### POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale Tesi di Laurea Magistrale



### Controllo attivo della scia di autoveicoli in configurazione di platooning mediante algoritmi genetici

Relatore: prof. Iuso Gaetano ing. Cafiero Gioacchino

Candidato: Mazzei Augusto s266743

Anno Accademico 2021-2022

### Abstract

Il seguente lavoro di tesi è incentrato sull'utilizzo combinato delle tecniche di platooning e di controllo attivo della scia di un veicolo da trasporto commerciale. La definizione delle leggi di controllo è basata su un approccio di tipo genetico (GA). L'obiettivo principale da conseguire è la riduzione del coefficiente di resistenza aerodinamica su un modello di veicolo, focalizzandosi sul massimo ottenibile in termini di riduzione del coefficiente di resistenza

L'algoritmo genetico richiede in input il valore della resistenza del veicolo ottenuto in seguito a diverse condizioni di forcing. I getti d'aria pressurizzata che sono iniettati attraverso delle fessure poste sulla base del modello possono descrivere segnali costanti nel tempo, oppure pulsati, di diversa complessità.

Considerato l'utilizzo di più prototipi nello stesso momento, il processo di ottimizzazione viene eseguito più volte in modo da valutare le prestazioni di platooning e forcing quando viene modificata la distanza tra i veicoli, la velocità, e quale tra i modelli sia designato al controllo della scia. Dato il numero consistente di scenari, ogni processo di ottimizzazione è stato sviluppato in modo tale da conseguire dei risultati nell'arco di tre o quattro ore.

La condizione di solo platooning, cioè senza la presenza di forcing attivo, che abbia prodotto il maggior beneficio prevede l'utilizzo in galleria del vento di due componenti con la stessa geometria distanziati di uno spazio pari alla metà della loro lunghezza, fornendo al contempo una riduzione aerodinamica del  $11 \div 17\%$  sul componente in testa, in base al numero di Reynolds associato alle condizioni, e del 45% per quello che segue.

Da questa impostazione, la tecnica di controllo ottimale della scia per tutte le condizioni risulta essere quella con getto costante nel tempo, con riduzione ulteriore tra il  $7 \div 27\%$ , seguita al secondo posto da quella con getto a doppia onda sinusoidale, di prestazioni lievemente inferiori, migliore della versione con singola sinusoide. L'utilizzo di controllo attivo si rivela preferibile sul veicolo in testa, mentre qualunque veicolo in coda trae un beneficio dal platooning così alto da rendere il forcing un miglioramento marginale.

La pressione fluttuante misurata sulla base del veicolo che attua il forcing viene analizzata mediante la trasformata di Wavelet e la cross-correlazione di diverse sonde. L'utilizzo del controllo attivo della scia è responsabile dell'aumento di pressione registrata alla base modello, con escursioni che variano a seconda del segnale di controllo impartito. I segnali vengono acquisiti in regioni spaziali distinte, e il picco di pressione è posizionato nella porzione laterale, piuttosto che nella regione inferiore o superiore del modello.

Si rivela utile per l'identificazione dei cambiamenti nella scia il confronto tra i risultati dei test condotti e i risultati caratterizzati dallo stesso numero di Reynolds ma in assenza di forcing. Utilizzando come test di riferimento il caso naturale isolato, cioè privo di forcing e con un singolo modello, la tecnica del platooning altera i segnali di pressione ma non la loro correlazione. L'utilizzo del forcing invece riesce a ottenere riduzioni ulteriori di resistenza aerodinamica rendendo regioni interne della scia indipendenti le une dalle altre.

### Indice

1	Introduzione1		1	
2	Algoritmo genetico			
	<b>2.1</b> Premessa			
	<b>2.2</b> Co	oncetti fondamentali	8	
	<b>2.3</b> Ai	nalisi del processo	10	
	<b>2.4</b> Di	ifferenze con i metodi iterativi classici	13	
	<b>2.5</b> Co	ontesto tecnologico odierno	14	
3	Set	up sperimentale	15	
	3.1	Galleria e modello	15	
	3.2	Sistema di attuazione dei getti	17	
	3.3	Sistema di misura	19	
4	Car	atteristiche del software di simulazione	21	
	4.1	Esposizione generale	21	
	4.2	Schema funzionale	24	
5	Pla	tooning e Forcing – performance individuali	26	
	5.1	Acquisizione dei CD nel caso naturale isolato	26	
	5.2	Configurazione con platooning passivo a 2-trucks	28	
	5.3	Configurazione con platooning passivo a 3-trucks	31	
	5.4	Applicazione del forcing sul singolo componente	34	
6	Val	idazione del codice genetico	38	
	6.1	Effetti del forcing nella configurazione di platooning	38	
	6.2	Tipologie di Forcing	40	
	6.3	Procedure di esecuzione dei test	42	
	6.4	Definizione dell'obiettivo di ottimizzazione	44	
	6.5	Performance dell'algoritmo genetico	45	
	6.6	Platooning con forcing e $d/L = 0.5$	51	
	6.7	Platooning con forcing: $d/L = 0.25 \text{ e} d/L = 3.00$	60	
	6.8	Analisi di Wavelet sul segnale di pressione fluttuante	62	
С	Conclusioni e sviluppi futuri			
Bi	Bibliografia			

### Indice delle figure

$\triangleright$	Figura 1.1   Evoluzione delle emissioni di CO2 g/km prodotte dalle automobili nuove	1
$\triangleright$	Figura 1.2   I tassi delle emissioni di CO₂ per modalità di trasporto	2
$\triangleright$	Figura 1.3   Visualizzazioni attorno al corpo di Ahmed a $Re_H$ = 310 (A), $Re_H$ = 415 (B e C) e $Re_H$	
	= 435 (D). Le figure a sinistra mostrano le streamline proiettate su di un piano in una vista	
	superiore e laterale, mentre le figure a destra mostrano le streamline nella scia 3D.	4
$\triangleright$	Figura 1.4   rappresentazione schematica di una manovra automobilistica con platooning. La	
	comunicazione e la cooperazione dei veicoli è tale da effettuare frenate in sicurezza attraverso	
	lo scambio di informazioni quali la velocità e la distanza reciproca.	5
$\triangleright$	Figura 2.1   Meccanismo di crossover, dove le caratteristiche dei genitori vengono	
,	ricombinate per la generazione di nuovi individui.	9
	Figura 3.1   Rappresentazione del prototipo.   segmenti rossi installati sul retro del convoglio	J
	contrassegnano gli slot di iniezione del sistema di controllo del flusso fonte [9]	16
	Eigura 3.2   Schema dell'attuatore Eonte[18]	18
6	Figura 3.2   Manne della disposizione delle cansule microfoniche e sonde di pressione	10
	Fonte[0]	20
0	Figura 4.1   Interfaccia di acquisizione	20 21
6	Figura 4.2   Flenco delle attività svolte durante un test elementare	21 25
6	Figura 5.1  Test in galleria della condizione naturale (singolo prototipo) al variare di 5	_ 25
	differenti velocità del vento	27
	Eigura 5.2   Variazioni del CD ottenute da platooning a due convogli in assenza di forcing	27 29
6	Figura 5.2   Vanazioni del Objettenute da platooning a due convegi in assenza di foreng.	2J 31
6	Figura 5.4   Alcupe delle prove di platooning a tre convogli effettuate con distanza uniforme:	51
	(a) $d/1 = 25\%$ (b) $d/1 = 50\%$ (c) $d/1 = 200\%$	22
0	Eigura 5.5   Variazioni del CD ottenute da platooning a tre convogli rispetto alla condizione	52
	naturale isolata, variando velocità del vento e distanza d/l	22
	Figura 5.6.   Velocità dei getti pneumatici in funzione della tensione di controllo. Valori	_ 55
	registrati da [18]	34
0	Figura 5.7   Forza prodotta dai getti in assenza di vento in funzione della tensione di controllo	_ 54
		25
		35 36
2	Figura 5.9   test forzato isolato (alta velocità) – Parametri forniti da RI	30 37
>	Figura 6.1   Effetti favorevoli dell'apertura massima dei getti front platooning (bassa velocità)	_ 57
		28
	Eigura 6.2   Effetto nullo dell'anertura massima dei getti, rear platooning (bassa velocità)	- 30 39
>	Figura 6.3     Effetti svantaggiosi dell'apertura massima dei getti, redi pidtooning (bassa velocita)	
	velocità)	20
Δ	Figura 6.4   Rilevazione del coefficiente di resistenza associato alla fase non forzata del test	_ 55
	(CD0) nel primo trimostre. Il primo grafico è testato per condizioni di rear platooning a bassa	
	(CD0) nel primo trimestre. Il primo granco e testato per condizioni di rear platooning a bassa volocità con d/1-0.25. Il socondo grafico à tostato per condizioni di rear platooning ad alta	
	velocità con $d/I = 0.25$ in secondo granco e testato per condizioni di real platoonilig du alta	10
Þ	Figura 6.5   Rilevazione del coefficiente di resistenza associato alla fase non forzata del tost	_ 43
-	(CD0) nel secondo trimestre. Il primo grafico è testato ner condizioni di front platocning a	
	$d_{1}$ (0.50) her secondo trimestre. Il printo granco è testato per condizioni di front platooning a	
	bassa velocità con d/L=0.5 il secondo granco e testato per condizioni di front platooning ad	лл
	מונמ עפוטנונמ נטוו ע/ ב–0.5	44

$\triangleright$	Figura 6.6   Andamento della fitness function dei test. Numero di Generazioni: 9, Individui: 20	
	Condizioni: rear platooning, d/L = 0.5, forcing di tipo 1 (costante)	_ 46
	Figura 6.7   Andamento dei parametri di ottimizzazione del medesimo scenario.	47
$\triangleright$	Figura 6.8   Rappresentazione su grafico polare degli individui più performanti.	48
$\triangleright$	Figura 6.9   Fitness function e schema polare di rear Platooning d/L=0.5, forcing costante	49
$\triangleright$	Figura 6.10   Fitness function e schema polare di rear Platooning d/L=0.5, forcing sinusoidale	49
	Figura 6.11   Fitness function e schema polare di rear Platooning d/L=0.5, forcing con doppia sinusoide	49
	Figura 6.12   Distribuzione dei parametri di ottimizzazione rispetto al valore di fitness corrispondente. (un buon valore di fitness è un valore in ascissa < 0)	51
	Figura 6.13   Performance di platooning e forcing. Confronto sulle metodologie di forcing a parità di condizioni di platooning.	53
۶	Figura 6.14   Ubicazione dei microfoni di riferimento. In riferimento all'illustrazione nel capitolo 3, tali punti coincidono con i microfoni n°6, 9, 16	55
	Eigura 6 15   Controllo ottimale della scia per ogni tipologia di forcing (rear platooning bassa	_ •••
	velocità)	56
	Figura 6.16  Controllo ottimale della scia per ogni tipologia di forcing (rear platooning, alta velocità)	57
	Figura 6.17   Controllo ottimale della scia per ogni tipologia di forcing (front platooning, bassa velocità)	57
	Figura 6.18   Controllo ottimale della scia per ogni tipologia di forcing (front platooning, alta	
	Figura 6.19   Test con forcing sinusoidale per rear platooning d/I=0.25	60
	Figura 6.20   Test con forcing sinusoidale per rear platooning d/L=3.0	60
	Figura 6.21   Scomposizione dei segnali di pressione microfonici (TOP, SIDE, BOT) con la	_
	trasformata Wavelet. Scala logaritmica, completa estensione temporale dell'esperimento. Si nota il cono di influenza in apertura e chiusura della simulazione	63
$\triangleright$	Figura 6.22   analisi wavelet della scia al variare del Reynolds. Scia associata al test di figura	_ 05
	5.1 (caso naturale isolato)	_ 64
	Figura 6.23  Analisi nel caso naturale isolato, bassa velocità	65
	Figura 6.24  Analisi nel caso naturale isolato, alta velocità	65
	Figura 6.25   Analisi wavelet della scia. Confronto tra situazione naturale e forzata. (bassa velocità, caso isolato, sinusoide propo sta con Reinforcement Learning)	66
	Figura 6.26   Analisi wavelet della scia. Confronto tra situazione naturale e forzata. (alta	_
	velocità, caso isolato, sinusoide proposta con Reinforcement Learning)	67
$\triangleright$	Figura 6.27   Analisi wavelet della scia. Confronto tra situazione naturale e forzata. (alta	
	velocità, rear platooning, forcing di tipo 1, riferimento a test di figura 6.16)	68
$\triangleright$	Figura 6.28   Analisi wavelet della scia. Confronto tra situazione naturale e forzata. (alta	
	velocità, rear platooning, forcing di tipo 2)	68
۶	Figura 6.29   Analisi wavelet della scia. Confronto tra situazione naturale e forzata. (alta	60
4	Eigura 6 20   Trasformata di Wavolat della scia, da cinistra versa destravi especialeta (hassa	09
-	velocità), - rear platooning ( d/L=0.5), - tecniche di forcing	_ 70
	Figura 6.31   Trasformata di Wavelet della scia, da sinistra verso destra: - caso isolato (bassa	
	velocità), - front platooning ( d/L=0.5), - tecniche di forcing.	_ 70

