corsia distanziate di 150m.

Sono sintonizzati sul CCH per scambiare CAM ogni 100ms.

Il traffico offerto varia modificando la dimensione del pacchetto (100 e 300 byte) e il numero di veicoli in griglia (300 e 600).

La finestra di contesa CW ha un'ampiezza pari a 15 in modo da garantire particolare attenzione a messaggi di sicurezza con priorità più elevata.

Le prestazioni DCC vengono valutate rispetto allo schema legacy attraverso le seguenti metriche:

- 1) Packet Delivery Ratio (PDR)
- 2) Update Delay
- 3) Channel Load Averaged, cioè il carico medio del canale su tutti i nodi durante la simulazione complessiva.

Il PDR tiene conto della raggiungibilità dei pacchetti ed è calcolata come la percentuale di nodi che ricevono un frame di dati ad una data distanza dal trasmettitore nell'intervallo 0-400m.

L'Update Delay, come proposto in [4], è definito come la differenza di tempo tra due ricezioni di CAMs consecutive dallo stesso trasmettitore.

Questo descrive l'aggiornamento sulle informazioni di stato dai veicoli circostanti in un "range di consapevolezza" (AR): maggiore è il ritardo di aggiornamento, più non è stata ricevuta alcuna CAM.

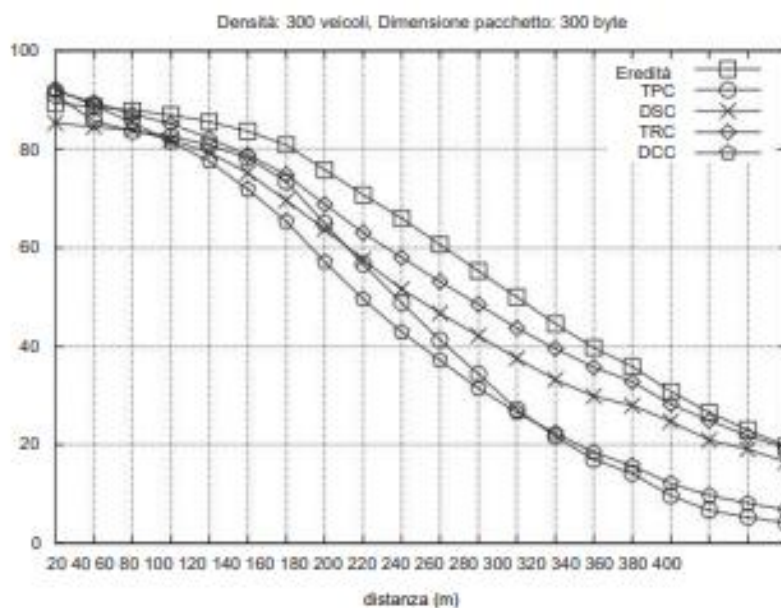
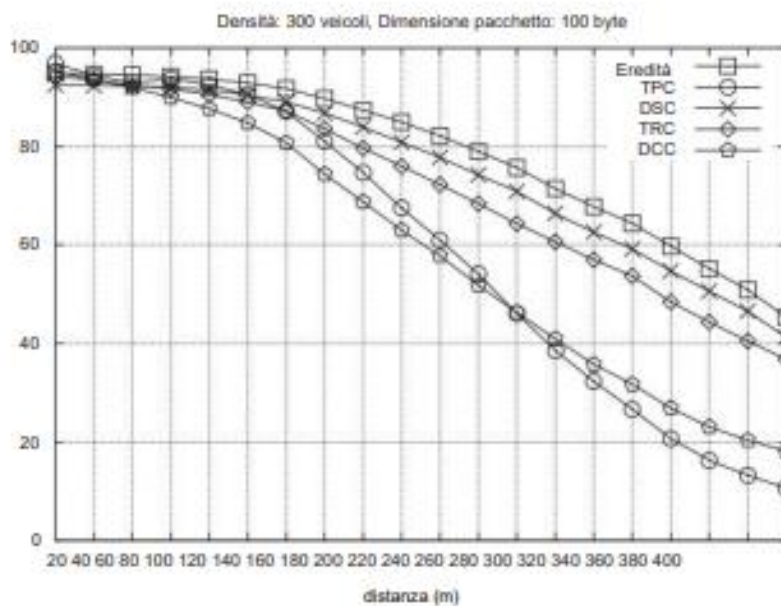
I risultati vengono mostrati per ritardi di aggiornamento (update delay) calcolati sui vicini in una gamma di 400m e 50m.

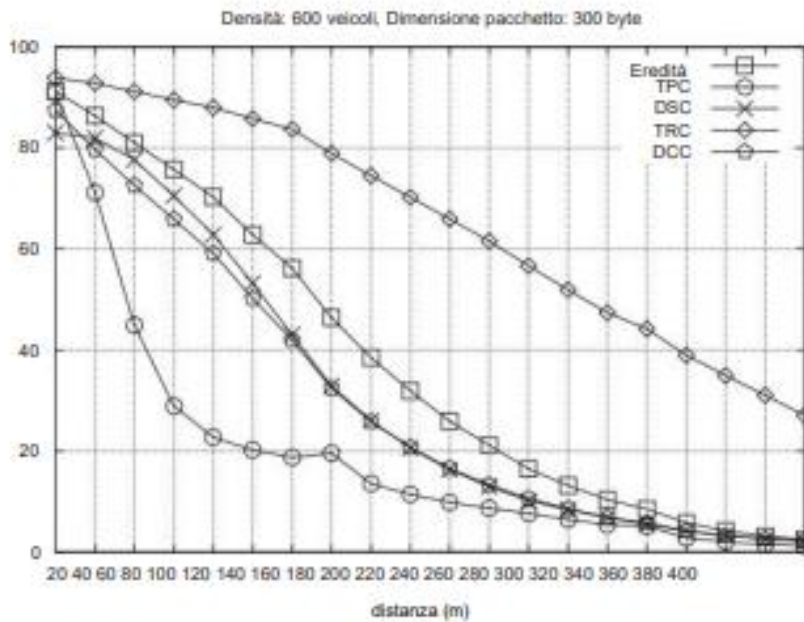
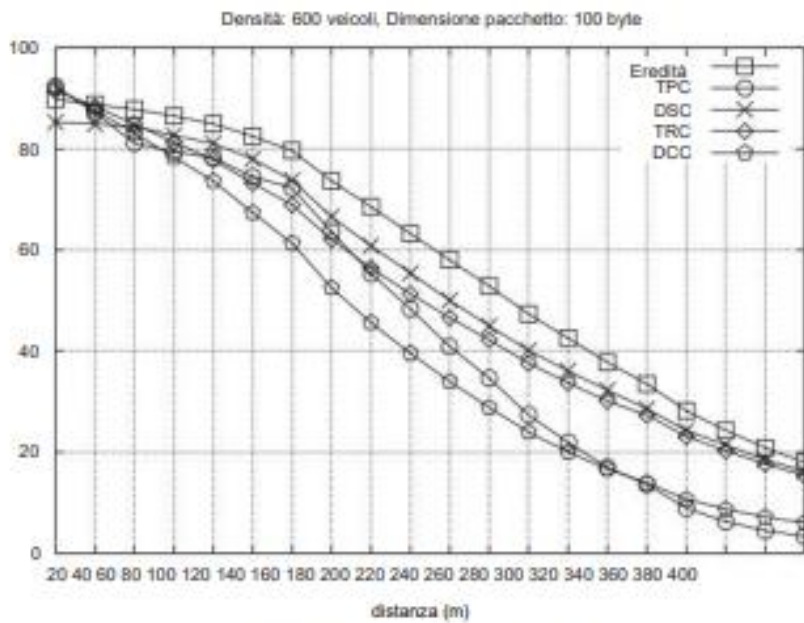
Le statistiche più importanti sono quelle entro i primi metri dove la ricezione con successo è fondamentale per i messaggi di sicurezza.

Per approfondire le prestazioni dei meccanismi DCC, vengono presi in considerazione, in particolare, ulteriori parametri quali la percentuale di nodi in ciascuno stato DCC, il tempo di permanenza medio in ogni stato tra due eventi di commutazione, il numero medio di eventi di commutazione di stato per nodo al minuto.

### 2.2.3 Risultati dello studio effettuato

I risultati PDR sono mostrati nelle figure che seguono in funzione della distanza (variabile) tra trasmettitore e ricevitore, variando la dimensione del pacchetto e la densità dei nodi. Le prestazioni di tutti gli schemi peggiorano all'aumentare della dimensione del pacchetto per un dato numero di nodi veicolari e all'aumentare della densità del nodo, quando si fissa la dimensione del pacchetto, a causa della maggiore contesa e delle collisioni.





Risulta evidente come, in condizioni di traffico medio-basso, lo schema legacy superi gli altri meccanismi con l'eccezione dei primi metri dove TPC, TRC, DSC ottengono valori di PDR più elevati.

Quindi, nonostante la potenziale riduzione dei tentativi di trasmissione, lo schema TRC risulta essere peggiore dello schema legacy.

I pacchetti generati dal livello applicazione ogni 100 ms, si accumulano nella coda MAC nello stato attivo (quando vengono trasmessi ogni 500 ms), e, una volta tornati allo stato rilassato, si cerca di trasmetterli ogni 40 ms, aumentando così la probabilità di collisioni e congestione.

I valori PDR per TPC si riducono notevolmente all'aumentare della distanza trasmettitore-ricevitore.

Ciò è dovuto principalmente alla bassa potenza di trasmissione (15 dBm) nello stato attivo che si riduce con l'area coperta dal messaggio (cioè maggiore è la distanza e minore è la potenza di trasmissione).

Anche DSC raggiunge valori PDR leggermente inferiori rispetto allo schema legacy.

Infatti, come si evince dalla tabella VII, la maggioranza dei nodi rimangono nello stato attivo, dove la soglia CCA per DSC è superiore a quello dello schema legacy.

Di conseguenza, un nodo è meno sensibile ad altre trasmissioni, è bloccato raramente, ma la probabilità di collisioni aumenta.

In condizioni di traffico più intenso, quando si considerano 600 nodi e un pacchetto con dimensione pari a 300 byte, le differenze tra gli schemi confrontati diventano più notevoli.

TPC espone le prestazioni più scarse, con valori PDR inaccettabili, a causa di bassi valori di potenza di trasmissione negli stati attivo e restrittivo.

In condizioni di congestione più pesante, DSC aumenta la probabilità di collisione, per le motivazioni sopra esposte.

Le migliori prestazioni dello schema TRC con l'aumento del carico di traffico potrebbero essere fuorvianti.

Anche se la percentuale di pacchetti ricevuti con successo è più alta questa, è calcolata su un numero molto basso di pacchetti trasmessi.

Infatti, quando viene rilevata una congestione, l'intervallo di pacchetti è aumentato a 500 ms e poi a 1 s.

Nel caso di 600 nodi e pacchetti lunghi 300 byte, con TRC ogni nodo trasmette quasi 2 pacchetti/s invece dei 10 pacchetti/s dello schema legacy.

Lo studio procede con un'analisi, attraverso due tabelle, dell'update delay.

TABLE III  
UPDATE DELAY (s), 300 VEHICLES

Scheme	Packet size=100 bytes		Packet size=300 bytes	
	AR=400m	AR=50m	AR=400m	AR=50m
Legacy	0.216	0.105	0.308	0.112
TPC	0.366	0.105	0.368	0.114
DSC	0.230	0.108	0.36	0.117
TRC	0.603	0.267	0.959	0.311
DCC	0.878	0.279	1.348	0.314

TABLE IV  
UPDATE DELAY (s), 600 VEHICLES

Scheme	Packet size=100 bytes		Packet size=300 bytes	
	AR=400m	AR=50m	AR=400m	AR=50m
Legacy	0.318	0.112	0.465	0.114
TPC	0.384	0.114	0.595	0.138
DSC	0.351	0.117	0.552	0.122
TRC	1.011	0.311	1.242	0.542
DCC	1.387	0.306	1.668	0.364

I risultati nelle tabelle III e IV mostrano la metrica PDR (ritardo di aggiornamento), mirando a dimostrare che, nel caso di un range di consapevolezza AR = 50m, tutti gli schemi, ad eccezione di TRC e DSC, sono in grado di garantire un ritardo di aggiornamento vicino ai 100 ms, indipendentemente dalle dimensioni del pacchetto e dal numero dei veicoli.

Il ritardo di aggiornamento aumenta nell'intervallo 0-400 m, con TRC e DSC che hanno riportato i risultati peggiori.

Questo è da attribuire all'aumento dell'intervallo di trasmissione dei pacchetti per TRC.