$\succ$	Figura 6.32   Trasformata wavelet della scia, da sinistra verso destra: - caso isolato (alta	
	velocità),  - rear platooning ( d/L=0.5),  - tecniche di forcing	_ 71
$\triangleright$	Figura 6.33   Trasformata wavelet della scia, da sinistra verso destra: - caso isolato (alta	
	velocità), - rear platooning ( d/L=0.5), - tecniche di forcing	_ 71
$\triangleright$	Figura 6.34   Nella prima fila: coefficienti normalizzati di cross correlazione dei segnali di	
	pressione al variare del parametro di delay 'tau' per i vari scenari; Nelle file successive: i segnali	
	di pressione dei microfoni TOP, SIDE, BOT. (bassa velocità, rear platooning, d/L=0.5)	_ 73
$\triangleright$	Figura 6.35   coefficienti normalizzati di cross correlazione dei segnali di pressione al variare	
	del parametro di delay 'tau' nei vari scenari (bassa velocità, front platooning, d/L=0.5)	_ 73
$\triangleright$	Figura 6.36   coefficienti normalizzati di cross correlazione dei segnali di pressione al variare	
	del parametro di delay 'tau' nei vari scenari (alta velocità, rear platooning, d/L=0.5)	_ 74
$\triangleright$	Figura 6.37   coefficienti normalizzati di cross correlazione dei segnali di pressione al variare	

del parametro di delay 'tau' nei vari scenari (altavelocità, front platooning, d/L=0.5) \_\_\_\_\_\_ 74

### Indice delle Tabelle

$\triangleright$	Tabella 5-1   Parametri ottimali (RL) sistema isolato forzato, Re $\sim \! 1.1 \cdot 105$	35
$\triangleright$	Tabella 5-2   Parametri ottimali (RL) sistema isolato forzato, Re $\sim \! 1.3 \cdot 105$	36
$\triangleright$	Tabella 6-1   Tipologie di forcing. Restrizioni sul segnale di controllo	40
$\triangleright$	Tabella 6-2   descrizione parametrica del segnale di forcing.	41
$\triangleright$	Tabella 6-3   scenari ottimizzati mediante GA	42
$\triangleright$	Tabella 6-4   Parametri soluzione del GA (rear platooning, d/L=0.5, bassa velocità)	58
$\triangleright$	Tabella 6-5   Parametri soluzione del GA (rear platooning, d/L=0.5, alta velocità)	59
$\triangleright$	Tabella 6-6   Parametri soluzione del GA (front platooning, d/L=0.5, bassa velocità)	59
$\triangleright$	Tabella 6-7   Parametri soluzione del GA (front platooning, d/L=0.5, alta velocità)	59
$\triangleright$	Tabella 6-8   forcing ottimale (rear platooning, d/L=0.25, bassa velocità)	61
$\triangleright$	Tabella 6-9   forcing ottimale (rear platooning, d/L=0.25, alta velocità)	61
$\triangleright$	Tabella 6-10   forcing ottimale (rear platooning, d/L=3, bassa velocità)	61
$\triangleright$	Tabella 6-11   forcing ottimale (rear platooning, d/L=3, alta velocità)	62

### 1 Introduzione

Lo studio e la validazione di tecniche innovative nel settore ingegneristico portano risultati che possono essere discussi alla luce di molteplici ottiche e in particolar modo, accantonando per un momento l'aspetto accademico, tecnologico ed economico. È impensabile non sottoporre in una tesi del nuovo millennio anche la questione ambientale, specialmente in ambito automotive.



Figura 1.1 | Evoluzione delle emissioni di C02 g/km prodotte dalle automobili nuove

Il contributo sulle emissioni di  $CO_2$  in Europa per il settore trasporti, il quale è responsabile di un quarto di quelle complessive, è determinato dal 71,7% da trasporto stradale, secondo l'Agenzia Europea dell'Ambiente. Va anche sottolineato che la diminuzione delle emissioni di gas serra ha recentemente subito un rallentamento, in contrasto agli standard ambiziosi verso cui l'Unione Europea vorrebbe proiettarsi nel 2050 per coronare la neutralità climatica ipotizzata nel Green Deal Europeo. Non

bisogna sorprendersi di questa controtendenza: ci sono settori che hanno ridotto drasticamente le emissioni dal 1990, ma non il settore automobilistico. Questo, in particolare, è legato indissolubilmente al fattore demografico e alla mobilità delle persone e delle merci che vengono acquistate. Sarebbe anche doveroso tralasciare le ambiguità, oltre che sulle statistiche fornite di anno in anno, anche sui criteri con cui si elegge una categoria di mezzi più inquinante rispetto alle altre. Infatti:

"Per quanto riguarda il trasporto su strada in Europa, le autovetture sono fra i mezzi più inquinanti, considerato che generano il 60,7% del totale delle emissioni di  $CO_2$ . D'altro canto, le auto potrebbero rientrare fra le modalità di trasporto più green se, anziché viaggiare da soli, ci fossero più passeggeri per singolo veicolo. La media, però, di 1.7 passeggeri per auto in Europa [...]"

fonte: Legislative Observatory [27]

#### LE EMISSIONI DI CO2 NEL SETTORE DEI TRASPORTI NELL'UE

## Ripartizione delle emissioni per modalità di trasporto (2016)



Figura 1.2 | I tassi delle emissioni di CO<sub>2</sub> per modalità di trasporto

Quindi, anziché dimostrare in che modo un autobus costituisca una soluzione più green di un'automobile o di un camion con rimorchio, è molto più pragmatico domandarsi come si possa ridurre l'impatto di tutti i veicoli che circolano attualmente e di quelli che lo faranno nell'immediato futuro. Un parametro determinante che fa capo a qualunque tipo di veicolo è la resistenza aerodinamica: una sua diminuzione comporterebbe una riduzione notevole delle emissioni, i veicoli utilizzerebbero meno potenza per percorrere lo stesso tratto e nelle stesse condizioni, ed una spesa minore sul carburante favorirebbe in maniera indiretta i costi di trasporto a carico delle imprese e i prezzi dei beni di esportazione.

La resistenza aerodinamica di un corpo è influenzata dalla geometria dello stesso e dalla sua velocità al quadrato; non guarda al meccanismo interno, non viene influenzata dal funzionamento del motore. Si può asserire che tutti i mezzi di trasporto possono essere comparati con lo stesso criterio, e che, a parità di veicolo, l'aumento di velocità richiama un forte incremento di resistenza con conseguente impatto ambientale. Per questo motivo, la tesi propone come soggetto principe della ricerca la classe di veicoli da trasporto merci, generalmente associati a corpi tozzi, dal momento che sono ampiamente utilizzati in tutti gli stati dell'UE, viaggiano ad alta velocità per larga parte del loro tempo operativo ed essendo poco aerodinamici per definizione presentano potenzialmente notevoli margini di miglioramento.

Trattando di resistenza aerodinamica di un veicolo si fa quindi un riferimento implicito alla scia che lascia dietro di sé durante il movimento. Quindi, ottimizzare la resistenza equivale ad ottimizzare le caratteristiche della scia, e tutte le tecniche principali si concentrano sulla regione posteriore del mezzo di trasporto. Sarebbe utile schematizzare la forma dei mezzi di trasporto pesante con il corpo di *Ahmed*[3], un solido elaborato su un parallelepipedo come baseline geometrica la cui parte anteriore viene resa curva, mentre quella posteriore mantenuta piatta o al più inclinata di un lieve angolo. Solitamente questa configurazione produce una scia a bassa pressione, proprio per la perpendicolarità tra la parete posteriore ed il suolo, e le tecniche di correzione odierne, attive o passive che siano, tendono a recuperare parte della pressione.

Prima di procedere, occorre descrivere più nel dettaglio le qualità della scia per questo tipo di corpi: malgrado la forma simmetrica e quasi elementare, la dinamica della scia rimane un fenomeno complesso, anche perché la sua separazione dal corpo è forte e spesso caratterizzata da generazione asimmetrica di vortici. La turbolenza per bassi

3

regimi di velocità è circoscritta secondo *Evstaf yeva et al.* [2] in due regioni di ricircolo simmetriche e stabili. L'analisi numerica posiziona queste due regioni sul piano orizzontale una accanto all'altra, mentre verticalmente una bolla di ricircolo rompe la simmetria creando uno *shear layer* che non trova corrispondenza nella zona inferiore, poiché nella sottoscocca non avviene ricircolo.



Figura 1.3 | Visualizzazioni attorno al corpo di Ahmed a  $Re_H = 310$  (A),  $Re_H = 415$  (B e C) e  $Re_H = 435$  (D). Le figure a sinistra mostrano le streamline proiettate su di un piano in una vista superiore e laterale, mentre le figure a destra mostrano le streamline nella scia 3D.

Aumentando il numero di Reynolds, tuttavia, *Haf fner et al.* [6] dimostrano che anche nella sottoscocca nasce ricircolo, e gli shear layer interagiscono sporcando la simmetria dei due vortici, pur mantenendoli ancorati al corpo. La configurazione è alterata già per valori di Reynolds relativi a regime laminare, ma ancora del tutto stabile, come evidenziato da *Grandemange et al.* [5], e si mantiene in questo stato anche in presenza di flusso ad alta turbolenza: aumentando progressivamente l'intensità della turbolenza nel flusso stesso si ottiene gradualmente una maggior influenza nella configurazione di asimmetria della scia, con una vera e propria evoluzione e disposizione dei vortici, che prende il nome di bi-stabilità o multi-stabilità, a seconda del numero di configurazioni che si riesce ad osservare (*Rigas et al.* [7]).

Aumentando ulteriormente il numero di Reyolds, i vortici si staccano e si rigenerano dal corpo in maniera intermittente: in queste condizioni la scia viene definita instabile. Le tecniche di controllo della scia si concentrano in particolare sulla correzione dell'asimmetria e sulla gestione degli shear layers responsabili della bi-stabilità: grazie al lavoro di *Cerutti et al*[9]. sono stati ottenuti grandi benefici iniettando getti d'aria

4

compressa nella corrente al distacco con il corpo in corrispondenza dei bordi posteriori, riducendo la resistenza di un fattore consistente intorno al 12%. Si tenga conto che tale risultato viene consegnato in successione ad una ricerca precedente, che utilizzava una tecnica di controllo attivo piuttosto simile da parte di *Barros et al.* [10], in cui è stato dimostrato che un'attuazione ad alta frequenza avrebbe prodotto risultati più convincenti di una a bassa frequenza, con un vantaggio troppo esiguo intorno al 2% della resistenza iniziale.

Altro aspetto fondamentale è l'interessamento della comunità scientifica per il contesto simulativo. L'introduzione di soluzioni ad alto guadagno su una singola unità ha modo di influenzare l'ambiente in cui questa viene inserita? Quali rischi possono verificarsi e quali benefici collaterali possono innescarsi? Il mondo dei trasporti, infatti, viene associato ad un sistema ricco di entità che incrementano il livello di complessità dello scenario sotto più punti di vista, da quello delle comunicazioni, alla sicurezza, a quello economico. Le interazioni sono molteplici, simultanee e a più livelli.

A tal proposito, si potrebbe pensare di sfruttare l'interazione tra più parti anche per la drag reduction. Una tecnica piuttosto recente oggetto di studio per il settore automotive è quella del *platooning*, ampiamente discussa nel lavoro di *Cerutti et al.*, che prevede l'utilizzo di più mezzi di trasporto, solitamente con caratteristiche geometriche simili. Se, per mezzo della tecnologia, questo gruppo di veicoli fosse dotato di un alto livello di comunicazione e di rapidità nell'esecuzione di manovre, il loro consumo di carburante sarebbe drasticamente ridotto se questi veicoli viaggiassero in maniera compatta, con distanze ben al di sotto di quelle a cui gli automobilisti sono abituati.



Figura 1.4 | rappresentazione schematica di una manovra automobilistica con platooning. La comunicazione e la cooperazione dei veicoli sono tali da effettuare frenate in sicurezza attraverso lo scambio di informazioni quali la velocità e la distanza reciproca. Fonte[29]

Il platooning risulta congeniale per veicoli di trasporto su autostrade per le caratteristiche stesse del percorso e per il ridotto quantitativo di elementi di stop alla circolazione. Inoltre, spesso i mezzi pesanti delle aziende viaggiano di notte e negli stessi orari compiendo lunghe distanze, gettando quindi le basi per una ipotetica clusterizzazione dei veicoli in gruppi definiti e circoscritti di plotoni organizzati.

In questo lavoro si tralascerà la questione simulativa [12][21] così come quella legale, dal momento che il platooning è una tecnica ancora poco affermata e deregolamentata, al pari di altre innovazioni tecnologiche che hanno trovato una risposta positiva nell'economia globale e per cui sono state definite solo in seguito delle norme giuridiche adeguate<sup>1</sup>. Ci si concentrerà invece da un punto di vista accademico sul suo aspetto chiave, ovvero la riduzione di resistenza aerodinamica in quanto la presenza di un veicolo può apportare benefici ad un altro veicolo.

Simulando la guida su un tratto rettilineo di strada di due o più modelli vetture in una galleria del vento, verranno trattati gli effetti del platooning sovrapponendo a questa tecnica passiva il controllo attivo della scia, e di come i molteplici parametri esterni influenzino la drag reduction complessiva del sistema. Alla luce delle potenzialità pubblicate[9][18][19] in merito all'utilizzo separato dei controlli sulla scia, non resta che saggiare la loro convenienza durante l'utilizzo combinato, alla ricerca di un ottimo prestazionale.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Similmente a quanto accaduto con altre tecnologie di tendenza ad ampia diffusione quali droni, intelligenza artificiale, social media.

### 2 Algoritmo genetico

#### 2.1 Premessa

Una delle scelte più diffuse in ambito informatico per la risoluzione di problemi di ottimizzazione multidimensionali è l'algoritmo genetico, di cui si ha la prima implementazione storica nel 1975 da parte di *John Henry Holland*[16]. L'algoritmo genetico rientra nella categoria degli algoritmi euristici dal momento che il problema di ottimizzazione in ambito ingegneristico non vede una soluzione in forma chiusa e deve pertanto avvalersi di tecniche iterative per convergere, con un consistente livello di sicurezza, alla soluzione.

Sebbene i problemi di ottimizzazione in senso generico possano intendere come *soluzione* del problema il raggiungimento di un massimo, o di un minimo, o di uno specifico valore in un range di valori ammessi, per semplicità nella trattazione si darà per scontato che l'algoritmo genetico sia configurato per la ricerca del valor minimo, dal momento che questo è lo standard seguito dalle librerie informatiche dei linguaggi di programmazione più popolari in ambito accademico e ingegneristico. Si può facilmente dimostrare con semplici trasformazioni algebriche che la ricerca di un massimo globale o l'ottenimento di uno specifico *target value* possono essere ricondotti alla ricerca di un minimo globale.

Associando ad un generico problema di ottimizzazione multidimensionale una funzione di fitness

$$fitness: x = [x_1, x_2, \dots, x_n] \in \mathbb{R}^n \to y \in \mathbb{R} \mid y = f(x)$$

ovvero una funzione capace di valutare le performance di un qualunque set di valori in input che compongono x relativamente al problema in oggetto, risulta naturale interpretare ogni possibile configurazione di x come l'insieme di connotati di un generico individuo, esplicitamente descritta da un numero n di caratteristiche tali da produrre un proprio guadagno y. Altrettanto naturale sarebbe l'associazione dell'individuo che produce la performance più bassa con l'individuo soluzione.

$$GA(f, \mathbb{R}^n): x_{sol} \in \mathbb{R}^n \mid y_{min} = f(x_{sol})$$

Gli algoritmi genetici sono comunemente usati per generare soluzioni di alta qualità avvalendosi di istruzioni fortemente ispirate ad alcuni processi biologici nel settore genetico, detti "mutazione", "crossover" e "selezione"[15]. In prima istanza il *GA* è stato ideato per la risoluzione di problemi di natura binaria, ma non sono passati molti anni da quando la sua implementazione è stata estesa anche ai numeri reali[23], che ricoprono la gran parte delle applicazioni odierne. Dal momento che il progresso tecnologico ha anche reso possibile la risoluzione di problemi matematici in cui fossero presenti delle condizioni al contorno, è possibile che vi siano delle differenziazioni nello schema dell'algoritmo rispetto al procedimento classico e questa trattazione si limita a descriverne i processi in linea generale, ponendo attenzione sulla analogia tra evoluzione naturale[22], e risoluzione matematica.

#### 2.2 Concetti fondamentali

Per far sì che l'algoritmo abbia successo, è necessario valutare la funzione di fitness su un sottoinsieme di partenza di individui, comunemente detto generazione. Per un miglioramento delle prestazioni, è bene che la generazione iniziale sia sufficientemente numerosa e che gli individui al suo interno siano costruiti in maniera tale da occupare quasi tutto il dominio multidimensionale, in modo da facilitare l'esplorazione del minimo globale.

Generalmente il numero più adatto di individui è compreso tra 30 e 100, oltre questa soglia le risorse di calcolo sono superiori ai benefici ottenibili in termini di rapidità di convergenza[17].

Una volta calcolate le performance di ogni individuo, lo scopo dell'algoritmo è quello di creare una nuova generazione sostitutiva, nella speranza di ottenere individui ancor più performanti di quella precedente. La generazione che si ha a disposizione non contribuisce in egual modo alla formazione della successiva. Come nel processo di selezione naturale, solo un ristretto numero di candidati ha la possibilità di trasmettere le proprie qualità, e tale gruppo prende comunemente il nome di elite.

Per produrre un nuovo individuo, è necessario selezionare casualmente due individui del gruppo elitario: si può ottenere un nuovo individuo (o anche due per volta) innestando in maniera casuale una porzione delle caratteristiche di un genitore nella

8

configurazione dell'altro. Tale operazione prende il nome di crossover e viene eseguita per un elevato numero di volte per ottenere un gruppo consistente di nuovi candidati.



Figura 2.1 | Meccanismo di crossover, dove le caratteristiche dei genitori vengono ricombinate per la generazione di nuovi individui.

Per ottenere un grado di ricombinazione genetica ancora più alto, una piccola porzione di queste caratteristiche viene anche alterata in maniera casuale, rispettando ove richiesto il range di valore ammissibile per la specifica caratteristica.



Figura 2.2 | Meccanismo di mutazione, l'individuo che ne risulta rimane piuttosto somigliante all'originale, ma le sue performance dipendono dall'impatto della mutazione.

Ottenuta la nuova generazione, si procede alla valutazione delle performance dei nuovi individui e, conseguentemente, alla creazione di una generazione ulteriore con le relative valutazioni. L'algoritmo si arresta quando si verifica convergenza sul valore di fitness ottenuto dalla maggioranza della generazione o al superamento di una soglia minima di tolleranza, oppure se si incorre in alcune casistiche indesiderate, come lentezza nel processo di convergenza, o eccessivo numero di generazioni.



Figura 2.3 | Flusso logico dell'algoritmo genetico.

#### 2.3 Analisi del processo

Ci possono essere differenti filosofie sul metodo adatto con cui premiare gli individui più performanti. I software di programmazione più sviluppati hanno reso possibile la personalizzazione del criterio di **selezione** del gruppo elitario, ma di solito quasi ogni processo è ispirato ad una o più delle seguenti strategie:

- Selezione a *roulette*: ogni elemento nell'insieme ha una probabilità di essere eletto proporzionalmente al valore della sua performance rispetto a quella di tutti gli altri.
- Selezione del *resto*: questo processo si basa sul metodo della roulette, ma esegue un raggruppamento preliminare degli individui suddividendo le loro performance in gruppi distinti. I gruppi con performance buone hanno più probabilità di essere scelti ripetutamente rispetto ai gruppi a basso rendimento. Quando un generico gruppo viene designato dalla roulette, si elegge casualmente da questo un individuo che ne fa parte, e quell'individuo ha maggiori probabilità di vittoria rispetto ai compagni nel caso in cui la sua performance fosse stata lievemente inferiore alla soglia per passare ad un gruppo con prestazioni migliori.
- Selezione con *torneo*: gli individui vengono raggruppati casualmente in piccoli sottoinsiemi, l'individuo con la miglior fitness passa la selezione.



Figura 2.4 | Tipologie di selezione

Quando si tratta di combinare l'informazione genetica di due individui nel dominio dei numeri reali, il procedimento di tale fase può assumere diverse forme, e dovrebbe essere l'esperienza del programmatore a stabilire la tecnica di **crossover** più adatta al problema che si ha di fronte.