In congestione TRC non è in grado di supportare applicazioni di sicurezza cooperativa che richiedono tempestività negli aggiornamenti CAM, poiché ostacola i nodi da cui ricevere CAM, i loro vicini ogni 100 ms.

DCC, nel complesso, si comporta anche peggio perché si applica contemporaneamente il meccanismo TCP e il TRC, quindi il ritardo di aggiornamento è influenzato negativamente sia dall'elevata perdita di pacchetti in TCP che dal minor numero di pacchetti trasmessi in TRC.



I valori di carico del canale aumentano invece con il numero di nodi e con la dimensione dei pacchetti a causa di una maggiore congestione del canale, come risulta essere evidente dalla tabella V.

Questa è la tendenza di ogni schema, con l'eccezione di TPC, per il quale, curiosamente, in condizioni affollate il carico diminuisce a causa della forzata riduzione della potenza di trasmissione.

Gli schemi legacy e DCC mostrano valori di carico del canale vicini a 0,68 sotto il nodo ad alta densità.

TABLE V  
AVERAGE CHANNEL LOAD

Scheme	Packet size=100 bytes		Packet size=300 bytes	
	300 vehicles	600 vehicles	300 vehicles	600 vehicles
Legacy	0.203	0.392	0.442	0.677
TPC	0.119	0.177	0.213	0.154
DSC	0.202	0.389	0.422	0.684
TRC	0.078	0.123	0.139	0.168
DCC	0.075	0.102	0.116	0.156

In TPC, TRC e DCC, i nodi misurano in modo significativo valori di carico del canale inferiori, anche in condizioni di elevata densità di traffico e pacchetti di grandi dimensioni. Tuttavia, le motivazioni dietro una tendenza simile sono completamente diverse.

In TPC il carico più basso del canale è dovuto all'uso di una potenza di trasmissione molto bassa dai nodi nello stato "Restrictive".

TRC, riduce invece il numero di trasmissioni, aumentando l'intervallo di trasmissione dei pacchetti in congestione.

Come un beneficio apparente, è pagato in termini di un ritardo di aggiornamento più elevato, come discusso prima.

DCC beneficia di entrambi gli approcci in termini di riduzione del carico del canale, anche se non migliora le prestazioni complessive di affidabilità e tempestività.

## 2.2.4 Maggiori dettagli sui meccanismi DCC

TABLE VII  
NODES PERCENTAGE AND PERMANENCE TIME PER DCC STATE (300 VEHICLES)

Scheme	Packet size=100 bytes			Packet size=300 bytes		
	RELAXED	ACTIVE	RESTRICTIVE	RELAXED	ACTIVE	RESTRICTIVE
TPC	8.05%-1s	88.14%-8.68s	3.81%-8.98s	3.66%-6.65s	87.08%-11.02s	9.25%-8.99s
DSC	18.48%-5.98s	81.52%-24.78s	0-0	0-0	37.93%-1.48s	62.07%-55.58s
TRC	12.65%-1.55s	87.35%-8.99s	0-0	8.47%-1s	91.53%-8.99s	0-0
DCC	8.47%-1s	91.53%-8.99s	0-0	8.47%-1s	91.53%-8.99s	0-0

TABLE VIII  
NODES PERCENTAGE AND PERMANENCE TIME PER DCC STATE (600 VEHICLES)

Scheme	Packet size=100 bytes			Packet size=300 bytes		
	RELAXED	ACTIVE	RESTRICTIVE	RELAXED	ACTIVE	RESTRICTIVE
TPC	2.12%-1s	84.18%-15.16s	13.6%-8.97s	1.64%-1s	31.95%-3.59s	66.4%-8.86s
DSC	0-0	51.51%-1.82s	48.49%-54.41s	0-0	1.69%-1s	98.31%-57.95s
TRC	8.47%-1s	91.53%-8.99s	0-0	2.13%-1s	51.8%-6.49s	46.07%-8.98s
DCC	8.47%-1s	91.53%-8.99s	0-0	8.44%-1s	91.26%-8.97s	0.30%-8.97s

I risultati nelle tabelle VII e VIII mostrano che TPC, TRC e DCC sono gli schemi meno stabili.

Con TRC e DCC i nodi passano continuamente dallo stato attivo a quello restrittivo: quasi 10 eventi di commutazione per nodo al minuto e un tempo medio di permanenza negli stati attivo e restrittivo molto basso.

Una minore instabilità è vissuta dal TPC sotto delle condizioni di carico medio.

Tale instabilità è dovuta al fatto che quando si passa da uno stato attivo a uno restrittivo, i nodi modificano drasticamente i loro parametri di trasmissione, ovvero la potenza di trasmissione e l'intervallo di pacchetto rispettivamente per TPC e TRC.

Perciò il carico del canale è notevolmente ridotto, permettendo ai nodi di passare a uno stato meno congestionato e, quindi, da quest'ultimo, a uno più congestionato poiché il canale viene presto congestionato di nuovo.

DSC consente invece ad un'ampia frazione di nodi di rimanere nello stato restrittivo quando si considera la dimensione del pacchetto di 300 byte.

Come dato di fatto è testimoniato dal basso numero di eventi di commutazione tra gli stati (il valore più alto è una commutazione al minuto) in Tabella VI.

**TABLE VI**  
**NUMBER OF SWITCHING EVENTS PER NODE PER MINUTE**

Scheme	Packet size=100 bytes		Packet size=300 bytes	
	300 vehicles	600 vehicles	300 vehicles	600 vehicles
TPC	9.95	4	2.63	10
DSC	0.16	0.65	0.76	1
TRC	9.67	10	10	7.08
DCC	10	10	10	9.99

I risultati ottenuti mostrano che TRC supera gli altri approcci in termini di raggiungibilità, soprattutto in condizioni di scenari affollati, ma a scapito di un lungo ritardo di aggiornamento anche nei primi metri, cosa che per alcune applicazioni può risultare intollerabile.

Gli altri schemi si comportano anche peggio dell'approccio legacy.

Per quanto riguarda lo schema TRC, l'intervallo di pacchetti di 40 ms nello stato rilassato specificato si è rivelato troppo breve e ha generato più collisioni rispetto allo schema legacy.

I valori negli altri stati, invece, costringono i nodi a ridurre pesantemente la frequenza di trasmissione dei pacchetti.

I risultati in figura 3 mostrano che l'impostazione TRC accoppiata con TPC modifica il valore della potenza di trasmissione e, senza DSC abilitato, forniscono valori PDR più elevati e valori di update delay inferiori, sebbene ancora più elevati rispetto allo schema legacy.

Per completezza, i risultati vengono inoltre confrontati con lo schema legacy che prevede l'applicazione che genera pacchetti ogni 200 ms (anziché 100 ms, simile al modello di generazione del traffico nel caso peggiore), quindi dimezzando il numero di pacchetti generati e, di conseguenza, il carico del canale.

Le impostazioni proposte portano a un valore migliore del PDR nei primi 100 m e hanno l'ulteriore vantaggio di adattare dinamicamente i parametri di trasmissione secondo il carico del canale.

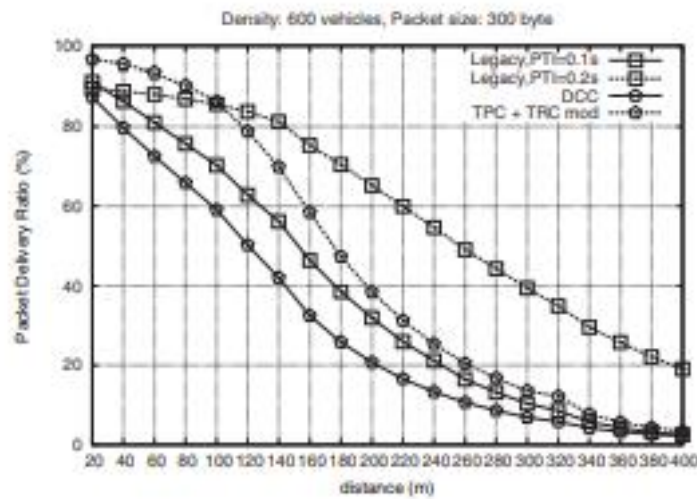


Fig. 3. Packet delivery ratio at different transmitter-receiver distances under different settings for legacy and DCC schemes

## 2.2.5 Conclusione dello studio e risultati finali

Questo studio ha indagato in profondità le prestazioni dei meccanismi DCC come attualmente specificato da ETSI.

I risultati principali sono riassunti nella tabella IX a seguire.

TABLE IX  
SUMMARY OF THE MAIN FEATURES OF THE ANALYZED DCC SCHEMES

	Adapted parameter	Reachability	Up-to-dateness	Stability	Channel load
TPC	Transmission Power (TP)	Very low	Medium	Low	Low
DSC	Carrier Sense Threshold (CST)	Low	Medium	High	High
TRC	Packet Transmission Interval (PTI)	High	Low	Low	Low
DCC	TP+CST+PTI	Medium	Low	Low	Very low

TRC e TPC sono i meccanismi che interessano principalmente il comportamento complessivo dello schema DCC e i risultati raggiunti mostrano che sono altamente sensibili alle impostazioni dei parametri di adattamento.

I parametri di temporizzazione e della soglia CL dovrebbero essere impostati con cura per ridurre gli eventi di commutazione tra gli stati.

Le misurazioni CL potrebbero essere un'ulteriore limitazione e influiscono sulla stabilità del DCC.

Le transizioni di stato da uno stato meno congestionato a uno più congestionato si basano su valori CL istantanei.

Una stima più affidabile potrebbe aiutare a filtrare fuori gli effetti transitori nei valori di carico.

Potrebbe essere utile anche per i passaggi dallo stato più congestionato ad uno meno congestionato.

Inoltre, la misura binaria CL (dà solo un'indicazione sul fatto che il canale viene rilevato come occupato o meno in un dato istante) potrebbe essere sostituita con un'altra metrica accurata che tiene conto di quanto il canale è percepito come occupato.

Tutto sommato, l'analisi condotta identifica diversi aspetti che meritano ulteriori approfondimenti al fine di migliorare le prestazioni complessive del DCC e ciò richiede una maggiore rigidità e correlazione con i requisiti applicativi per i parametri messi a punto per ottenere i risultati desiderati.

Sebbene l'approccio reattivo sia stato un meccanismo standardizzato di lunga data, diversi lavori ne hanno misurato le prestazioni e i limiti.

E' stato dimostrato che l'uso di una FSM causa un sottoutilizzo del mezzo.

L'approccio reattivo è stato anche confrontato con alternative come LIMERIC, dove gli approcci adattivi hanno superato l'approccio reattivo standardizzato.

Prima di descrivere nel dettaglio l'approccio adattivo, è bene comprendere il ruolo che riveste il CBR in DCC, il modo in cui può essere calcolato e il rapporto con gli altri parametri.

## **Capitolo 3**

# **Metriche CBR per il controllo decentralizzato della congestione nei VANETs**

### **3.1 Introduzione alle metriche CBR**

Si prevede che le "Vehicular Ad Hoc Networks" (VANETs) giochino un ruolo cruciale nei futuri Sistemi di Trasporto Intelligenti (ITS).

Un'ampia serie di applicazioni volte a prevenire incidenti e interessate al miglioramento dell'efficienza dei trasporti può essere supportata abilitando la comunicazione tra veicoli. I messaggi CAM sono stati introdotti in Europa a questo scopo [7].

Sono regolarmente trasmessi in broadcast (con frequenza da 1 a 10 Hz) su un canale sicuro (Canale 172 negli Stati Uniti, Common Control Channel in Europa) [8] per fornire informazioni in tempo reale sulla presenza di un veicolo, sulla posizione e sullo stato dei vicini.

Ricevendo CAM, un veicolo può riconoscere prontamente manovre anomale dei veicoli circostanti come ad esempio situazione di frenata brusca ed avvisare il conducente di reagire di conseguenza.

È noto che le prestazioni dello standard IEEE 802.11[9] per la comunicazione inter-veicolare degrada all'aumentare del carico di rete.

Il canale di sicurezza congestionato ha l'effetto drammatico di aumentare la probabilità di perdita del messaggio CAM e rende più difficile per un veicolo riconoscere situazioni potenzialmente pericolose intorno ad esso.

Con l'introduzione dei meccanismi di controllo decentralizzato della congestione c'è stato un consenso da parte del mondo accademico, dell'industria automobilistica e degli organismi di standardizzazione nell'adattare i parametri di trasmissione (ad esempio la velocità o la potenza di trasmissione) in base allo stato di carico del canale.