- Crossover *semplice*: tutti i valori del figlio sono determinati da un 50% di probabilità di essere esattamente quelli di un genitore o dell'altro.
- Crossover a *taglio singolo*: si estrae un solo numero di soglia, intero e causale fino ad un massimo di n, tante quante sono le caratteristiche di un individuo. Tutte le qualità di un individuo dalla prima fino all'indice di soglia prendono l'informazione del primo genitore, mentre le altre ereditano le caratteristiche del secondo.
- Crossover *intermedio*: solitamente utilizzato per applicazioni con numeri reali, in quanto le caratteristiche uscenti sono il risultato della media ponderata tra i valori dei due genitori. I valori sono quindi inediti, e necessitano di un parametro

di peso con cui esprimere il tasso di vicinanza da un genitore piuttosto che dall'altro. Se il parametro è impostato a 0.5, si è esattamente sulla media aritmetica, mentre se rimane compreso tra [0, 1] il figlio giace sul segmento che unisce i due individui, ma niente vieta l'impostazione di un parametro fuori da questo range.

- Crossover *di Laplace*: simile al crossover intermedio, ma perfezionato anche per problemi con restrizioni ai numeri interi. (*Kusum Deep*[28])
- Crossover *euristico*: simile al crossover intermedio, ma il figlio si trova sempre più vicino al genitore con la fitness più performante.



Figura 2.5 | Tipologie di crossover

Grazie alla tecnica di **mutazione** l'algoritmo genetico ha libertà di spaziare ben oltre le sole combinazioni offerte dal contenuto genetico costruito in partenza; tuttavia, è necessario tenere a mente che un'eccessiva predisposizione alle anomalie può indurre al rallentamento del processo di convergenza, ed è sempre preferibile lasciare che queste tecniche rimangano fenomeni statistici secondari rispetto a quello di crossover:

 Mutazione gaussiana: l'individuo soggetto a mutazione si discosta dai valori che aveva in precedenza in tutti i suoi parametri, ai quali viene aggiunto un valore positivo o negativo appartenente ad una distribuzione gaussiana simmetrica (con media nulla) e deviazione standard commisurata al range massimo di valori consentiti. La mutazione altera lievemente la configurazione di partenza.

 Mutazione uniforme: l'anomalia si verifica solo su una porzione dell'individuo, dove ogni caratteristica ha una certa probabilità di mutare. Quando ciò si verifica, il valore viene del tutto sostituito con uno casuale entro il range di valori ammessi scegliendo da una distribuzione uniforme.



Figura 2.6 | Tipologie di mutazione

#### 2.4 Differenze con i metodi iterativi classici

Oltre alla risoluzione di alcuni problemi tradizionali dell'informatica, l'algoritmo genetico trova applicazione in ambito elettronico, biomedico, economico, intelligenza artificiale, ambiti che vantano rispettivamente problemi di elevata complessità per la società odierna. Molte di queste sfide sono descrivibili attraverso linguaggio matematico, con una serie anche consistente talvolta di eccezioni, restrizioni, condizioni al contorno, che i metodi iterativi classici faticano a gestire.

Decidendo comunque di voler risolvere un problema matematico elementare privo di restrizioni attraverso un algoritmo genetico piuttosto che con il metodo di Newton o con l'algoritmo del Simplesso, si possono osservare alcune differenze nella tecnica risolutiva:

- L'algoritmo genetico non parte da un unico punto iniziale nel dominio bensì crea un sottoinsieme di punti di guess eterogenei.
- Il metodo con cui si ottiene l'iterazione successiva in un metodo classico è deterministico e segue leggi puramente matematiche, mentre l'algoritmo

genetico si lascia influenzare anche da una componente stocastica in quanto per l'evoluzione degli individui si innescano processi casuali di editing genetico.

 Grazie al processo di mutazione, per l'algoritmo genetico risulta più facile bypassare alcune regioni ingannevoli del dominio in cui è presente un minimo locale, ma non globale, dalle quali invece alcuni metodi classici talvolta non riescono a uscire.

#### 2.5 Contesto tecnologico odierno

Recentemente, l'introduzione del *calcolo in parallelo* ha permesso sia agli algoritmi genetici sia a metodi risolutivi a lui concorrenti un notevole incremento della rapidità di risoluzione (*D. Bernstein* [24]), ma è bene sottolineare che non tutte le applicazioni di tipo sperimentale hanno potuto beneficiare di questa nuova tecnologia. Se infatti la performance che si intende monitorare fosse una quantità fisica concreta che necessiti di una valutazione sperimentale, soggetta a fluttuazioni nel tempo che ne implichino una stima al valor medio statistico, la tecnica del calcolo in parallelo non sarebbe eseguibile, poiché la misurazione sperimentale della performance non può avvenire anch'essa in maniera parallela, bensì sequenziale.

Resta pertanto chiaro che, in presenza di problemi analitici o comunque legati ad un processo risolutivo puramente astratto, la variabile *tempo* sia una risorsa rimborsabile; mentre in presenza di componenti hardware che operano per lunghi periodi di tempo, oltre alla non praticabilità del calcolo in parallelo, bisogna tenere in conto che una scorretta configurazione dell'algoritmo genetico può comportare tempi di risoluzione fuori dai limiti fisiologici di operatività del sistema o della tolleranza desiderata dall'utente.

### 3 Set up sperimentale

#### **3.1** Galleria e modello

In laboratorio l'esperimento prevede l'utilizzo di una galleria del vento di medie dimensioni, in cui il flusso è generato da due eliche, controllabili mediante un quadro elettrico in concomitanza della galleria. Il pannello di controllo offre sia la regolazione in velocità delle eliche in maniera individuale grazie ad un indicatore associato alla rispettiva elica, sia una regolazione in sincrono. La piena libertà di controllo della galleria facilita quindi l'impostazione dello stesso numero di *rpm* su entrambe le eliche con un'unica manopola e successivamente la correzione dello specifico componente al fine di ridurre disallineamenti che possano creare disturbi al flusso uniforme che si intende ottenere.

Il diametro delle eliche è notevole ed è necessario un convergente per incanalare il flusso nella camera di prova, di dimensioni modeste, nominalmente  $0.9 \times 1.2$  m che si estende per 6.5 m. Per compensare la crescita progressiva dello strato limite sulle pareti, responsabile della variazione graduale del campo di velocità nell'ambiente di prova, la *test section* è caratterizzata da un angolo di divergenza di circa 1%. Va inoltre riportato che una prima contromisura praticabile per la rimozione dello strato limite sarebbe quella mediante l'aspirazione a monte della camera di test, ma il basso impatto dello strato limite sulla prova e il non trascurabile utilizzo delle risorse per la sua rimozione hanno reso tale correzione poco appetibile.

Una seconda contromisura potrebbe essere l'introduzione di uno strato di superficie scorrevole denominato *moving belt*[20], con un meccanismo simile a quello dei tapis roulant, che, impostato con la stessa velocità della corrente indisturbata, compenserebbe ampiamente la formazione dello strato limite. Quest'ultimo dettaglio è particolarmente rilevante nel settore automotive, dove una diversa configurazione del manto stradale (ovvero del campo di velocità tra la parete inferiore del mezzo ed il suolo) è connessa ad una diversa distribuzione di pressione, e quindi influisce sulla misura della portanza.

Tuttavia, ponendo l'interesse della ricerca esclusivamente sulla riduzione della resistenza aerodinamica, l'introduzione del tapis roulant appare come un aspetto

marginale, e, per un maggior grado di accuratezza, sarebbe invece preferibile concentrare le migliorie su altri aspetti, connessi direttamente all'oggetto della sperimentazione e non della galleria in sé.



Figura 3.1 | Rappresentazione del prototipo. I segmenti rossi installati sul retro del convoglio contrassegnano gli slot di iniezione del sistema di controllo del flusso. fonte [9]

L'esperimento ha continuato gli studi intrapresi da *Cerutti et al.* e successivamente proseguiti da *E. Amico*[18] e *Di Bari*[19] utilizzando lo stesso prototipo di convoglio, in scala 1: 10 con h = 0.2m, w = 0.17m e L = 0.412m, classificato come square-back road vehicle. Le dimensioni dello stesso sono adeguate alle dimensioni della galleria del vento e, nel complesso, è facile notare somiglianze tra la sua geometria e il design di alcuni modelli nel settore automotive, come la *FIAT Ducato* del gruppo *IVECO*. Sono presenti degli smussi in molte zone del corpo con il preciso scopo di migliorarne l'aerodinamica senza stravolgerne la tipica estetica della categoria di riferimento. Tra tutti i dettagli, va evidenziato sul lato posteriore del convoglio l'angolo di inclinazione di 10° nella direzione della corrente che mette in risalto l'effetto del controllo attivo della scia evidenziato da *Barros et al*[8].



Figura 3.2 | Sistema di attuazione e controllo dei getti pressurizzati. A sinistra un dettaglio sugli slot di attuazione, a destra la catena di controllo. Fonte [9]

Una criticità del modello cui non è ancora stata trovata compensazione è l'assenza di componenti rotativi che mettano in moto i dischi rappresentanti le 4 ruote del convoglio. Le ruote fisse anziché in rotazione influiscono sulla stima del coefficiente d'attrito di un valore stimato intorno al 25% del suo valore nominale.

#### **3.2** Sistema di attuazione dei getti

Uno dei prototipi è anche dotato al suo interno di sistemi di acquisizione elettronica, oltre che di un sistema di controllo attivo della scia per mezzo di valvole elettropneumatiche. Per mettere in comunicazione questi sistemi con l'ambiente esterno e quindi con l'operatore, il cablaggio passa attraverso un'asta cava di supporto, che è stata poi lavorata esternamente con una carenatura aerodinamica per eliminare il più possibile l'interferenza aerodinamica con il sistema d'interesse.



Figura 3.3 | Panoramica sulla strumentazione utilizzata presso il laboratorio di Aerodinamica "Modesto Panetti" del Politecnico di Torino.

L'area frontale del modello è pari al 3.1% della sezione trasversale della galleria del vento, e con l'aggiunta dell'asta sale al 4.5%, poiché quest'ultima vanta uno spessore t/c = 0.2 ed estensione c/w = 0.07.



Figura 3.2 | Schema dell'attuatore. Fonte[18]

Il sistema di controllo attivo permette a dei getti di aria compressa di espandersi attraverso quattro fessure poste sui lati della parete posteriore del prototipo. Tutte le fessure sono spesse 1mm: quelle orizzontali si estendono per 104 mm e sono alimentate rispettivamente dal getto superiore (*top*) ed inferiore (*bot*) mentre quelle verticali per 132 mm sono alimentate in egual modo da un unico getto, quello laterale (*side*).

Dall'esterno del convoglio non è possibile vedere la presenza di attuatori cilindrici posizionati dentro a degli slot dedicati, costruiti per regolare l'orientamento del getto.

La forma cilindrica consentirebbe agli attuatori di cambiare l'angolo di uscita dell'aria compressa, mantenendo la medesima posizione nello slot. L'angolo scelto per tutti gli attuatori è di 65° rispetto alla verticale in modo che i getti convergano piuttosto rapidamente verso il centro della faccia. Per l'alimentazione del getto d'aria si utilizzano valvole comandate elettricamente e flussimetri.

L'uniformità del getto è garantita per almeno il 95% della lunghezza della fessura grazie alle verifiche effettuate in precedenza da *Cerutti et al*.

#### **3.3** Sistema di misura

All'operatore vengono messi a disposizione gli strumenti per misurare la velocità a monte nella galleria, grazie ad una calibrazione effettuata prima dell'esperimento vero e proprio: introducendo un tubo di pitot nella camera di prova, sono stati misurati i valori del rapporto di pressione nel convergente, poi il tubo di pitot è stato rimosso al termine della calibrazione. Grazie al salto di pressione, si può dedurre la velocità del flusso indisturbato.

Per la stima della resistenza aerodinamica si utilizza una cella di carico, di uso comune in ambito industriale, nello specifico una *Dacell UU-K002* con un fondo scala  $F.S. = 2Kg_f$  e una precisione pari a 0.002% F.S. Il segnale elettrico relativo alla cella di carico viene inviato ad un modulo analogico-digitale A/D NI-9215 adibito in un digitalizzatore NI-cDAQ ed è necessaria una trasformazione algebrica per ottenere il valore fisico da quello elettrico attraverso una taratura.

Per osservare in maniera più dettagliata le condizioni di contorno nello studio della *drag reduction*, il prototipo è stato equipaggiato con misuratori di pressione statica e fluttuante. Il valore di pressione statica è acquisito mediante 64 canali grazie a dei trasduttori multi-input appartenenti ad una *Scanivalve*33 regolata da una *Smart Zoc* 100. Ogni trasduttore presenta un fondo scala di  $\pm 2.5 kPa$  ed una accuratezza di 0.15% F.S. La pressione statica è rilevata con delle connessioni pneumatiche (tubi con diametro di 1 *mm*) e poi convertita dal trasduttore in valore di tensione, e 33 di questi misuratori sono posizionati in punti strategici sulla superficie laterale e frontale del convoglio, mentre i restanti 31 sono concentrati in maniera più intensificata sulla parete posteriore, dove vi è più interesse sul comportamento della scia.

19



Figura 3.3 | Mappe della disposizione delle capsule microfoniche e sonde di pressione. Fonte[9]

Sempre sulla parete posteriore del prototipo relativamente all'acquisizione della pressione fluttuante sono posizionate 16 capsule microfoniche capacitive, 12 delle quali sulla metà destra come rappresentato in figura, e le restanti 4 sulle facce laterali, al centro di ogni lato, con una distanza dal bordo di uscita di circa 10 mm. Le sonde microfoniche si presentano come delle pastiglie con diametro esterno di 9.8 mm ed un elemento sensibile del diametro di 1mm, con risposta piatta nel range di frequenze  $0.005 - 13 \ kHz$  ed una sensibilità di  $-60 \ dB$  con escursione  $\pm 3 \ dB$ .

Come riportato in *Cerutti et al.* tutti i sensori sono stati calibrati usando una *Bruel & Kjaer probe*, seguendo quanto riportato in *Sardu et al*[25]. Sia per la misurazione che per la calibrazione è stata utilizzata una configurazione di tipo *pinhole* e il segnale elettrico è stato filtrato per eliminare i contributi spuri.

### 4 Caratteristiche del software di simulazione

#### **4.1** *Esposizione generale*

Considerato l'obiettivo del progetto di tesi di proseguire e soprattutto *unire* le tematiche esposte da *Cerutti et al., Amico et al* e *Di Bari et al*, si è delineata la necessità di un software gestito su un unico linguaggio di programmazione, capace di effettuare le acquisizioni di test con impostazioni differenti e che rappresentasse i dati in tempo reale, oltre che memorizzare le performance in maniera compatta e organizzata.



Figura 4.1 | Interfaccia di acquisizione

Grazie all'interfaccia, l'utente ha a disposizione una panoramica completa delle informazioni raccolte dai dispositivi, strutturata in quattro regioni:

 Nella porzione in alto a sinistra è rappresentata una mappatura dei valori di tensione connessi alle spie microfoniche. La posizione di ogni spia è evidenziata da un cerchio che cambia dimensione a seconda del valore corrente; attraverso una tecnica di interpolazione con griglia spaziale irregolare[11], si deduce il campo di pressione sul resto della parete. Al termine dell'esecuzione del test, il diagramma rappresenta la distribuzione del *valore efficace* di pressione fluttuante (rms) calcolato su tutto l'arco temporale.

 Nella porzione in alto a destra viene visualizzato il segnale di controllo dei getti stabilito dall'utente per ognuno dei canali. Il metodo più indicato per descrivere il segnale è per via analitica: nota l'espressione matematica in funzione del *tempo*, l'interfaccia provvede alla sua valutazione con una griglia temporale basata sulla frequenza di trasmissione desiderata.

Durante l'esecuzione dei test, la visione della porzione di segnale che viene comandata viene facilitata attraverso un segmento mobile verde. È stata introdotta anche la possibilità di applicare in automatico, se desiderato, delle correzioni sul segnale per renderlo compatibile con le specifiche tecniche delle elettrovalvole, dal momento che la loro tensione operativa ammette un range di valori tra i 5.5 e i 9.5 *Volt*.

 Nella porzione in basso a sinistra viene rappresentato il segnale elettrico della cella di carico. Al termine della simulazione, l'interfaccia mette in evidenza il valor medio del segnale, e procede al calcolo del C<sub>D</sub> ad esso connesso, comunicando all'utente il guadagno ottenuto dal forcing.

Bisogna asserire che il sistema testato è soggetto a corrente con una turbolenza non irrilevante, e che il segnale della cella di carico presenta delle oscillazioni notevoli rispetto al valor medio.

• Nella porzione in basso a destra è adibito un pannello informativo, dove l'utente può inserire annotazioni circa le condizioni atmosferiche dell'ambiente contingente e lo stato operativo della galleria del vento, oltre che l'assetto dei convogli utilizzato in camera di prova. In cambio, l'interfaccia comunica le informazioni numeriche più rilevanti: i coefficienti calcolati,  $C_{D_{mean}}$  per la fase forzata,  $C_{D_0}$  per quella con getti chiusi, e la velocità della corrente indisturbata a monte, il valor medio del segnale elettrico della cella di carico e la sua deviazione standard.

La peculiarità lato utente è stata la possibilità di poter effettuare annotazioni sull'interfaccia stessa prima e durante la simulazione per descrivere in maniera efficace il tipo di test al momento del salvataggio. L'interfaccia è capace di eseguire numerosi

test automatizzati in successione all'interno di un unico processo di ottimizzazione generalizzato, adattabile a diversi scenari e condizioni.

Quando si parla di *condizioni* si fa riferimento a tutte le variabili sotto il controllo diretto dell'utente:

- Parametri di primo livello i parametri che ai fini dell'esperimento risultano più rilevanti sono:
  - gli <u>rpm</u>, il numero di giri al minuto imposti alla galleria, da cui dipendono la velocità ed il Reynolds del flusso a monte;
  - il <u>numero di convogli</u> presenti nella camera di prova, solitamente due, uno dei quali equipaggiato con sistemi di acquisizione descritti in precedenza;
  - la <u>distanza adimensionalizzata</u> tra i prototipi: per tutti i test i convogli sono sempre stati posizionati in coda, e la distanza d/L si ottiene misurando lo spazio tra il prototipo non equipaggiato rispetto a quello strumentato, poi si normalizza rispetto alla lunghezza del convoglio (0.41m);
  - <u>tipologia del getto</u> pneumatico: oltre al platooning, in molti test è stata prevista la tecnica del forcing per il controllo attivo sulla scia, che implica l'utilizza di un getto di aria compressa. L'interfaccia è stata ideata con il preciso scopo di permettere all'utente l'esecuzione di qualsivoglia tipologia di getto, realizzata attraverso un segnale di tensione che comandasse l'apertura o la chiusura delle elettrovalvole. Si è potuto realizzare così forcing con segnale costante, sinusoidale, pulsato, periodico, tempo-dipendente, o anche perfino parametrico. Ad ogni tipologia corrispondono poi i rispettivi coefficienti di interesse;
  - <u>durata</u> del test: solitamente, quando è previsto forcing, si applica anche una fase di idle iniziale del sistema, in modo da acquisire in un'unica simulazione anche la condizione del caso non forzato e dedurre la differenza di prestazioni con un processo di comparazione.
- Parametri di secondo livello parametri che non influenzano le prestazioni, ma che forniscono un certo livello di comfort per l'utente:
  - capacità di passare da <u>modalità</u> single test a test automatizzato, solitamente sotto la direttiva di un algoritmo di ottimizzazione;

- <u>frequenze di acquisizione</u> dei dispositivi hardware: a seconda del rate impostato si può ottenere un segnale ad alto dettaglio a discapito di un incremento della memoria occupata. Per un singolo test l'impatto sul consumo di memoria è minimo, mentre con una sessione di test automatizzati si preferisce di solito alleggerirne il peso complessivo riducendo il rate;
- possibilità di personalizzare il <u>nome dei file</u> della simulazione in fase di salvataggio;
- Parametri di osservazione sono i parametri che l'utente non può controllare e che è interessato ad osservare, se non addirittura perfezionare:
  - <u>tensione della cella di carico</u>: da questa dipende la resistenza aerodinamica del modello equipaggiato, e, insieme all'informazione della velocità della corrente, si ottiene anche il coefficiente di resistenza.
  - <u>tensioni delle sonde di pressione</u>: a questi valori di tensione è connesso il campo di pressione rilevato dai microfoni. Durante la simulazione l'interfaccia propone anche uno strumento capace di intuire il campo di pressione su tutta la parete posteriore del veicolo a partire dalle misurazioni di alcuni punti sparsi mediante tecniche di interpolazione.

#### **4.2** *Schema funzionale*

Con la *Figura 4.2* si presenta uno schema sintetico della procedura che l'utente dovrebbe eseguire con l'ausilio dell'interfaccia per portare a compimento un generico test in piena autonomia, ponendo attenzione tanto sulle attività *virtuali* quanto su quelle legate alla concretezza della prova. L'attività di laboratorio ha delle peculiarità che lo distinguono da un semplice progetto puramente computazionale, ma non bisogna trascurare le responsabilità in merito alla sicurezza dei macchinari e di chi li utilizza.



Figura 4.2 | Elenco delle attività svolte durante un test elementare

La scelta di implementare sia la registrazione dei test, sia la rappresentazione grafica, sia la fase di post-processing su un unico ambiente di programmazione si è rivelata efficace. Da un lato la costruzione del software ha richiesto un discreto grado di attenzione per conseguire un livello sufficiente di utilità, dall'altro è stato possibile gestire con più facilità la comunicazione tra i componenti di acquisizione con quello di ottimizzazione, i quali, se fossero stati utilizzati programmi diversi, avrebbero potuto causare problemi di compatibilità.

# 5 Platooning e Forcing – performance individuali

In questa sezione si espongono i benefici ottenibili dalle tecniche contestualizzate con il sistema descritto nel capitolo 3.

#### **5.1** Acquisizione dei $C_D$ nel caso naturale isolato

Lo scenario di riferimento principale con cui istituire dei confronti circa la qualità prestazionale delle tecniche di drag reduction è quello del caso *naturale isolato*. Il singolo convoglio dotato di spie è posizionato in camera di prova, e si raccolgono informazioni sulla resistenza aerodinamica variando manualmente la velocità del flusso indisturbato ad intervalli di tempo regolari sufficientemente estesi. Il test vede 5 diversi valori di velocità crescente, a cui corrispondono 5 crescenti valori medi di  $C_D$ .