Sebbene l'obiettivo del controllo di carico del canale può essere soddisfatto solo con misurazioni del carico locale, i principi di partecipazione e correttezza richiedono la diffusione e la condivisione delle informazioni sul carico tra i veicoli.

A tal proposito verrà analizzata la dinamica del CBR ("Channel Busy Ratio"), la metrica alla base dello standard di controllo decentralizzato della congestione (DCC), misurata a livello locale e condivisa su uno/due hop sotto diversi contesti di mobilità.

Saranno forniti i seguenti contributi:

- 1) Indagare le relazioni tra le CBR a livello locale percepite dai veicoli, il CBR one-hop, che rappresenta il valore percepito localmente riportato dai vicini one-hop e il CBR relativo a due hop, che rappresenta il CBR a un hop segnalato dai vicini di un hop, in diverse impostazioni.
- 2) Affermare la correlazione del CBR locale, del one-hop CBR e del CBR a due hop con quello dei veicoli vicini.
- 3) Fare luce sull'impatto che la posizione dei veicoli e la mobilità in una rete urbana, ricca di intersezioni e ostacoli, possono avere sul calcolo delle metriche CBR.

Tecniche proposte per mitigare la congestione nei VANETs adattano la potenza di trasmissione, l'intervallo di trasmissione del pacchetto e la soglia di rilevamento della portante.

Questo è in genere fatto secondo le condizioni di carico del canale.

La maggior parte del lavoro stima il carico sul canale tramite la metrica CBR che restituisce il rapporto quando il canale è stato segnalato come occupato dal livello di accesso in un dato intervallo di tempo.

Alcune opere si basano solo su misurazioni del CBR locale, mentre altre lasciano condividere ai veicoli le informazioni sullo stato del canale per acquisire con precisione le condizioni ambientali generali.

Come visto in precedenza, la prima versione di ETSI nel luglio 2011 [2] include meccanismi che, basati sul CBR, adattano la potenza di trasmissione, l'intervallo di trasmissione del pacchetto, la velocità di trasmissione dei dati e la soglia di rilevamento del “Clear Channel Assessment” (CCA).

Tali meccanismi si basano su una macchina a stati che evolve, in base allo stato di carico del canale, tra rilassato, attivo e restrittivo, in ordine crescente di congestione.

Le transizioni di stato vengono attivate quando il CBR percepito localmente da ciascun veicolo supera/scende al di sotto di determinate soglie per un periodo di tempo.

I risultati in [10] confermano che il DCC ha prestazioni scarse e mostrano che il controllo della velocità del messaggio e della potenza di trasmissione hanno un effetto importante sul comportamento del DCC.

Le debolezze identificate dei meccanismi DCC inizialmente concepiti, insieme ai recenti lavori che sostengono la necessità di condividere le informazioni sul carico del canale, hanno motivato le parti coinvolte nel processo di standardizzazione a studiare una soluzione diversa, un nuovo meccanismo: DCC v1.1.2 [11] (pone le sue basi nelle soluzioni proposte in [12] e [13]).

## 3.2 DCC v1.1.2

### 3.2.1 Misurazione del Channel Busy Ratio (CBR)

Il DCC di nuova concezione adatta, al livello di accesso, la velocità del messaggio secondo le misurazioni CBR.

Il CBR viene misurato attraverso una primitiva di servizio, chiamata PHY\_CCA.indication, disponibile al livello PHY di IEEE 802.11 [9] per trasmettere lo stato del canale (se occupato o meno) al livello MAC.

L'algoritmo DCC viene attivato ogni intervallo Tcbr, quando un nuovo valore del CBR locale, CBR0, viene consegnato dal chipset.

Il CBR locale viene calcolato come Tcca-busy/Tcbr, dove Tcca-busy è il tempo in cui il canale è stato occupato secondo la primitiva PHY\_CCA.indication durante il Tcbr.

Il compito della condivisione delle informazioni CBR è richiesto al protocollo GeoNetworking [6] a livello di rete e trasporto.

Ogni nodo invia ai suoi vicini:

- 1) La misura della congestione basata sull'ultima misurazione del CBR locale (CBR0)
- 2) Il valore del CBR massimo che ha ricevuto dai vicini a un hop (CBR1)

Il parametro CBRdcc risultante, utilizzato nel livello di accesso, considera le misurazioni effettuate localmente e nelle vicinanze ed è calcolato come segue:

$$CBR_{dcc} = \max(CBR0, CBR1, CBR2)$$

dove CBR1 e CBR2 sono, rispettivamente, i valori massimi di CBR0 (cioè il CBR a un hop) e CBR1 (cioè il CBR a due hop) ricevuti dai nodi vicini in un dato intervallo Tcbr.

L'algoritmo DCC viene eseguito e calcola il tempo minimo tra la generazione successiva di pacchetti, T\_GenPacket\_DCC, che è pari a 1/ego\_target\_rate.

Il valore dell'ego\_target\_rate r per un veicolo j è calcolato come segue:

$$r_j(t) = (1 - \alpha)r_j(t - 1) + \\ + \text{sign}(r_g - r_c(t - 1)) \cdot \min[X, \beta \cdot |r_g - r_c(t - 1)|]$$

dove rg indica il target\_rate, rc il total rate percepito dalla stazione ITS locale, X ha un valore pari ad 1, alfa pari a 0.1 e beta pari a 1/150.



### 3.2.2 Motivazioni ed obiettivi dello studio sul CBR

L'obiettivo principale di questo studio è di ottenere una comprensione più profonda delle modalità di misurazione del CBR.

Dato il ruolo cruciale delle metriche CBR, calcolate localmente e condivise ai vicini relativi ad uno/due hop per fornire un feedback per il controllo della congestione della rete, è obbligatorio catturarne accuratamente le dinamiche.

Lo studio mira a valutare le differenze tra le metriche CBR menzionate e ad identificare le loro possibili dipendenze da parametri quali la posizione del veicolo e il numero di vicini a uno e due hop.

L'analisi sarà condotta in uno scenario urbano ostruito, per capire meglio le variazioni delle metriche CBR quando un veicolo si sposta vicino agli incroci.

La topologia simulata include un insieme di veicoli posizionati uniformemente in una griglia larga 750 m di strade a doppia corsia 6x6, distanziate di 150 m l'una dall'altra, con edifici che impediscono la propagazione della linea di vista (LoS) tranne che lungo le strade diritte.

Oltre alle relazioni reciproche che possono essere in qualche modo dedotte intuitivamente e osservate anche attraverso l'ispezione grafica, il lavoro sfrutta uno strumento matematico consolidato per effettuare quantitativamente questa analisi: la correlazione.

### 3.2.3 La correlazione: premesse sulle metriche di performance

Per ragioni di precisione, sono stati definiti diversi indici di correlazione.

Il più comune tra questi è quello di Pearson.

Vengono analizzati scenari sia statici che dinamici, rispettivamente con nodi fissi e mobili.

Nello scenario statico, le misurazioni CBR vengono eseguite con un numero crescente di nodi fissi (150, 300, 600, 900, 1200, 1800, 2400) al fine di valutare il comportamento a diverse densità di nodi.

In quello dinamico sono presenti 451 nodi che si muovono ad una velocità media di 60 km/h in un intervallo di tempo di 40 s.

Prima di descrivere nel dettaglio lo studio effettuato, è bene fare alcune premesse matematiche sulle metriche di performance basate sulla correlazione.

Dato un insieme con cardinalità  $n$ , i cui elementi  $i$  sono caratterizzati da due variabili  $x_i$  e  $y_i$ , l'indice di correlazione di Pearson  $p$  è definito come segue:

$$p = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}},$$

Tipicamente si riconosce una correlazione forte quando  $|p| > 0,7$  e una correlazione debole quando  $0 < |p| < 0,3$ .

Per calcolare correttamente la correlazione, è necessario introdurre alcune proprietà della correlazione di Pearson.

### *Proposizione 1: Dominio di correlazione*

Il dominio di correlazione può influenzare fortemente il risultato della correlazione.

Le dipendenze tendono ad essere più forti se viste su una gamma più ampia di valori.

Si considera l'esempio della Fig. 1 con le due variabili X e Y.

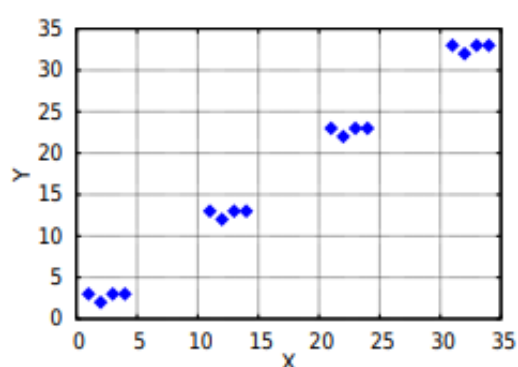


Fig. 1: Impact of the correlation domain on the results (an example).

Considerando l'unico intervallo [1-4] di X la correlazione è 0,25 (molto debole) mentre considerando l'intero dominio, cresce fino a 0,999.

Per questo stesso motivo, sono state sviluppate diverse tecniche che tentano di correggere la restrizione dell'intervallo in una o entrambe le variabili.

### *Proposizione 2: Linearità*

La correlazione di Pearson è una metrica di quanto è forte la relazione lineare diretta (crescente) tra due variabili.

Ciò significa che, se la correlazione è  $\pm 1$ , esiste una perfetta relazione lineare tra le due (i campioni sono su una retta con pendenza positiva se  $p=+1$ , con pendenza negativa se  $p=-1$ ).

Ma questo significa anche che  $p$  vale 0 quando tutti i campioni sono su una linea orizzontale o verticale e, di conseguenza,  $p$  si avvicinerà a 0 quando i campioni tendono a raggiungere un valore asintotico.

In caso di comportamenti non lineari, potrebbero essere necessarie alcune modifiche.

### *Proposizione 3: Distribuzione dei campioni*

In caso di correlazione non perfetta tra due variabili, i campioni devono essere distribuiti uniformemente sui domini di correlazione.

Nell'esempio in FIG1 c'è una forte correlazione che, però, non è perfetta, ma quasi (0,999), con i campioni che sono distribuiti uniformemente.

Invece, considerando fino a 3 volte i campioni nell'intervallo [11-14] (contandoli 3 volte, per esempio), la correlazione scende a 0,7.

### **3.2.4 Calcolo della correlazione negli scenari simulati**

Tutte le analisi svolte in questo lavoro affrontano, in particolare, le relazioni tra i diversi CBR (CBR0, CBR1, CBR2) e il numero di vicini, considerando due possibili casi: vicini ad 1 hop (NH1) e vicini a 2 hop (NH2).

Quindi, tutti i risultati studieranno CBR0, CBR1, CBR2, NH1 e NH2 in quanto queste sono le variabili da considerare.

L'insieme di vicini ad 1 hop di un dato nodo contiene tutti i nodi che potrebbero potenzialmente ricevere un pacchetto da esso.

Di conseguenza, per ogni veicolo, NH1 è il numero di nodi che potrebbero ricevere i pacchetti con un "Signal to Interference plus Noise Ratio" (SINR) superiore ad una certa soglia, a seconda dello schema di modulazione.

NH2 è ottenuto da tutti i vicini diretti agli insiemi di vicini ad 1 hop.

La correlazione, nello scenario dinamico, è calcolata nodo per nodo, nel tempo, mentre ci si sposta nella rete urbana, per evidenziare il possibile ruolo della posizione.

Negli scenari stazionari, che coinvolgono diverse densità di nodi, la correlazione è calcolata indipendentemente dal tempo (cioè in un dato momento per un certo numero di nodi).

In entrambi i casi, i risultati sono descritti sia attraverso i grafici che dall'indice di correlazione in modo da evidenziare possibili violazioni delle precedenti proposizioni.

Nel caso di nodi statici, le densità multiple (i nodi vanno da 150 a 2400) aderiscono all'indicazione della Proposizione 1: viene coperto un dominio significativo di nodi del next-hop sufficiente a sottolineare le dipendenze.

Per far fronte alla Proposizione 3, in tutti gli scenari, indipendentemente dal rispettivo numero di nodi simulati, ne verranno presi in considerazione solo 100 (quelli più vicini al centro per limitare gli effetti di confine).

Infine, per quanto riguarda la Proposizione 2, si presterà attenzione alla possibile influenza di una distribuzione non lineare dei campioni sul calcolo della correlazione, in modo da far distinzione, se necessario, tra correlazione e dipendenza di Pearson.

### 3.2.5 Risultati della simulazione

Come anticipato, la prima serie di risultati riguarda l'analisi di come i parametri CBR siano influenzati dalla mobilità del nodo e dalla posizione.