In questo ventaglio di condizioni rappresentato in *Figura 5.1*, sono state selezionate due velocità principali di riferimento, corrispondenti ad U = 8 m/s e U = 9.67 m/s, rispettivamente  $Re = 1.1 \cdot 10^5$  e  $Re = 1.35 \cdot 10^5$ , già evidenziate nelle pubblicazioni precedenti, per facilitare il confronto dei risultati ottenuti. Per snellire la trattazione, ci si riferirà a queste due condizioni di flusso rispettivamente come *bassa* velocità e *alta* velocità.



al variare di 5 differenti velocità del vento

[*Nota*]: Il segnale della cella di carico mostra un andamento opposto a quello del coefficiente di resistenza poiché il dispositivo è precaricato con un carico che spinge verso la corrente di monte, tale da spostare il valore di taratura fuori dal valore di riposo, passando da 0 *Volt* a circa 2.8 *Volt*. In questo modo, tanto più la corrente preme il modello a valle, tanto più il valore di tensione si abbassa.

Il valore di tensione registrata dalla cella di carico viene poi convertito nel corrispondente valore fisico in *Newton* e, in relazione alla velocità del vento, si deduce il coefficiente di resistenza del sistema.

$$\boldsymbol{C}_{\boldsymbol{D}} = \frac{\boldsymbol{D}}{\frac{1}{2} \boldsymbol{\rho} \ \boldsymbol{V}_{\infty}^2 \ \boldsymbol{S}_{\perp V_{\infty}}}$$

C <sub>D</sub>	$\boldsymbol{U}_{\infty}\left[\boldsymbol{m}/\boldsymbol{s} ight]$	Re <sub>H</sub>
0.314	7.23	$1.00 \cdot 10^{5}$
0.381	8.00	$1.11 \cdot 10^{5}$
0.429	8.81	$1.22 \cdot 10^{5}$
0.465	9.66	$1.34 \cdot 10^{5}$
0.494	10.59	$1.47 \cdot 10^{5}$

Tabella 5-1 |  $C_D$  del modello vettura senza controllo attivo e passivo al variare del Reynolds

Per continuità con il lavoro di *Di Bari et al.*, la definizione del Reynolds prevede come lunghezza caratteristica la media tra altezza e larghezza del mezzo, molto utilizzata nel settore automotive e in accordo con la tipologia del corpo, anziché la lunghezza dello stesso, come previsto da *Cerutti et al.*, più conforme al settore aeronautico.

$$Re = \frac{\rho \, V \, \ell}{\mu}$$

 $\rho \ densit \grave{a} \ dell'aria \qquad V \ velocit \grave{a} \ della \ corrente \ a \ monte \\ \ell \ lunghezza \ caratteristica \qquad \mu \ viscosit \grave{a} \ dinamica \ dell'aria$ 

#### **5.2** Configurazione con platooning passivo a 2-trucks

La tipologia di platooning più elementare è chiaramente l'utilizzo di una configurazione a due modelli allineati rispetto alla velocità della corrente. Con queste caratteristiche, viene simulato uno scenario stradale con tragitto rettilineo a velocità costante. La possibilità di modificare la disposizione spaziale dei convogli in modo da ricreare condizioni di sorpasso, o di vento laterale va ben oltre lo scopo di questo lavoro e potrebbe costituire la base di progetti futuri.

A seconda della posizione del modello cui si fa riferimento, è prevista una tassonomia: quando ci si riferisce al modello alla testa del plotone si parla di *front platooning*, mentre per il modello posizionato in coda si utilizza l'espressione *rear platooning*.

Si desidera evidenziare quale impatto abbiano la variazione del Reynolds operativo e la variazione della distanza tra i convogli rispetto alla condizione naturale isolata. Comunemente, la distanza che intercorre tra i modelli viene normalizzata con la loro lunghezza, ottenendo così il parametro adimensionale di maggior interesse d/L, responsabile degli effetti più significativi sulle performance.

In *Figura 5.2* viene riportata la variazione percentuale del coefficiente di resistenza al variare della distanza adimensionale per gli stessi Reynolds utilizzati nel caso isolato.


Figura 5.2 | Variazioni del  $C_D$  ottenute da platooning a due convogli in **assenza di forcing**.

Per poter descrivere in maniera esaustiva il fenomeno del platooning, il test in esame ha previsto un numero consistente di acquisizioni<sup>2</sup>.

Nel *front platooning* si è registrato un massimo prestazionale di riduzione di circa il -20% nella sua condizione ottimale, con d/L = 0.5. I vantaggi del front platooning offrono nei loro casi migliori una diminuzione tra il -10% ed il -20% del  $C_D$ , specificamente per d/L < 1, mentre al di fuori di questo range si osserva un consistente cambio di tendenza, e che quindi la lontananza tra i veicoli inizia ad attenuare gli effetti.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Essendo uno solo dei prototipi equipaggiato con i dispositivi per la misurazione, quello privo di strumentazione è stato posizionato prima in coda, e successivamente in testa ripetendo il test.

Si osserva dalla disposizione del fascio di curve, che l'aumento del Reynolds agisce a favore della riduzione di resistenza: la condizione di Reynolds più bassa porta ad un platooning nocivo per il sistema, qualunque sia la distanza tra i convogli.

Per tutte le distanze 1.5 < d/L < 3 si registra un aumento della resistenza, soprattutto a bassa velocità, con un picco di incremento del +17%.

Le variazioni di  $\Delta C_D$  sono più evidenti per d/L < 3, valore che quindi stabilisce il *limite* oltre il quale l'influenza di un veicolo in coda diventa del tutto secondaria. Quando la distanza tra i modelli è superiore a tre volte la loro lunghezza, il veicolo in testa percepisce una variazione di resistenza tra il  $\pm 5\%$ , in base al Reynolds operativo. Tuttavia, è necessario aumentare di molto la distanza tra i veicoli prima di ottenere un effetto completamente nullo, rendendo così l'interazione tra i due modelli un fenomeno persistente di difficile isolamento.

Il *rear platooning* denota un effetto sempre positivo in tutte le condizioni, mantenendo anche ad alte distanze una riduzione considerevole del -20%; tale vantaggio registra il suo picco prestazionale intorno al -45% quando la distanza tra i due convogli è minima. Nella condizione rear, le variazioni di Reynolds hanno scarso impatto sulle prestazioni, e le curve si sovrappongono all'incirca negli stessi punti. A differenza del front platooning, il convoglio di coda riceve un beneficio non trascurabile per d/L > 3.

In entrambi i tipi di platooning il campo di pressioni risente con forza delle variazioni di distanza, soprattutto quando questa è inferiore alla lunghezza dei modelli.

Se si dovesse tenere conto dell'effetto complessivo che il platooning fornisce alla coppia, la distanza ottimale si aggirerebbe intorno a d/L = 0.5, diventando così il valore di maggior interesse nell'ottica di test congiunti al controllo attivo della scia.

Come già riportato, una distanza di sicurezza così bassa non sarebbe praticabile in un contesto stradale odierno, per questo la sua presa in esame per i futuri test esibiti ha finalità puramente accademiche. Inoltre, altre distanze sono state vagliate come quella minima (d/L = 0.25) in cui la condizione rear registra individualmente il massimo beneficio tra i test eseguiti, ed una più pronunciata (d/L = 3) considerata come soglia minima di influenzabilità.

#### **5.3** Configurazione con platooning passivo a 3-trucks

Con la stessa metodologia sono state collezionate informazioni anche per un plotone composto da tre convogli in coda, al variare delle velocità e della distanza reciproca, posizionando il prototipo equipaggiato al centro. L'interesse riservato al modello centrale del plotone è motivato dai risultati svolti da *Cerutti et al.* in cui il convoglio centrale risulta godere del maggior beneficio dal punto di vista della resistenza aerodinamica.



Figura 5.3 | Rilevazioni ottenute sul platooning con tre modelli. Fonte[9]

Vengono presentati in *Figura 5.4* alcuni dei risultati conseguiti nei test, nello specifico adottando d/L = [0.25, 0.5, 3], posizionando opportunamente i convogli alla medesima distanza da quello centrale, o *middle*, ed incrementando manualmente la velocità della galleria ad intervalli regolari.

In tutte le prove le oscillazioni del segnale registrato sono più marcate quando aumenta la turbolenza della corrente d'aria.





Figura 5.4 | Alcune delle prove di platooning a tre convogli, effettuate con distanza uniforme: (a) **d/L**=25%, (b) **d/L**=50%, (c) **d/L**=300%.

Nel platooning con tre modelli l'effetto del Reynolds è ben visibile in *Figura 5.5,* dove l'aumento di velocità è connesso a una maggior riduzione di  $C_D$  a parità di distanza. Nel complesso i risultati sono incoraggianti, compresi tra il -10% ed il -60% del valore nominale. L'andamento del fascio di curve è simile a quello già presentato nella condizione *rear* a due convogli. Anche per distanze superiori al doppio della lunghezza caratteristica l'effetto permette un crollo della resistenza fino a un massimo del -30%. Anche nel platooning con tre convogli si possono notare due regioni connotate da due differenti pendenze, la prima ad alta escursione e la seconda con variazioni più graduali del  $C_D$ , separate dal valore d/L = 0.75.



Figura 5.5 | Variazioni del C<sub>D</sub> ottenute da platooning a tre convogli rispetto alla condizione naturale isolata, variando velocità del vento e distanza **d/L**.

#### **5.4** Applicazione del forcing sul singolo componente.

Dopo la trattazione della drag reduction ottenibile con controllo passivo, merita attenzione ciò che il controllo attivo della scia può offrire rispetto al caso naturale attraverso i getti di aria pressurizzata con il sistema in dotazione descritto in *3.2*.

Per completezza, si riportano le caratteristiche dei getti in termini di prestazioni per ognuno dei canali di controllo *top, side, bottom*.

In *Figura 5.6* le velocità in uscita per alcuni valori di tensione sperimentali rendono possibile la linearizzazione delle performance per tutto il range operativo tra [5.5, 9.5] *Volt*.



Figura 5.6 | Velocità dei getti pneumatici in funzione della tensione di controllo. Valori registrati da [18]

In *Figura 5.7* vengono mostrate le forze sviluppate dai getti quando la galleria del vento è disattivata, in modo da ottenere un valore di riferimento circa i carichi a cui il prototipo equipaggiato è sottoposto. L'effetto individuale di ogni canale è stato raccolto comandando un segnale a gradini multipli crescenti, o *stair*, con valori uniformemente distribuiti nel range di utilizzo. Si mostra anche la forza ottenibile dall'attivazione simultanea di tutti i canali, in due modalità: prima comandando lo stesso segnale *stair*, poi con una rampa lineare. Effettuando la somma algebrica tra la forza sviluppata dai canali separati si ottiene un andamento identico (evidenziato in verde) al segnale sviluppato simultaneamente dai tre, con un lieve disallineamento per i valori massimi di tensione in input, adducibili all'errore contingente al momento dell'esperimento.



Figura 5.7 | Forza prodotta dai getti in assenza di vento in funzione della tensione di controllo

Alla luce di queste caratteristiche di base, si procede con la trattazione del controllo attivo della scia. Il segnale di controllo adottato sul convoglio isolato è quello indicato nel lavoro di *Amico et al.* identificandosi come risultato di ottimizzazione attraverso Reinforcement Learning (*RL*).

Il segnale in oggetto prevede una tecnica di controllo sinusoidale per i tre canali, dove la cresta e la frequenza dell'onda sono definite dall'algoritmo, mentre la valle è impostata di default al valor minimo di tensione ammissibile (5.5 *Volt*).

Nel dettaglio, le tabelle mostrano l'informazione numerica ottenuta dagli *agenti* rispettivamente per il caso a bassa e alta velocità.

Jet channel	<i>V<sub>min</sub></i> [V]	<i>V<sub>max</sub></i> [V]	<i>f</i> [ <i>Hz</i> ]
top	5.5	8.50	14.8
bot	5.5	8.74	42.17
side	5.5	9.83	48.81

Tabella 5-2 | Parametri ottimali (RL) sistema isolato forzato, Re  $\sim 1.1 \cdot 10^5$ 

Jet channel	<i>V<sub>min</sub></i> [V]	<i>V<sub>max</sub></i> [V]	<i>f</i> [ <i>Hz</i> ]
top	5.5	5.63	24.48
bot	5.5	7.52	7.56
side	5.5	8.63	47.52

Tabella 5-3 | Parametri ottimali (RL) sistema isolato forzato, Re  $\sim 1.3 \cdot 10^5$ 

Nella ripetizione dell'esperimento proposto con i medesimi parametri, si può notare dalle *Figura 5.8 e 5.9* che il test prevede una fase iniziale di *idle*, a getti spenti, in modo da definire con accuratezza la condizione di partenza del sistema, rendendosi indipendente dalle condizioni nella test section. La tecnica di forcing subentra nella seconda fase del test. I vantaggi del controllo della scia con le impostazioni dichiarate sono stati riconfermati appieno, raggiungendo più volte una diminuzione del  $C_D$  rispetto alla condizione isolata dell'8% e 4% per bassa e alta velocità.

In merito alle due rappresentazioni il controllo attivo in configurazione sinusoidale produce una distribuzione quasi identica del valore efficace di pressione fluttuante acquisita alla base del modello dalle sonde di pressione ( $P_{RMS [Voltage]}$ ).



Figura 5.8 | test forzato isolato (bassa velocità) – Parametri forniti da RL



Figura 5.9 | test forzato isolato (alta velocità) – Parametri forniti da RL

Nel diagramma in basso a sinistra dell'interfaccia si osservano le oscillazioni elettriche del segnale relativo alla cella di carico (*Load Cell*) che registra la resistenza complessiva del componente. Per facilitare la lettura, al termine della simulazione le oscillazioni sono opportunamente semplificate con il loro valor medio per la fase a *riposo* e *forzata*, rappresentato con le linee tratteggiate in rosso e in blu.

In riferimento alla [*Nota*] *di pag* 27 l'effetto del forcing è ben visibile dal dislivello dei valori medi. Quando il valor medio del segnale elettrico sale, significa che il sistema è soggetto a forze di piccole dimensioni. Con un forcing ottimale come quello indicato dal *RL* la resistenza aerodinamica del componente diminuisce: la cella di carico è quindi soggetta a una forza diretta verso valle minore, avendo così la possibilità di riavvicinarsi al suo valore di riposo dovuto al pretensionamento.<sup>3</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> quando è a riposo, la Load Cell registra  $\sim 2.8 Volt$ ; attivando la galleria per diversi valori di Reynolds crescente, il segnale elettrico registra valori via via inferiori.

# 6 Validazione del codice genetico

## 6.1 Effetti del forcing nella configurazione di platooning

Trattando di esperimenti con l'utilizzo simultaneo di platooning e forcing per la riduzione della resistenza, una delle prime ipotesi da affrontare si basa sul fatto prima evidenziato che, così come il campo di velocità si modifica al variare della distanza tra due veicoli, allo stesso modo dovrebbe corrispondere una diversa legge di controllo della scia ottimale in ogni situazione.

A tal proposito, ancor prima di indagare sia qualitativamente sia quantitativamente il forcing più congeniale, risulta utile valutare le conseguenze di uno scenario di facile realizzazione, con platooning a due convogli unito ad un forcing in cui per tutte le uscite è stato imposto il getto *continuo* più intenso possibile.

I risultati mostrano che le stesse impostazioni di soffiaggio non producono il medesimo effetto al variare del Reynolds, e possono agire o a favore o a sfavore in base al contesto: i casi più rilevanti sono stati registrati a bassa velocità, dove il controllo attivo della scia ha migliorato le prestazioni rispetto alla condizione *unforced-front platooning* del -30%, con un effetto nullo per la condizione *rear*, mentre per il *middle platooning* l'apertura totale dei getti ha svantaggiato le prestazioni del 7%.



Figura 6.1 | Effetti favorevoli dell'apertura massima dei getti, front platooning (bassa velocità)







Figura 6.3 | | Effetti svantaggiosi dell'apertura massima dei getti, middle platooning (bassa velocità).

Da queste assunzioni viene motivata l'intenzione di intraprendere la ricerca del metodo ottimale di forcing attraverso un metodo iterativo di tipo evolutivo su un numero discreto di scenari personalizzati, variando i parametri più significativi. Le prove principali della trattazione sono incentrate sul controllo ottimale della scia partendo da condizioni di platooning a due convogli con un distanziamento pari alla metà della loro lunghezza, per regimi di Reynolds di  $\sim 1.0 \ 10^5$  e  $\sim 1.3 \ 10^5$ .

## **6.2** *Tipologie di Forcing*

Grazie a una sufficiente capacità di interazione con il sistema<sup>4</sup>, risulta utile fornire in anticipo un quadro generale circa la tipologia dei segnali che si intende sintetizzare per la prova. Considerando le caratteristiche intrinseche della scia, e la fenomenologia dello shedding, è lecito domandarsi se in un segnale periodico nel tempo la caratteristica più importante per il controllo sia la sua frequenza o la sua forma d'onda. I test condotti<sup>5</sup> hanno verificato che le variazioni sul profilo della forma d'onda hanno meno impatto, e che è molto più facile e rapido ottenere dal forcing i benefici desiderati partendo da segnali elementari.

	FORCING (Tipo 1)	FORCING (Tipo 2)	FORCING (Tipo 3)
	Getto Costante	Getto Sinusoidale	Getto a Doppia Sinusoide
Numero di Incognite (x)	1 x 3 canali	<b>3</b> x 3 canali	<b>6</b> x 3 canali
Tipologia dell'Incognita	Tensione [V]	[V.min,V.max,freq]	[V.min,V.max,freq] 1° onda [V.min,V.max,freq] 2° onda
Limite associato	[5.5 – 9.5] <i>Volt</i> per la tensione	[5.5 — 9.5] <i>Volt</i> per la tensione	[0 - 9.5] <i>Volt</i> per la tensione
all'incognita		[0.01 — 35] <i>Hz</i> per la frequenza	[0.01 - 35] <i>Hz</i> per la frequenza

Tabella 6-1 | Tipologie di forcing. Restrizioni sul segnale di controllo.

Per permettere la cooperazione tra algoritmo genetico e lato hardware, sono state stabilite delle convenzioni matematiche sulla creazione dei segnali elettrici. L'algoritmo genetico opera con una lista unica di parametri, ma questi valori vengono naturalmente assegnati dal punto di vista hardware a canali distinti. Una tabella dedicata sulla logica

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> il programma di acquisizione garantisce un controllo della scia più sofisticato del semplice getto continuo costante, ampiamente personalizzabile prima dell'esecuzione.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> uno degli esperimenti iniziali è stato configurato in modo tale da creare segnali periodici con una forma d'onda variabile, ottenuta attraverso l'interpolazione spline di un generico gruppo di N nodi di riferimento. Il test di ottimizzazione che ne è derivato contava pertanto N+1 incognite, includendo il periodo della forma d'onda stessa come parametro di ottimizzazione aggiuntivo. I risultati di questo processo non hanno prodotto risultati incoraggianti.

implementata permette una esposizione più chiara sulle incognite del forcing e su come queste interagiscano col sistema:

TIPOLOGIA DI FORCING	ESPRESSIONE MATEMATICA DEL SEGNALE DI CONTROLLO
Getto Costante	$\begin{cases} y_{top}(t) = x_1 \\ y_{bot}(t) = x_2 \\ y_{side}(t) = x_3 \end{cases}$
Getto Sinusoidale	$\begin{cases} y_{top}(t) = A_{1,2} \cdot \sin(2\pi x_3 \cdot t) + B_{1,2} \\ y_{bot}(t) = A_{4,5} \cdot \sin(2\pi x_6 \cdot t) + B_{4,5} \\ y_{side}(t) = A_{7,8} \cdot \sin(2\pi x_9 \cdot t) + B_{7,8} \end{cases}$
Getto con Doppia Sinusoide	$\begin{cases} y_{top}(t) = A_{1,2} \cdot \sin(2\pi x_5 \cdot t) + A_{3,4} \cdot \sin(2\pi x_6 \cdot t) + B_{1,2} + B_{3,4} \\ y_{bot}(t) = A_{7,8} \cdot \sin(2\pi x_{11} \cdot t) + A_{9,10} \cdot \sin(2\pi x_{12} \cdot t) + B_{7,8} + B_{9,10} \\ y_{side}(t) = A_{13,14} \cdot \sin(2\pi x_{17} \cdot t) + A_{15,16} \cdot \sin(2\pi x_{18} \cdot t) + B_{13,14} + B_{15,16} \end{cases}$

Tabella 6-2 | descrizione parametrica del segnale di forcing.

con 
$$A_{i,j} = \frac{x_i - x_j}{2}$$
 (semi ampiezza),  $B_{i,j} = \frac{x_i + x_j}{2}$  (offset dell'onda)

Queste tipologie di segnale sono state incrociate con tutti gli scenari discussi in questo capitolo, per un totale di 14 distinte *sessioni* di ottimizzazione, portate a termine da un proprio algoritmo genetico.

CONDIZIONI GALLERIA	APPLICAZIONE PLATOONING (Condizione di Riferimento) Posizionamento Veicolo	+ APPLICAZIONE FORCING (Tutte le Tecniche Utilizzate)
$\frac{\text{BASSA VELOCITA'}}{Re} = 1.0\ 10^{5}$	Rear Truck $d/L = 0.5$	<ul> <li>Getto costante</li> <li>Getto Sinusoidale</li> <li>Getto a Doppia Sin</li> </ul>
U = 7.2 m/s $rpm = 600$	Front Truck $d/L = -0.5$	<ul><li>Getto costante</li><li>Getto Sinusoidale</li><li>Getto a Doppia Sin</li></ul>
$\frac{\text{ALTA VELOCITA'}}{\text{Re} = 1.2 \ 10^{5}}$ $U = 8.6 \ \text{m/s}$ $rpm = 800$	Rear Truck $d/L = 0.5$	<ul> <li>Getto costante</li> <li>Getto Sinusoidale</li> <li>Getto a Doppia Sin</li> </ul>
	Front Truck $d/L = -0.5$	<ul> <li>Getto costante</li> <li>Getto Sinusoidale</li> <li>Getto a Doppia Sin</li> </ul>

#### LISTA DEGLI SCENARI AFFRONTATI

$\frac{BASSA VELOCITA'}{Re = 1.0 \ 10^{5}}$ $U = 7.2 \ m/s$ $rpm = 600$	Rear Truck $d/L = 0.25$	Getto Sinusoida	le
$\frac{\text{ALTA VELOCITA'}}{Re = 1.2 \ 10^{5}}$ $U = 8.6 \ m/s$ $rpm = 800$	Rear Truck $d/L = 3$	Getto Sinusoida	le

Tabella 6-3 | scenari ottimizzati mediante GA

### 6.3 Procedure di esecuzione dei test

Un aspetto molto importante per l'attività svolta è che l'utilizzo prolungato di strumenti di acquisizione implichi la gestione dell'errore di misura. Tra tutti i dispositivi, la cella di carico è risultata la più sensibile a riguardo, e la ciclica imposizione di forze verso monte e verso valle hanno innescato il fenomeno della *fatica* sull'asta di supporto che la connette al prototipo di acquisizione, con relativa trasmissione di vibrazioni anche sul componente di misura. Va tenuta in considerazione anche l'isteresi dovuta alle deformazioni plastiche del componente. Per rimediare a queste limitazioni, è stata rispettata un'opportuna gestione dei tempi di utilizzo dei dispositivi, con delle pause operative per il rilassamento della cella di carico.