Questo studio si concentra sui nodi che sono in movimento per la maggior parte del tempo della simulazione, rimanendo fermi per un periodo consecutivo non superiore a 10 secondi. Questo perché, altrimenti, la loro scarsa mobilità avrebbe un impatto non trascurabile sulla valutazione del carico del canale.

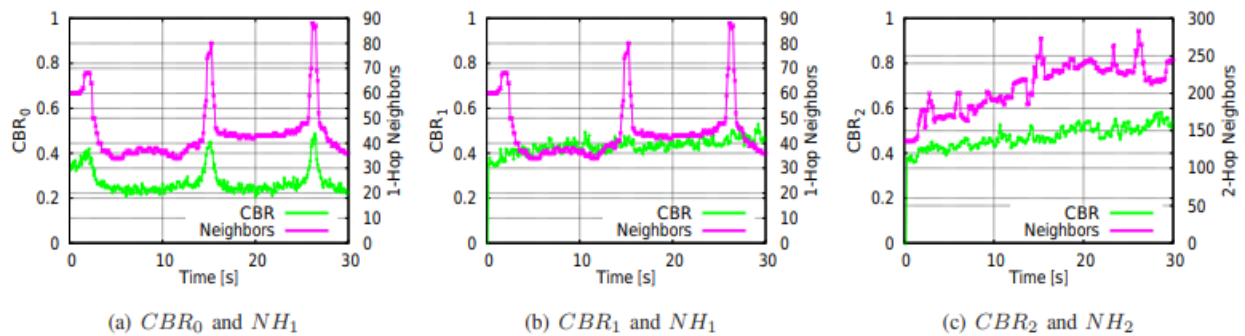


Fig. 2

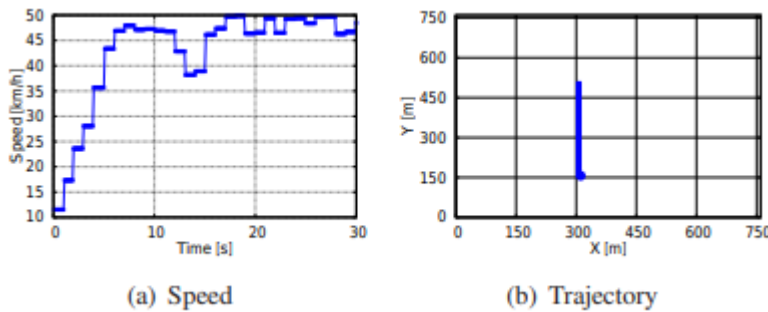


Fig. 3

In Fig. 2 CBR0, CBR1 e CBR2 vengono confrontati con il numero di vicini a 1 hop e 2 hop. In Fig. 3(b) si può vedere la traiettoria per il nodo nella griglia (un percorso rettilineo che copre 3 incroci), mentre in Fig. 3(a) è tracciata la variazione della velocità del nodo. I picchi nel numero dei vicini (Fig. 2(a)-(b)) corrispondono al momento in cui si incontra un bivio; mentre sono ben riflessi dal CBR0, come previsto, non lasciano tracce né su CBR1 né su CBR2.

Infatti, l'attenuazione del segnale wireless cambia quando si passa da condizioni "Non-LoS" a condizioni con "LoS" (linea di vista) man mano che ci si avvicina al centro dell'incrocio, con conseguente effetto sul CBR misurato localmente.

Inoltre, CBR1 è quasi lo stesso e CBR2 è lo stesso per tutti i nodi.

Ciò significa che l'intera mappa è coperta da due salti.

Inoltre, dato l'operatore "max" nella definizione di CBR1, tutti i nodi percepiscono lo stesso rapporto di occupazione del canale (CBR).

Questo primo scenario, mostra, perciò, che solo CBR0 è significativamente dipendente dalla posizione del nodo nella griglia di riferimento e che questa misura è fortemente correlata al numero di vicini.

Gli indici di correlazione sono calcolati nodo per nodo e sulla media dei nodi per ogni coppia di variabili (CBR<sub>i</sub>, NH<sub>j</sub>).

CBR <sub>i</sub>	NH <sub>j</sub>	<i>p</i>	CBR <sub>i</sub>	NH <sub>j</sub>	<i>p</i>
0	1	0.923	0	2	-0.298
1	1	0.292	1	2	-0.176
2	1	0.181	2	2	-0.129

I risultati, riassunti in tabella per il nodo in analisi, mostrano che l'unica correlazione rilevante trovata (piuttosto alta) è quella tra CBR0 e NH1.

Inoltre, questa correlazione varia in modo significativo nodo per nodo (tra 0,8 e 0,9) e sembra strano che nessuna correlazione ( $|p| < 0,3$ ) possa essere identificata per le altre variabili.

Qui, le Proposizioni 1 e 3 forniscono la corretta interpretazione.

Quando si correlano i campioni nel tempo come nel grafico in Fig. 2 (b), viene considerato un dominio troppo stretto per il CBR1, intorno a 0,4 (Proposizione 1) e, inoltre, gli intervalli sono sovracampionati (Proposizione 3) quando il numero dei vicini è minore.

Quest'ultimo vale anche per la correlazione tra CBR0 e NH1, che potrebbe crescere ancora di più.

E' necessario un approccio più ampio e diverso per analizzare queste questioni aperte.

Proprio per questo è stata eseguita una ricca serie di simulazioni, in condizioni di carico molto diverse.

In questo caso il focus è sulle stesse variabili ma, a differenza degli scenari precedenti, c'è indipendenza dal tempo e dalla posizione, con lo scopo di coprire il più ampiamente possibile il dominio di correlazione.

Le simulazioni includono diversi scenari statici con un numero crescente di nodi, ciascuno ripetuto 10 volte utilizzando semi diversi.

In un tempo predefinito di 30 secondi vengono considerati i 100 nodi più centrali per ciascuna simulazione e le loro variabili vengono calcolate rispettivamente in media su 10 esecuzioni.

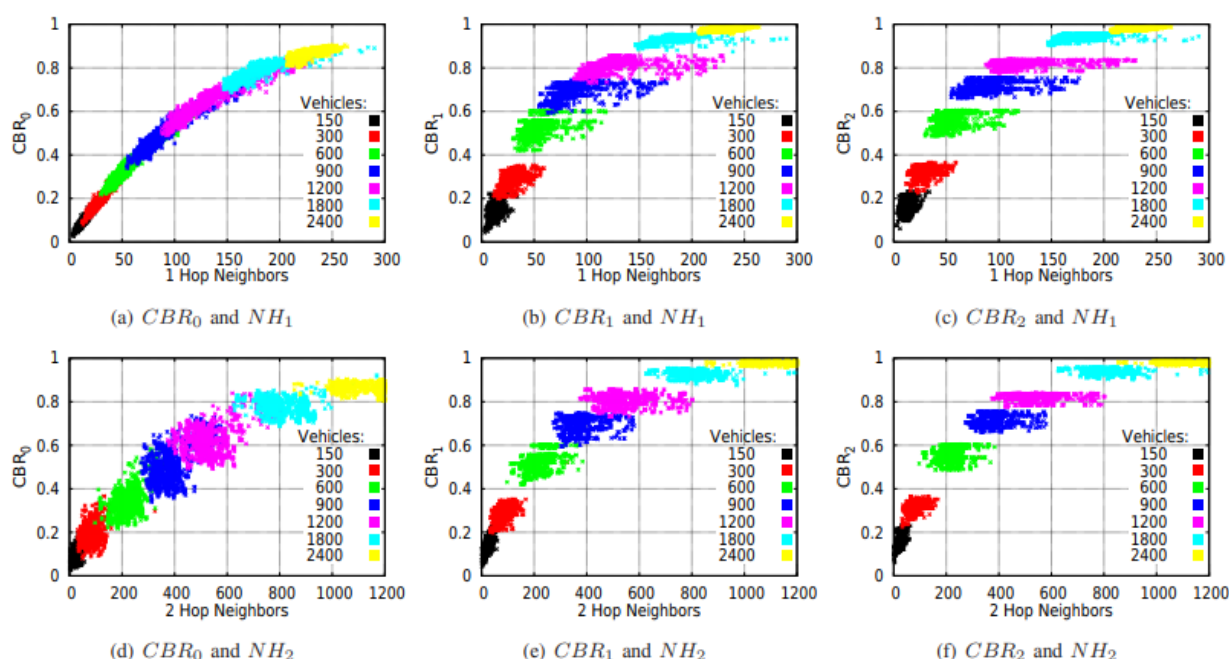


Fig. 4: Scattering plots for the analysis of the CBR and NH variables and their correlations (CCA threshold is equal to  $-85$  dBm)

Tutti i grafici di Fig. 4 sono intesi come grafici di correlazione, in modo da permettere di identificare le relazioni esistenti tra CBR0, CBR1, CBR2, NH1 e NH2.

In ogni grafico, i punti sparsi evidenziano, colore per colore, i risultati provenienti da uno scenario con un diverso numero di nodi.

Quando si utilizza lo stesso dominio X (ad esempio, numero di vicini a 1 hop), la stessa coordinata x rappresenterà lo stesso nodo in tutti i grafici (rispettivamente CBR0, CBR1 e CBR2).

La pendenza è maggiore all'aumentare dell'ordine di CBR (CBR0, CBR1, CBR2) e questo è abbastanza intuitivo, infatti CBR1 è il valore massimo di tutti i vicini al CBR0.

In altre parole, non appena un nodo  $i$  percepisce un CBR0i più alto, tutti i suoi vicini  $k$  avranno  $CBR1k \geq CBR0i$ .

In particolare per i grafici relativi ai vicini one-hop l'effetto precedente implica anche che maggiore è l'ordine del CBR, più le curve vengono schiacciate nel loro codominio.

Questo abbassa anche il grado di correlazione e rende i grafici a dispersione meno continui (i punti sparsi evidenziano alcune lacune).  
Quando si considera il numero di vicini a due hop, più o meno, valgono gli stessi effetti.

Una volta raggiunta questa comprensione, la correlazione può essere calcolata per tutti i sei i grafici di dispersione e i risultati sono mostrati nella Tabella III che segue.

TABLE III: CORRELATION INDEXES:  $p$  AND  $p^*$

$CBR_i$	$NH_j$	$p$	$p^*$	$CBR_i$	$NH_j$	$p$	$p^*$
0	1	0.975	0.985	0	2	0.948	0.966
1	1	0.921	0.948	1	2	0.910	0.941
2	1	0.913	0.942	2	2	0.904	0.937

Per valutare l'impatto dei comportamenti non lineari dovuti alla saturazione CBR (Proposizione 2), sono state calcolate due versioni di  $p$ : una che utilizza tutti i campioni ( $p$ ) e una ( $p^*$ ) ottenuta considerando solo gli scenari meno popolati in modo da trascurare l'impatto della regressione non lineare dei campioni.

I risultati sono tutti maggiori di 0,9, il che significa che la correlazione per ogni coppia ( $CBR_i, NH_j$ ) è forte.

Come previsto, il valore più alto si ottiene con ( $CBR_0, NH_1$ ).

Considerando  $p^*$ , non si riscontrano grossi miglioramenti.

Ciò è da attribuire a due fattori: in primo luogo, i campioni provenienti dallo scenario con 2400 nodi non spostano troppo l'insieme complessivo dei campioni nell'area caratterizzata da CBR; in secondo luogo, per motivi di precisione, più  $p$  si avvicina a 1, più è difficile migliorarlo.

Osservando i due insiemi di risultati ottenuti in mobilità e con una topologia fissa, è possibile rilevare la correlazione tra tutte le curve, ma solitamente è percepibile su scala maggiore rispetto a un singolo scenario.

Tuttavia, la correlazione tra le variabili ( $CBR_0, NH_1$ ) è così forte che può essere rilevata da una sola simulazione: a causa delle ostruzioni e della mancanza di fenomeni multi-hop (sia in  $CBR_0$  che in  $NH_1$ ), una singola simulazione copre domini e codomini sufficientemente ampi.

Infine è stato studiato il confronto tra CBR0 e CBR1 a diversi carichi di traffico (Fig. 5), considerando anche diversi possibili livelli di CCA.

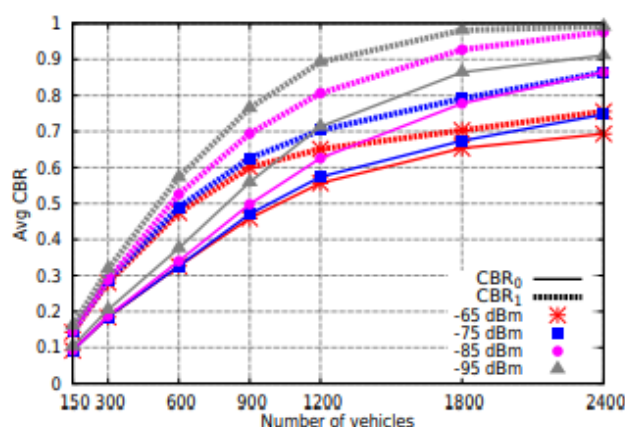


Fig. 5: A final comparison between CBR<sub>0</sub> and CBR<sub>1</sub>, also considering different possible CCA threshold values

In tutti i casi, poiché CBR1 e CBR2 sono abbastanza vicini, le misure CBR2 non sono rappresentate per rendere il grafico più chiaro.

Ovviamente, più bassa è la soglia CCA e/o maggiore è l'ordine CBR, maggiore sarà la CBR percepita.

E, a meno che la densità non diventi molto alta (1200 veicoli o più), il passaggio da CBR0 a CBR1 porta ad effetti più drammatici rispetto all'abbassamento della sensibilità da -65 dBm a -95 dBm.

### 3.2.6 Conclusione dello studio sulle metriche CBR

In conclusione, la principale differenza si ha tra CBR0 e CBR1, con il primo in grado di mostrare gli effetti locali dovuti ad una fortissima correlazione al numero di nodi nello stesso range radio; quest'ultimo consente a tutti i nodi di essere a conoscenza del CBR massimo nella portata radio.

CBR1 è potenzialmente utile per superare gli effetti dei terminali nascosti, poiché tutti i nodi saprebbero quale CBR viene percepito dai veicoli nei centri, quello più esposto alle collisioni sotto carico pesante [14].

CBR rappresenta perciò uno dei capisaldi della nuova DCC.

È stato qui analizzato considerando, in particolare, scenari ostruiti differenti.

Ciò ha permesso di raggiungere una significativa consapevolezza sulle sue caratteristiche attraverso un ricco set di simulazioni, affrontando l'analisi della correlazione tra il CBR e il numero dei vicini.



## Capitolo 4

# Approccio Adattivo del protocollo DCC e algoritmi correlati

### 4.1 Approccio Adattivo DCC

I meccanismi di approccio adattivo sono sistemi di controllo lineari in cui la variabile di processo è la velocità di trasmissione e il setpoint è una frazione della capacità del canale. Il controllo integrato della velocità del messaggio lineare (LIMERIC) [17] è la base per l'approccio adattivo ETSI definito nella norma attuale.

Un approccio adattivo al controllo della congestione ha tre obiettivi:

- 1) convergere a un livello di utilizzo del canale predefinito;
- 2) raggiungere l'equità locale tra i veicoli vicini;
- 3) raggiungere l'equità globale tra tutti i veicoli che contribuiscono alla congestione.

Ci sono state diverse iterazioni dell'algoritmo LIMERIC proposte dagli stessi autori, utilizzando combinazioni differenti dei parametri.

### 4.2 Algoritmo LIMERIC

LIMERIC è un algoritmo di controllo della velocità lineare distribuito e adattivo in cui ogni veicolo adatta la propria velocità di messaggio in modo tale che il carico totale del canale converga verso un obiettivo specificato.

Proposto per la prima volta in [17], si basa sul presupposto che ogni veicolo può misurare accuratamente il CBR in un dato momento.

Ogni veicolo aggiorna la sua frazione di utilizzo medio ( $\delta$ ) del canale per l'istante  $n$  utilizzando l'equazione:

$$\delta(n) = [(1-\alpha) \cdot \delta(n-1) + \beta] \cdot [\text{CBRtarget} - \text{CBR}(n-1)]$$

dove  $\alpha$  e  $\beta$  sono parametri dell'algoritmo che influenzano la velocità di convergenza, la stabilità e l'utilizzo del mezzo in regime stazionario.

Il secondo termine dell'espressione rappresenta la frazione di occupazione del canale che il veicolo dovrebbe acquisire.

L'utilizzo totale del mezzo ottenuto da LIMERIC, in regime stazionario, è dato dall'equazione [17]:

$$CBR = (K \cdot \beta \cdot CBR_{target}) / (\alpha + K \cdot \beta)$$

dove K è il numero di veicoli che condividono il mezzo.

I valori per  $\alpha$  e  $\beta$  sono parametri dell'algoritmo, forniti nella proposta originale per LIMERIC [17], che influenzano la velocità di convergenza e sono mostrati nella tabella che segue insieme al CBRtarget.

Parameter	Value
$\alpha$	0.1
$\beta$	0.0067
CBR Target	0.60

Con l'utilizzo della prima equazione, il valore di  $\beta$  garantisce la convergenza per un massimo di 285 veicoli [17].

Per affrontare scenari molto densi, in cui  $\alpha$  e  $\beta$  non possono garantire la convergenza, viene proposta in [17] una modifica alla formula iniziale attraverso l'inclusione di una soglia X che limita la variazione massima.

$$\begin{aligned} \delta(n) = & (1 - \alpha) \cdot \delta(n - 1) \\ & + \text{sign}(CBR_{target} - CBR(n - 1)) \\ & \cdot \min[X, \beta \cdot \text{abs}(CBR_{target} - CBR(n - 1))] \end{aligned}$$

Ciò significa che se l'entità dell'offset aggiornato, dato dal valore assoluto di  $[CBR_{target} - CBR(n-1)] \cdot \beta$ , supera il valore di X, l'offset massimo sarebbe X. L'offset risultante viene quindi aggiunto o sottratto da  $((1-\alpha) \cdot \delta(n-1))$  a seconda che  $[CBR_{target} - CBR(n-1)]$  sia positivo o negativo.

Questa formula è alla base della logica dell'approccio adattivo ETSI, tuttavia gli autori di LIMERIC propongono una nuova serie di parametri per affrontare le sfide della stabilità in scenari con congestione elevata.

I valori proposti per  $\alpha$  e  $\beta$  hanno un effetto sul tempo impiegato dal sistema per convergere e sul numero di nodi che è possibile gestire in modo stabile.

Valori bassi per  $\beta$  aumentano il tempo impiegato dal sistema per convergere e mantengono il sistema più lontano dall'occupazione del canale.

D'altra parte, valori elevati per  $\beta$  fanno oscillare il sistema prima di convergere, aumentando la possibilità di non convergenza o convergenza ad un ciclo limite.

Valori elevati per  $\alpha$  migliorano la velocità di convergenza, ma il sistema converge in un punto più lontano dall'occupazione target.

Pertanto, gli autori di LIMERIC utilizzano diversi valori per i parametri negli aggiornamenti alla proposta originale.

Gli autori confrontano i meccanismi DCC in scenari densi, come autostrade tortuose e strade con ponti.

I parametri per l'algoritmo LIMERIC relativi a questo scenario denso vengono aggiornati come mostrato nella seconda colonna della Tabella 2.

$\alpha$	0.1	0.01
$\beta$	0.00167	0.001
CBR Target	0.79	0.65

Il lavoro in [18] utilizza un valore più alto per il parametro CBRtarget, che, in combinazione con i valori di alfa e beta, si traduce in una grande variazione del CBR a cui converge l'algoritmo a diverse densità di veicoli.

Un altro aggiornamento di LIMERIC è proposto in [19], dove si considerano valori per alfa e beta più vicini a quelli adottati dall'approccio adattivo ETSI.

Per entrambi gli aggiornamenti — [18] e [19] — mentre i valori per questi parametri cambiano, il modo in cui viene aggiornata la velocità di trasmissione per ciascun veicolo non cambia rispetto a quello proposto nell'equazione di partenza.

### 4.3 Approccio Adattivo ETSI: ETSI TS 102 687 V1.2.1

L'approccio adattivo è stato definito inizialmente in ETSI TS 102 687 V1.2.1 [15] nel 2018. La sua logica si basa su LIMERIC, ma aggiunge più parametri per controllare la velocità di aggiornamento.

Questo algoritmo si basa su misurazioni delle CBR locali, consentendo anche l'uso di misurazioni CBR globali quando è supportata la condivisione delle informazioni.

L'algoritmo che ogni veicolo esegue per aggiornare la propria velocità di trasmissione per l'istante  $n$  è il seguente:

**Step 1:**

$$CBR_{vehicle}(n) = 0.5 \cdot CBR_{vehicle}(n - 1) + 0.5 \cdot ((CBR_L + CBR_{LPrev})/2)$$

Step 2:

If  $\text{sign}(CBR_{target} - CBR_{vehicle}(n))$  is positive then

$$\begin{aligned} \delta_{offset} \\ = \min(\beta \cdot (CBR_{target} - CBR_{vehicle}(n)), G_{max}^+); \end{aligned}$$

Else

$$\begin{aligned} \delta_{offset} \\ = \max(\beta \cdot (CBR_{target} - CBR_{vehicle}(n)), G_{max}^-); \end{aligned}$$

Step 3:

$$\delta(n) = (1 - \alpha) \cdot \delta(n - 1) + \delta_{offset}$$

Step 4:

$$\text{If } \delta(n) > \delta_{max}, \delta(n) = \delta_{max}$$

Step 5:

$$\text{If } \delta(n) < \delta_{min}, \delta(n) = \delta_{min}$$

Parameter	Value	Description
$\alpha$	0.016	Weight given to $\delta(n - 1)$
$\beta$	0.0012	Algorithm parameter
$CBR_{target}$	0.68	The adaptive approach updates $\delta$ so that CBR adapts to this target
$\delta_{max}$	0.03	Upper bound on allowed fraction of medium usage
$\delta_{min}$	0.0006	Lower bound on allowed fraction of medium usage, to prevent starvation under high CBR
$G_{max}^+$	0.0005	Algorithm parameter
$G_{max}^-$	-0.00025	Algorithm parameter
$T_{CBR}$	100 ms	Interval over which CBR is measured. $\delta$ is updated at twice this interval

Il valore  $\delta(n)$  ottenuto viene quindi utilizzato per calcolare il tempo per la trasmissione successiva.

Il valore per la durata della trasmissione dell'ultimo pacchetto ( $T_{onpp}$ ) viene utilizzato come riferimento per calcolare il tempo di attesa per la successiva trasmissione ( $T_{go}$ ) dopo che l'ultima trasmissione è terminata ( $T_{pg}$ ). Questo tempo di attesa ( $T_{go}$ ) è vincolato ai valori massimo e minimo stabiliti da ETSI EN 302 571 V2.1.1 [21], che limita un veicolo a trasmettere a intervalli non inferiori a 25 millisecondi e non superiori a 1 secondo.

$$T_{go} = T_{pg} + \min(\max(T_{onpp}/\delta, 25\text{ms}), 1\text{s})$$

Sebbene i valori dei parametri per l'approccio adattivo ETSI differiscano notevolmente dalle prime iterazioni di LIMERIC, la logica che vi è alla base è giustificata.

Il valore di alfa è inferiore di quasi un ordine di grandezza, il che consente al CBR aggregato di essere più vicino al  $CBR_{target}$  quando il sistema raggiunge la convergenza.

Un problema sorge con questo valore basso, perché la velocità di convergenza risulta essere più lenta [16].

Ciò ha effetto anche sull'equità in situazioni transitorie, poiché il termine  $(1-\alpha) \cdot \delta$  nell'equazione rappresenta la parte del valore precedente di  $\delta$  che il veicolo fornisce per il calcolo successivo.

Vale la pena notare che l'algoritmo non consente a  $\delta$  di scendere al di sotto di  $\delta_{min}$ , il che significa che il sistema può gestire fino a 1133,33 veicoli prima di superare l'occupazione target.

## 4.4 DUAL- $\alpha$ DCC

Sebbene i parametri dell'approccio adattivo ETSI siano utili per scenari ad alta e bassa densità, esiste un compromesso quando si considera la velocità della metrica di convergenza.

Come descritto in [16], un piccolo valore di alfa, come quello utilizzato nell'approccio adattivo ETSI DCC, si traduce in un utilizzo del mezzo in situazioni di stato stazionario vicino al target previsto, ma riduce la capacità di abbassare la quota allocata del mezzo ai veicoli quando necessario. Ciò può comportare dei periodi di congestione e/o iniquità.

D'altra parte, un valore di alfa elevato si traduce in un utilizzo del mezzo in situazioni di stato stazionario che è più al di sotto dell'obiettivo previsto, ma con una migliore capacità di ridurre la quota assegnata del mezzo ai veicoli quando necessario.

Per affrontare questo compromesso, si propone in [16] di utilizzare un valore grande di alfa quando  $\delta$  sta diminuendo, per ridurre il tempo, mentre si utilizza il valore standardizzato per alfa per il resto del tempo, per mantenere il CBR vicino all'utilizzo target.

L'algoritmo DUAL-  $\alpha$ , a tal proposito, calcola alfa come segue:

$$\alpha(n) = \begin{cases} \alpha_{high} & \text{if } (\delta(n-1) - \delta_{\alpha_{low}}(n)) > th \\ \alpha_{low} & \text{otherwise} \end{cases}$$

I parametri proposti per l'algoritmo Dual- $\alpha$  sono presentati in Tabella 4, con il resto dei parametri uguali a quelli in Tabella 3.

**TABLE 4. Parameter values of the dual- $\alpha$  DCC algorithm**

Parameter	Value
$\alpha_{low}$	0.016
$\alpha_{high}$	0.1
$th$	0.00001

I risultati in [16] mostrano che l'uso di due valori per  $\alpha$  aumenta la velocità di convergenza e migliora l'equità in situazioni transitorie.

Tuttavia, il lavoro effettuato si basa su risultati analitici e su simulazioni di scenari transitori con veicoli statici.

Una domanda aperta su Dual- $\alpha$  è se può raggiungere le prestazioni dell'approccio adattivo ETSI DCC in scenari di stato stazionario.

Di seguito saranno presentati tre modelli di simulazione (uno stazionario e due transitori) insieme alle metriche di prestazione.

## 4.5 Metriche di prestazione per lo studio

Lo scopo finale dei meccanismi DCC che verranno analizzati, è mantenere il CBR al di sotto di un obiettivo, quindi una delle metriche che si utilizzano per analizzare le prestazioni di questi meccanismi DCC è come si comporta il CBR, e i valori di  $\delta$  che lo definiscono, negli scenari simulati.

Tuttavia diversi tipi di applicazioni richiedono diversi tipi di parametri.

La seconda metrica considerata è il “Packet Delivery Ratio” (PDR), cioè la percentuale di ricezioni registrate nei veicoli remoti rispetto a tutti i messaggi generati da un veicolo host. Il PDR può essere influenzato da fattori quali la distanza tra i veicoli trasmettenti e ricevanti (a causa di perdita di percorso e interferenza) o in alcuni casi a causa di collisioni.

La terza e ultima metrica è il gap tra pacchetti, cioè il tempo che intercorre tra due messaggi ricevuti dallo stesso veicolo.

Ciò ha un effetto sulle prestazioni dei servizi di sensibilizzazione, in cui la mancanza di informazioni aggiornate potrebbe portare a una differenza tra la posizione prevista e quella effettiva di un veicolo remoto.

## 4.6 Modelli di simulazione e risultati dello studio

Valutiamo le prestazioni del meccanismo ETSI Adaptive Approach DCC [15] e lo confrontiamo con due algoritmi correlati: LIMERIC [7] e Dual- $\alpha$  [16].

LIMERIC di [18] è stato scelto per il suo CBRtarget (0,79), diverso da quelli in [17] e [19]. La logica alla base del target 0,79 è compensare un parametro  $\alpha$  elevato, che mantenga il punto di convergenza lontano dal target.

D'ora in poi, LIMERIC da [18] sarà indicato come LIMERIC 0,79.

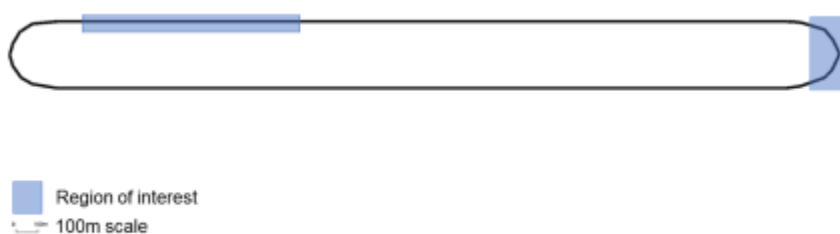
Gli algoritmi vengono valutati in tre scenari dinamici: uno in cui gli algoritmi sono in una situazione di stato stazionario e due che testano la loro reazione in situazioni transitorie.

### 4.6.1 Primo modello: scenario stazionario

Il primo scenario di prova, chiamato “Oval Scenario”, è una strada ovale di 7,75 km con quattro corsie, due in ciascuna direzione, con lunghi rettilinei e curve ai bordi.

Lo scopo di questo scenario è quello di testare i meccanismi in situazioni in cui la dinamica del veicolo rimane in uno stato stazionario per quanto riguarda la velocità media e l'accelerazione.

La Fig. 2 mostra lo schema di questo scenario, evidenziando le Regioni di Interesse (ROI): un tratto rettilineo e una curva.



**FIGURE 2. Oval Scenario.**

La simulazione viene eseguita per un periodo di tempo fino al raggiungimento della densità target.

Quindi, le misurazioni vengono effettuate nelle due ROI durante 120s.

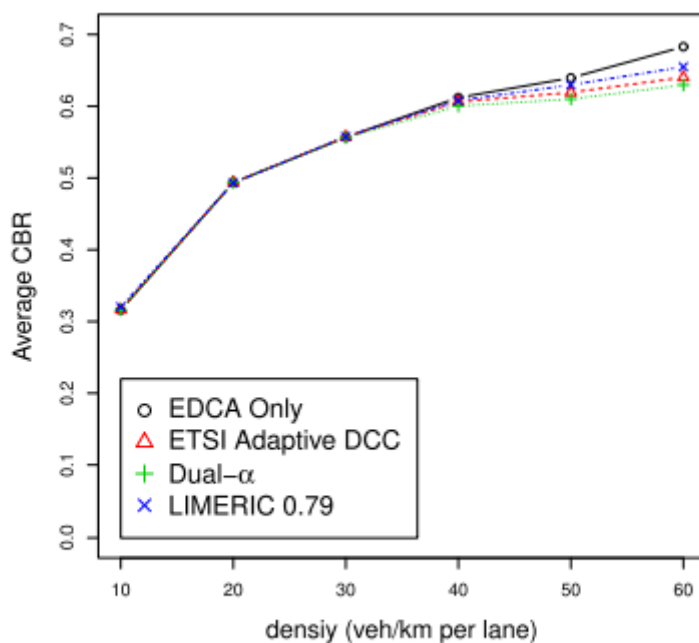
Vengono utilizzate sei diverse densità di veicoli, da 10 a 60 veicoli/km per corsia.

Le velocità del veicolo sono limitate dal limite di velocità massimo stabilito dalla strada (33 m/s) e dalla densità del veicolo, con densità più elevate che causano velocità medie inferiori e altri movimenti come frenate, accelerazioni e sterzate.

Per questo scenario, inizialmente, si considera solo il servizio CAM, dove i cambiamenti nella dinamica del veicolo come velocità e direzione, insieme alle strutture DCC, innescano la generazione di messaggi all'interno dei limiti di tempo inferiore e superiore rispettivamente di 0,1 e 1 secondo.

Tra questi due limiti, la velocità di generazione del messaggio è controllata dalle informazioni di feedback provenienti dal livello di gestione DCC verso i livelli inferiori, fornendo l'intervallo di tempo minimo tra due generazioni consecutive.

Se il tempo trascorso dall'ultima generazione del CAM supera l'intervallo di tempo fornito da DCC, le condizioni di attivazione (cioè la dinamica del veicolo) vengono verificate per generare un messaggio.



**FIGURE 3.** Average channel occupation for densities of 10-60 veh/km per lane.

La Fig. 3 mostra che l'occupazione del canale rimane ben al di sotto del valore target dell'ETSI Adaptive Approach e del Dual-  $\alpha$  (0,68) e a quello di LIMERIC 0,79 (0,79) per densità fino a 40 veh/km per corsia.

Ciò significa che DCC consente a tutto il traffico di essere gestito da EDCA, il che si riflette sulle metriche.



**TABLE 7. Average time between the generation of consecutive CAM messages.**

Curve				
Density	EDCA only	ETSI	Dual- $\alpha$	LIMERIC 0.79
10	0.1591 s	0.1591 s	0.1591 s	0.1591 s
20	0.1612 s	0.1612 s	0.1612 s	0.1612 s
30	0.2316 s	0.2316 s	0.2316 s	0.2316 s
40	0.2564 s	0.2564 s	0.2570 s	0.2588 s
50	0.2957 s	0.3088 s	0.3087 s	0.2990 s
60	0.2773 s	0.2781 s	0.2778 s	0.2779 s

Straight Stretch				
Density	EDCA only	ETSI	Dual- $\alpha$	LIMERIC 0.79
10	0.1642 s	0.1642 s	0.1642 s	0.1642 s
20	0.2224 s	0.2224 s	0.2224 s	0.2224 s
30	0.2153 s	0.2153 s	0.2153 s	0.2153 s
40	0.2745 s	0.2745 s	0.2746 s	0.2855 s
50	0.3057 s	0.3292 s	0.3322 s	0.3179 s
60	0.3069 s	0.3493 s	0.3523 s	0.3228 s

Il tempo medio tra la generazione di due messaggi CAM, per entrambe le ROI, è riportato nella Tabella 7, che include anche una colonna solo per EDCA.

I messaggi CAM vengono generati, al massimo, alla velocità consentita dal meccanismo DCC.

Pertanto, in assenza di un altro tipo di traffico in un veicolo, la velocità di generazione è uguale alla velocità di trasmissione.

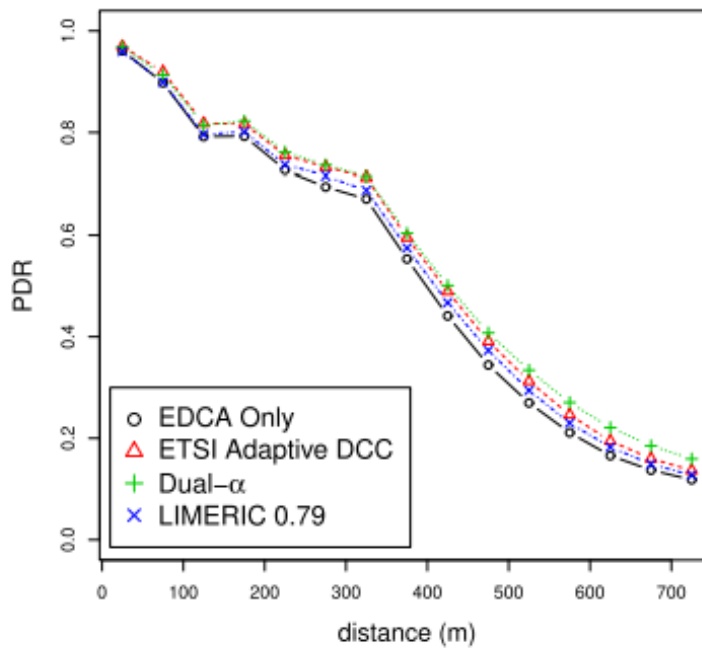
Sono stati eseguiti esperimenti per le due ROI (curva e tratto rettilineo) e sono stati ottenuti risultati simili, con il tratto rettilineo più interessante poiché mostra un carico maggiore a causa della topologia dello scenario.

Per questo motivo, da questo momento in poi, verranno mostrati solamente i risultati relativi al tratto rettilineo (ROI straight stretch).

Quando la densità aumenta a 50 o 60 veicoli/km per corsia, compare un divario tra i valori medi del CBR (Fig. 3).

I meccanismi DCC iniziano ad agire in modo che l'occupazione del canale rimanga al di sotto dei loro obiettivi.

La tabella 7 mostra come, per 50 e 60 veicoli/km per densità di corsia, i meccanismi DCC ritardano la generazione dei messaggi CAM più a lungo di quanto richiesto dalla dinamica (come si vede nella colonna EDCA).



**FIGURE 6. Average Packet Delivery Ratio for a density of 50 veh/km per lane (straight stretch).**

C'è un effetto sui valori PDR, che iniziano a scendere al di sotto dell'80% delle percentuali di successo a distanze più brevi come mostrato in Fig. 6 per una densità di 50 veicoli/km per corsia.

Dual-alfa, invece, sembra essere in grado di sfruttare la sua capacità di adattarsi ai cambiamenti per ottenere divari inferiori tra i pacchetti.

Questi risultati, in scenari conformi alle regole standardizzate, mostrano l'effetto positivo dei meccanismi DCC.

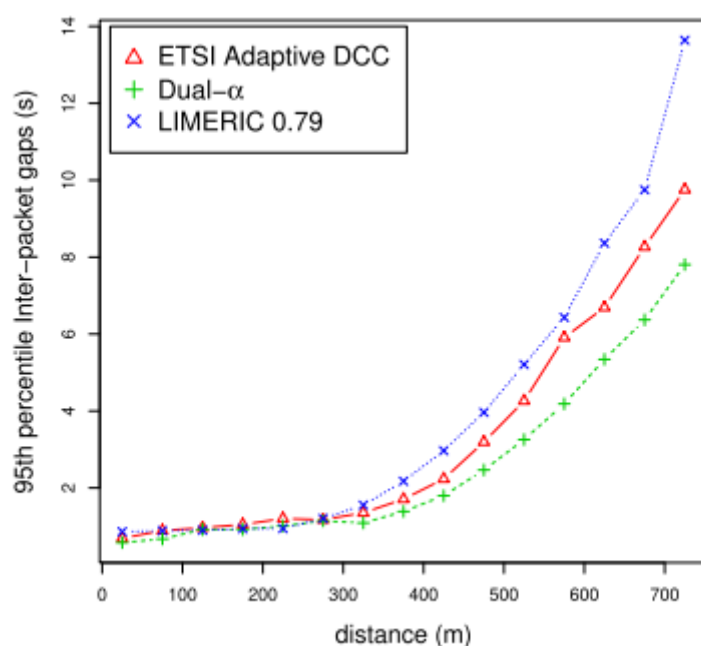
Tutti gli algoritmi DCC generano e inviano meno messaggi ma, poiché utilizzano il mezzo in modo più efficiente non congestionandolo, si comportano meglio nelle metriche PDR e interpackage gap rispetto all'utilizzo del solo EDCA.

Per valutare ulteriormente le prestazioni dei diversi meccanismi DCC, si considerano due densità, 20 e 50 veicoli/km per corsia, e si esegue un test in cui un altro tipo di traffico, traffico di sottofondo, coesiste con i messaggi CAM utilizzati negli scenari sopra illustrati. Ciò significa che i messaggi in background verranno inviati quando il meccanismo DCC consente l'invio di un pacchetto e non c'è un messaggio CAM in attesa di essere inviato. Questa configurazione mostra le prestazioni dei meccanismi DCC quando il traffico offerto è maggiore del traffico che il mezzo può accettare e i meccanismi DCC devono lavorare costantemente per mantenere l'utilizzo del mezzo al valore target per evitare congestioni.

Per la densità più bassa (20 veicoli/km per corsia), le ricezioni riuscite diminuiscono in presenza di traffico in background.

LIMERIC 0,79 mantiene i gap tra pacchetti inferiori, in particolare a distanze maggiori, rispetto agli algoritmi ETSI e Dual-alfa DCC.

Questo è a causa del fatto che, a basse densità, LIMERIC 0,79 converge a un utilizzo medio inferiore (0,58 in questo esperimento) a quello dei meccanismi ETSI Adaptive DCC e Dual-  $\alpha$ .



Lo svantaggio di LIMERIC 0,79 è che potrebbe inviare meno traffico in background con successo.

Per la densità di 50 veicoli/km per corsia, la figura in alto conferma che i veicoli possono tenere traccia dei vicini più distanti quando i meccanismi DCC utilizzano parametri più severi (ad es. target CBR inferiori), anche con il traffico in background, grazie alla maggiore priorità dei messaggi CAM.

LIMERIC 0,79 paga un prezzo in termini di prestazioni per avere un obiettivo CBR più alto, che a densità elevate si traduce in un utilizzo elevato: il traffico in background viene inviato perché l'algoritmo ritiene che ci siano risorse sufficienti sul supporto e le sue prestazioni (PDR e gap tra pacchetti) per il traffico CAM si degradano.

Tuttavia, si verifica un fenomeno quando i messaggi CAM coesistono con il traffico in background.

Se il valore di alfa consente ai veicoli di trasmettere messaggi CAM e parte del traffico in background, la tariffa fornita dalle strutture DCC potrebbe non coincidere con la prossima volta che il veicolo è autorizzato a trasmettere (cioè, quando DCC lo consente).

Questo fenomeno provoca un aumento del tempo tra la generazione di un messaggio CAM e la sua ricezione in un veicolo remoto.

I risultati portano, perciò, a diverse conclusioni:

- 1) E' necessario il controllo della congestione, poiché mantiene le metriche a livelli accettabili rispetto all'assenza di meccanismi DCC a partire dai livelli di densità dei veicoli.
- 2) La combinazione dei parametri in LIMERIC 0.79 provoca un sottoutilizzo del mezzo con un basso numero di veicoli e un sovrautilizzo ad alta densità, influenzando le prestazioni dell'algoritmo.
- 3) Dual-  $\alpha$  riesce a ottenere prestazioni simili, o anche leggermente migliori, al meccanismo ETSI in condizioni stazionarie.

#### **4.6.2 Secondo modello: primo scenario transitorio**

Il primo scenario transitorio è una strada con un semaforo che controlla l'ingresso in una superstrada.

Si misurano la velocità di convergenza e il suo effetto.

Un gruppo di auto attende con il semaforo rosso prima di una curva che li porterà in autostrada.

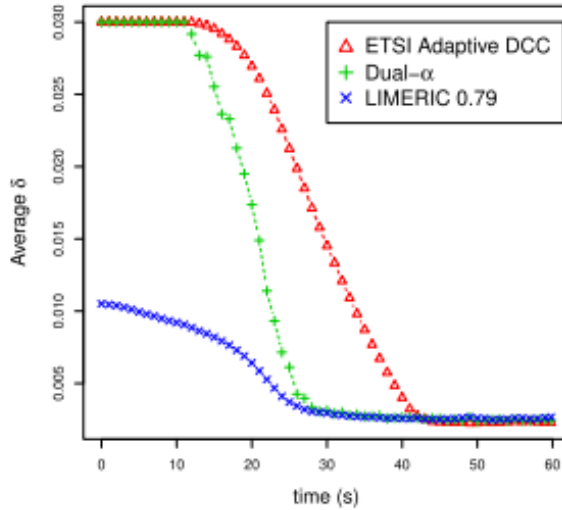
Mentre aspettano con la luce rossa, la loro velocità di generazione di messaggi CAM dinamici scende al minimo.

Quando il gruppo inizia a muoversi, le dinamiche del veicolo cambiano e la velocità di trasmissione dei messaggi deve adattarsi rapidamente e mantenere l'utilizzo del canale entro i limiti.

Questo scenario, in cui viene valutata la convergenza, è quello in cui un gruppo di 300 auto distribuito su sei corsie si ferma al semaforo e la dinamica fa sì che i veicoli generino e trasmettano messaggi CAM ad una frequenza minima (1 Hz).

Questa bassa velocità di messaggi riduce l'occupazione del canale, che porta  $\alpha$  a un valore alto vicino ad  $\alpha$ -max.

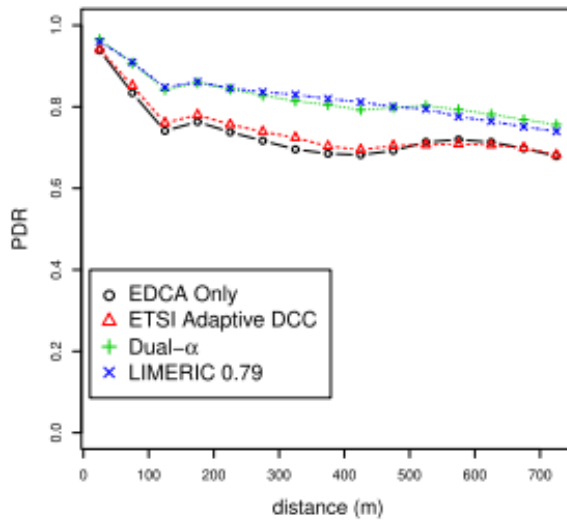
Quando le auto iniziano a muoversi, la dinamica porta la generazione del messaggio ad una velocità maggiore, vicina al massimo di 10 Hz stabilito.



**FIGURE 12.** Evolution of  $\delta$  for the Traffic Light Scenario.

Come si può vedere in Fig. 12,  $\alpha$  si riduce ad un valore che corrisponde alla dimensione e alla dinamica del gruppo di veicoli in movimento dopo che il semaforo ha consentito loro di avanzare.

Questo è un esempio dell'effetto di sottoutilizzo che deriva dalla combinazione di parametri in LIMERIC 0,79.



**FIGURE 14.** Packet Delivery Ratio in the saturated zone ( $25s < t < 45s$ ).

L'effetto di non essere in grado di mantenere l'occupazione al di sotto dell'obiettivo di 0,68 è mostrato nella Fig. 14, che mostra i valori del PDR nel momento in cui il meccanismo dell'approccio adattivo ETSI non è in grado di mantenere l'occupazione al di sotto del suo obiettivo.

Per lo stesso arco di tempo, Dual-  $\alpha$  e LIMERIC 0,79 riescono a mantenere il PDR sopra l'80%, mentre gli altri approcci sono costantemente al di sotto.

Ci sono diverse conclusioni provenienti da questi risultati:

- 1) Il mantenimento delle condizioni del canale entro un certo limite ( $CBR < 0,68$ ) consente a parametri come il PDR di rimanere in una regione accettabile.
- 2) Il parametro  $\alpha$  nell'algoritmo ETSI può far reagire lentamente il sistema in situazioni transitorie mentre l'uso di due valori per  $\alpha$  può aiutare il sistema a reagire più velocemente e mantenere i livelli di PDR e le lacune tra i pacchetti a un livello desiderabile.
- 3) La combinazione dei parametri per LIMERIC 0,79 consente di convergere più velocemente rispetto al meccanismo ETSI Adaptive DCC, ma con un compromesso che si presenta sotto forma di una limitazione più stretta al traffico che un veicolo può inviare anche quando il mezzo è sottoutilizzato.

#### **4.6.3 Terzo modello: secondo scenario transitorio**

L'ultimo scenario è un incrocio in cui un piccolo gruppo di 25 auto su un'autostrada a due corsie si ingloba in un gruppo più ampio di 300 veicoli che circolano su un'autostrada a sei corsie, in cui viene valutata l'equità.

Le auto nel piccolo gruppo percepiscono un'occupazione del canale inferiore, che consente loro di trasmettere la maggior parte dei messaggi che generano, mentre il gruppo più grande percepisce un'occupazione maggiore che fa sì che modulino di conseguenza la loro velocità di trasmissione.

L'obiettivo di questo scenario è valutare la velocità con cui i due gruppi regolano i loro tassi di trasmissione e generazione dopo la fusione.

Tutti i veicoli generano messaggi CAM con priorità maggiore rispetto al traffico in background.

Il traffico in background, come sopra, è generato in modo che ogni veicolo abbia almeno un messaggio da trasmettere in un dato momento, il che si traduce nel raggiungimento del massimo utilizzo del mezzo consentito dai meccanismi DCC.

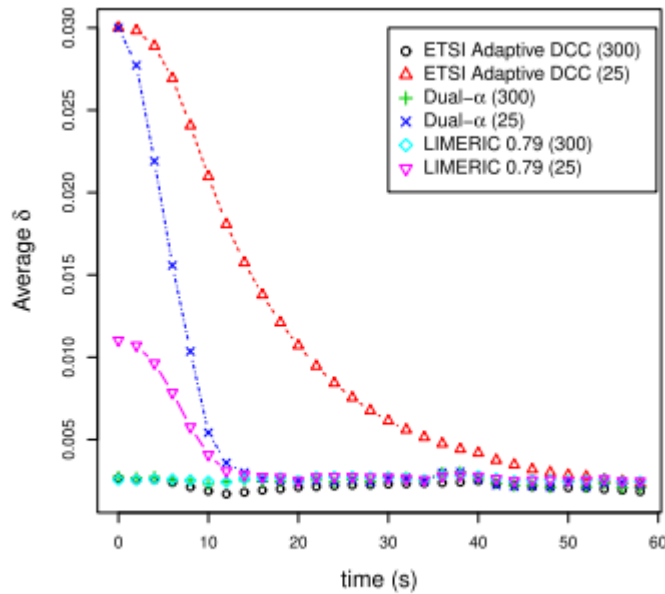
Le misure vengono prese per 60 secondi.

Prima della fusione, con ETSI Adaptive DCC e Dual-  $\alpha$ , i veicoli nel gruppo da 25 vengono fatti convergere a un  $\delta$  vicino a  $\delta_{\max}$  nei parametri del meccanismo ETSI DCC Adaptive Approach, consentendo loro di trasmettere a 40 Hz, cioè trasmettendo ogni messaggio che generano.

Con LIMERIC 0,79, il  $\delta$  ottenuto è il 37% di  $\delta_{\max}$ , a causa del sottoutilizzo del mezzo quando si utilizza questo meccanismo a basse densità.

I veicoli nel grande gruppo hanno valori di  $\delta$  che corrispondono al punto di convergenza per ciascun meccanismo.

Tutte le auto del piccolo gruppo iniziano a sentire i messaggi del grande gruppo, il che aumenta l'occupazione del canale che misurano e li spinge ad abbassare di conseguenza il loro  $\delta$ .



**FIGURE 16.** Evolution of  $\delta$  between vehicles in one large and one small groups.

La Fig. 16 mostra che l'algoritmo ETSI Adaptive DCC impiega circa tre volte più tempo per convergere rispetto ai meccanismi DCC con valori  $\alpha$  più elevati.

LIMERIC 0,79 converge alla velocità di Dual-  $\alpha$ , ma parte da un valore  $\delta$  inferiore che si riflette sulla quantità di traffico che consente al piccolo gruppo di essere trasmesso.

Come si vede in figura,  $\delta$  per il piccolo gruppo scende lentamente per l'algoritmo ETSI e i veicoli possono inviare non solo il loro traffico CAM, ma anche una grande quantità di messaggi di sottofondo.

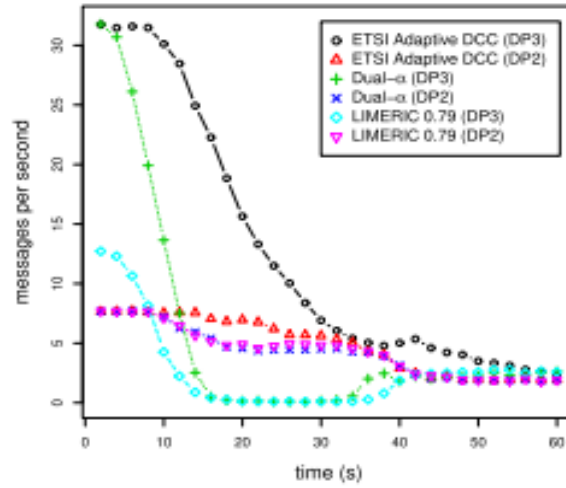
In LIMERIC 0,79 e Dual-  $\alpha$ , dopo 13 secondi,  $\delta$  è lo stesso per i veicoli nei gruppi piccoli e grandi, ma i veicoli lo utilizzano in modo diverso.

Nel piccolo gruppo, i veicoli inviano il traffico CAM richiesto dalla loro dinamica (stanno svoltando e inglobando sulla strada principale), mentre il traffico in background non può essere inviato perché il traffico CAM utilizza la quota completa del mezzo assegnato a ciascun veicolo.

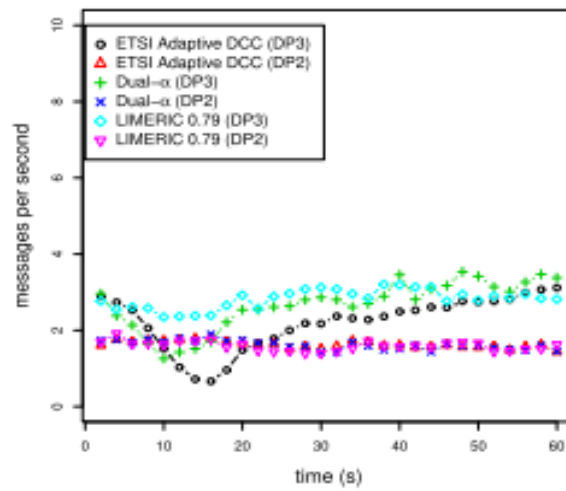
Con il passare del tempo, c'è una diminuzione della dinamica del veicolo, poiché i veicoli nel piccolo gruppo sono incorporati nelle dinamiche di movimento del grande gruppo, quindi è necessario meno traffico CAM e inizia a essere inviato il traffico in background.

Nel gruppo numeroso, all'inizio, il traffico CAM necessario è inferiore (a causa della dinamica del veicolo) e i veicoli possono anche inviare traffico in background.

Si noti che, in LIMERIC 0,79 e Dual-  $\alpha$ , il numero totale di messaggi inviati è lo stesso in entrambi i gruppi (come previsto perché  $\delta$  è lo stesso) ma viene utilizzato in modo diverso a seconda della dinamica del veicolo.



(a) Small Group (25 vehicles)



(b) Large Group (300 vehicles)

**FIGURE 18. Average DP2 and DP3 messages transmitted per second in the Junction Scenario.**

Le differenze nell'equità si possono vedere nella Fig. 18, che rappresenta il numero medio di messaggi che ogni veicolo nei gruppi piccoli e grandi può trasmettere.

In conclusione, l'uso di un valore alto per  $\alpha$  migliora l'equità in situazioni transitorie, come si può vedere in Fig. 16 dove  $\delta$  per i due gruppi converge tre volte più velocemente con LIMERIC 0,79 ( $\alpha = 0,1$ ) e Dual- $\alpha$  ( $\alpha$ -high = 0,1) rispetto all'ETSI Adaptive DCC ( $\alpha = 0,016$ ).



## *Conclusione*

In questo elaborato è stato svolto uno studio volto a indagare in profondità le prestazioni dei meccanismi DCC come attualmente specificate da ETSI.

L'introduzione al controllo di congestione decentralizzato DCC deriva da una attenta analisi del protocollo IEEE 802.11p, non adatto in scenari congestionati in quanto non può garantire le esigenze di affidabilità e tempestività nella trasmissione dei messaggi, causando problemi di sicurezza nelle reti veicolari.

E' stato appurato che TRC e TPC sono i meccanismi che, in un approccio reattivo ETSI, interessano principalmente il comportamento complessivo dello schema DCC e i risultati raggiunti mostrano che sono altamente sensibili alle impostazioni dei parametri di adattamento.

I parametri di soglia CL dovrebbero essere impostati con cura per ridurre gli eventi di commutazione tra gli stati, con conseguente fluttuazione del carico del canale.

Dal momento che le misurazioni CL rappresentano valori istantanei, cioè danno un'indicazione sul fatto che il canale viene rilevato come occupato o meno in un dato istante, è stata introdotta una nuova metrica accurata, il CBR, uno dei capisaldi della nuova DCC, affrontando l'analisi della correlazione tra occupazione del canale e numero dei vicini ad un nodo.

Infine, è stata presentata un'analisi dell'approccio adattivo ETSI nelle comunicazioni veicolari e i relativi algoritmi.

Questo approccio funziona bene su un'ampia gamma di densità di veicoli.

In particolare, se confrontato con l'assenza di un meccanismo DCC (vale a dire, utilizzando solo EDCA), anche in scenari di bassa congestione della rete, l'uso del meccanismo ETSI Adaptive Approach migliora parametri come il Packet Delivery Ratio (PDR) e la frequenza con cui i veicoli remoti ricevono aggiornamenti da altri veicoli.

Tuttavia, i parametri impostati dall'approccio adattivo ETSI rallentano la convergenza dell'algoritmo in scenari transitori.

Una soluzione che è stata provata consiste nell'avere un valore elevato per  $\alpha$  e aumentare il CBRtarget (LIMERIC 0,79), ma è stato dimostrato che questa combinazione di parametri è molto sensibile alla densità dei veicoli e al traffico generato, provocando situazioni di sottoutilizzo e sovrautilizzo del mezzo.

Dual- $\alpha$ , utilizzando due valori per  $\alpha$ , raggiunge una velocità di convergenza migliore ed equità in scenari transitori, pur convergendo verso un utilizzo vicino all'obiettivo CBR. Inoltre si comporta in modo simile, se non leggermente migliore, all'approccio adattivo ETSI in scenari con condizioni stazionarie, superandolo in situazioni transitorie.

Va considerato, però, che l'approccio ETSI DCC Adaptive si basa su rigorose proprietà di convergenza, mentre l'uso di due valori di  $\alpha$  in Dual- $\alpha$ , potenzialmente, potrebbe creare piccole oscillazioni nella frazione di spettro allocata intorno al punto di convergenza.

Quindi, i vantaggi del Dual- $\alpha$  osservati nella pratica, dovrebbero essere attentamente bilanciati rispetto alle solide proprietà teoriche dell'approccio ETSI DCC Adaptive.

## ***Bibliografia***

- [1] Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular communications; Basic set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service, Standard EN 302 637-2, V1.4.1, European Telecommunications Standards Institute, Apr. 2019.
- [2] ETSI TS 102 687 V1.1.1, “Intelligent Transport Systems (ITS); Decentralized Congestion Control Mechanisms for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz range; Access layer part,” July 2011.
- [3] J. Daniel, Q. Chen, and L. Delgrossi, “Optimal data rate selection for vehicle safety communications,” In ACM VANET 2008.
- [4] B. Kloiber, et. al., “Dice the TX power - Improving awareness quality in VANETs by random transmit power selection,” In IEEE VNC, 2012.
- [5] DRAFT ETSI TS 103 141 “Intelligent Transport Systems; Facilities layer; Communication congestion control,” 2013.
- [6] DRAFT ETSI TS 102 636-4-2, “Intelligent Transportation Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 4: Geographical Addressing and Forwarding for Point-to-Point and Point-to-Multipoint Communications; Sub-part 2”, 2013.
- [7] ETSI EN 102 637-2, “ITS; Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service,” June 2012.
- [8] C. Campolo, A. Molinaro, “Multichannel Communications in Vehicular Ad Hoc Networks: A Survey,” IEEE Comm. Magazine, vol. 51, no. 5, pp. 158-169, 2013.
- [9] IEEE Std. 802.11-2012: “IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks-Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications”
- [10] A. Autolitano, C. Campolo, A. Molinaro, R.M. Scopigno, A. Vesco, “An insight into Decentralized Congestion Control techniques for VANETs from ETSI TS 102 687 V1.1.1,” IEEE/IFIP Wireless Days (WD) 2013
- [11] Draft TS 102 687 V1.1.2, “Intelligent Transport Systems (ITS); Decentralized Congestion Control Mechanisms for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz range; Access layer part,” January 2014.
- [12] J. Kenney, et. al., “LIMERIC: A Linear Message Rate Control Algorithm for Vehicular DSRC Systems,” IEEE VNC, 2011.

- [13] T. Tielert, et. al., “Design Methodology and Evaluation of Rate Adaptation Based Congestion Control for Vehicle Safety Communications,” IEEE VNC, 2011.
- [14] H.A. Cozzetti, C. Campolo, R.M. Scopigno, A. Molinaro, “Urban vanets and hidden terminals: Evaluation through a realistic urban grid propagation model,” IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES), 2012.
- [15] Intelligent Transport Systems (ITS); Decentralized Congestion Control Mechanisms for Intelligent Transport Systems Operating in the 5 GHz Range; Access Layer Part, Standard EN 102 687, V1.2.1, European Telecommunications Standards Institute, Apr. 2018.
- [16] I. Soto, O. Amador, M. Uruena, and M. Calderon, “Strengths and weaknesses of the ETSI adaptive DCC algorithm: A proposal for improvement,” IEEE Commun. Lett., vol. 23, no. 5, pp. 802–805, May 2019.
- [17] G. Bansal, J. B. Kenney, and C. E. Rohrs, “LIMERIC: A linear adaptive message rate algorithm for DSRC congestion control,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 62, no. 9, p. 4182–4197, Nov. 2013.
- [18] A. Rostami, B. Cheng, G. Bansal, K. Sjoberg, M. Gruteser, and J. B. Kenney, “Stability challenges and enhancements for vehicular channel congestion control approaches,” IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 17, no. 10, pp. 2935–2948, Oct. 2016.
- [19] S. Kuhlorgen, H. Lu, A. Festag, J. Kenney, S. Gemsheim, and G. Fettweis, “Evaluation of congestion-enabled forwarding with mixed data traffic in vehicular communications,” IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 21, no. 1, pp. 233–247, Jan. 2020.
- [20] Intelligent Transport Systems (ITS); Access Layer Specification for Intelligent Transport Systems Operating in the 5 GHz Frequency Band, Standard EN 302 663, V1.2.1, European Telecommunications Standards Institute, Nov. 2012.
- [21] Intelligent Transport Systems (ITS); Radiocommunications Equipment Operating in the 5 855 MHz to 5 925 MHz Frequency Band; Harmonised Standard Covering the Essential Requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU, Standard EN 302 571, V2.1.1, European Telecommunications Standards Institute, Feb. 2017.