Se infatti non si verificassero incongruenze sulla misurazione nel ripetere un qualunque esperimento, il parametro di osservazione più logico sarebbe proprio il valore nominale del  $C_D$ . Invece, per poter ridurre al minimo la presenza dell'errore, si è optato per un metodo comparativo, tra le performances associate alla situazione forzata e non forzata. Effettuando la sottrazione tra i valori medi di  $C_D$  delle due fasi, le imperfezioni della cella di carico andrebbero incontro a semplificazione. Oltre agli errori legati allo strumento, anche le imprecisioni legate all'ambiente simulativo in galleria sarebbero mitigate con lo stesso metodo, ad esempio eventuali disallineamenti, o piccole imprecisioni sull'assetto dei veicoli rispetto alla corrente nella galleria.

Come misura cautelativa ulteriore, vi è la decisione di introdurre delle pause tra l'esecuzione di un test e il successivo: chiudendo i getti durante questo intervallo si permette alla scia il ritorno alla condizione di default, offrendo ad ogni prova una distribuzione di vorticità qualitativamente identica.

Inoltre, acquisendo col passare del tempo le performance di tutti i test eseguiti nell'arco di una sessione di ottimizzazione in laboratorio, è stato possibile delineare l'incidenza dell'errore sulla misura prevista della resistenza durante la fase non forzata. In linea teorica il sistema dovrebbe vantare lo stesso valore medio di  $C_{D_{RIF}}$ : con l'utilizzo intensivo degli strumenti invece la cella di carico tende a sovrastimare il coefficiente di resistenza, da qui la decisione di non utilizzare gli strumenti oltre un massimo di 3~4 ore, introducendo inoltre intervalli di distensione ogni 2.

$$C_{D_{RIF}}(t) = C_{D_{RIF}} + \mathbf{r}_{Err} \cdot t_{[h]} + \mathbf{c}_{Err}$$

Come riportato nell'espressione di regressione, il tasso orario di discostamento  $r_{Err}$  del  $C_D$  dal suo valore originale si colloca nelle *Figura 6.4 e Figura* 6.5 nel range [0.004 0.006], un quantitativo non indifferente se si tiene all'esattezza del dato, se confrontato con i valori nominali di riferimento, che coprono una fascia tra 0.2 e 0.5.



Figura 6.4 | Rilevazione del coefficiente di resistenza associato alla fase non forzata del test ( $C_{D0}$ ) nel primo trimestre. Il primo grafico è testato per condizioni di rear platooning a bassa velocità con **d/L**=0.25 Il secondo grafico è testato per condizioni di rear platooning ad alta velocità con **d/L**=0.25



Figura 6.5 | Rilevazione del coefficiente di resistenza associato alla fase non forzata del test ( $C_{D0}$ ) nel secondo trimestre. Il primo grafico è testato per condizioni di front platooning a bassa velocità con d/L=0.5Il secondo grafico è testato per condizioni di front platooning ad alta velocità con d/L=0.5

#### 6.4 Definizione dell'obiettivo di ottimizzazione

Bisogna tenere presente che nel settore ingegneristico molto spesso gli sforzi di perfezionamento di una applicazione si concentrano non solo sulla massima resa in termini di prestazione ma anche sulla sua convenienza valutandone l'efficienza dal punto di vista energetico.

L'idea di predisporre alcuni Algoritmi Genetici (*GA*) per l'ottimizzazione della scia con il miglior dispendio energetico è stata presa in considerazione, ma l'inseguimento della condizione di minima resistenza (trascurando i costi operativi) è stata molto più preferibile. Una stima esaustiva delle potenze richieste per l'attuazione è risultata difficile, principalmente per due motivi:

- La <u>complessità</u> del sistema, che utilizza sia energia elettrica per le manovre sulle elettrovalvole, più l'energia necessaria per tenere in pressione i getti. Con quale criterio stabilire l'efficienza tra l'energia spesa e quella utile? Considerando inoltre che i getti spingono sostanzialmente il mezzo in avanti, ciò influisce direttamente sulle forze applicate al sistema, e questo dovrebbe essere considerato parte integrante dell'effetto utile, o andrebbe preso in considerazione il solo contributo legato all'interazione con la scia?
- Le <u>differenze architetturali</u> tra il prototipo utilizzato in galleria con quelle di un ipotetico prototipo capace di correre su strada. I dispositivi per l'alimentazione dei

getti in un caso realistico dovrebbero essere progettati per limitare gli ingombri nel veicolo, e avrebbero dei meccanismi di funzionamento specifici e delle prestazioni adattate alla reale velocità di guida, per cui è difficile istituire un parallelismo rispetto alla strumentazione di laboratorio dell'attuale modello in scala ridotta.

### 6.5 Performance dell'algoritmo genetico

Assodata quindi la scelta di conseguire la minor resistenza aerodinamica con il forcing trascurando l'efficienza energetica, si procede alla validazione delle performances dell'algoritmo genetico. Ognuno di questi processi di ottimizzazione ha utilizzato gruppi di test della durata di 50 secondi ognuno, organizzati in un *generazioni* di almeno 20 unità e con circa 10 *evoluzioni*, talvolta più talvolta meno, in base al tempo messo a disposizione.

In tutti i processi si può notare che la generazione iniziale abbraccia un range molto ampio di combinazioni in input con risultati di fitness eterogenei, e con il progredire delle evoluzioni poco alla volta le performance medie del gruppo accennano a una convergenza verso un plausibile ottimo. Nelle prime generazioni le escursioni sul valore obiettivo di ottimizzazione  $C_D - C_{D0}$  sono piuttosto marcate, mentre nelle generazioni consecutive il processo di *esplorazione* lascia il posto a quello di *perfezionamento*. Con un tale numero di generazioni, l'algoritmo genetico è riuscito a fornire in tutti gli scenari una combinazione di parametri molto vicini a quella che dovrebbe essere la soluzione ottimale, tuttavia, per ottenere piena convergenza, sarebbero necessarie più generazioni di prova<sup>6</sup>.

Il numero elevato di incognite dovrebbe essere compensato con un congruo numero di individui nella generazione, ma dal punto di vista della convergenza ad un valore di soluzione il fattore più influente è il numero di evoluzioni, che dovrebbe essere garantito sufficientemente ampio. Contestualizzando i tempi necessari al compimento di un *GA* pienamente convergente sul sistema in esame, la scelta è stata dettata dal compromesso: l'algoritmo genetico è stato configurato per concludersi prima di ottenere l'esatta combinazione soluzione, fornendo un surrogato con prestazioni simili,

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> La possibilità di estendere il numero di generazioni dell'algoritmo genetico (e quindi il tempo di utilizzo della galleria del vento) dovrebbe essere annoverato tra gli sviluppi futuri. Lo scopo principale della tesi è stato quello di indagare i vantaggi del controllo attivo e passivo in una ampia panoramica di scenari impiegando un periodo di tempo ragionevole.

accettabili entro una soglia ragionevole di somiglianza in modo tale da ripetere l'esecuzione dell'algoritmo in numerosi contesti, da cui trarre informazioni preziose.

Vengono esposti gli andamenti della *fitness function* (*Figura 6.6*) e l'evoluzione dei rispettivi parametri incogniti protagonisti dell'ottimizzazione (*Figura 6.7*). Data la numerosità degli scenari affrontati, si portano all'attenzione queste immagini in numero limitato come esempio generale di un fenomeno comune alla maggioranza dei test.



Figura 6.6 | Andamento della fitness function dei test. Numero di Generazioni: 9, Individui: 20 Condizioni: rear platooning, d/L = 0.5, forcing di tipo 1 (costante)

La riduzione di resistenza che il GA ha prodotto tra caso naturale e forzato non è stata inizialmente una vera e propria riduzione, tanto che molti dei test nelle prime 4 generazioni si sono collocati su un valore positivo nell'ordinata di fitness.

Osservando la distribuzione verticale dei test sulle ordinate dei parametri incogniti, proprio come nel caso della fitness, anche i singoli valori  $x_i$  tendono a stabilizzarsi generazione dopo generazione in intorni via via sempre più ristretti. I test che hanno performato al meglio nella propria generazione (che hanno prodotto la *fitness* più bassa nel gruppo) sono stati messi in risalto, per rendere più agevole l'ispezione dei risultati. Molti tra i test che non sono stati i migliori della propria generazione vantano comunque dei parametri molto vicini a quelli ottimali creando un addensamento, ma non tutti: la presenza di *outliers* fuori dal trend principale è sintomo di una buona capacità dell'algoritmo genetico nel non focalizzarsi su un'unica regione del dominio, con una tendenza a tenere sempre da conto una alternativa alla soluzione fornita. Prima di ottenere una completa convergenza della generazione su un'unica ordinata, sarebbero necessarie troppe iterazioni, con una combinazione di valori molto simile a quella ottenuta già dopo dieci generazioni, e con probabili differenze minime nel valore di fitness.



*Figura 6.7 | Andamento dei parametri di ottimizzazione del medesimo scenario.* 

Considerato che all'aumentare delle incognite la rappresentazione di ogni singolo parametro risulterebbe troppo dispersiva, è stato necessario ideare un metodo di illustrazione più diretto e riassuntivo.

Tramite la struttura radiale di *Figura 6.8*, è stato dedicato un asse per ogni parametro, e per uniformare il fondo scala tutti gli assi sono stati normalizzati in base ai limiti inferiori e superiori associati. Ogni test è descritto da una combinazione di punti, e si può notare che tutto il range di valori è stato ispezionato a giudicare dalla densità di riempimento dell'asse: per semplificare la visione, sono state rappresentate le sagome appartenenti ai test che hanno prevalso all'interno della propria generazione, in modo da osservare l'evoluzione geometrica verso la soluzione ottimale, evidenziata in rosso rispetto alle altre forme geometriche. Nel caso qui riportato, l'evoluzione è ben evidente e graduale,

e a parte rare eccezioni, questo è l'andamento standard ottenuto con l'algoritmo generico anche negli altri scenari.



Figura 6.8 | Rappresentazione su grafico polare degli individui più performanti.

Nello specifico, la struttura radiale proposta è riferita alle stesse condizioni d'ambiente associate alla *Figura 6.6.* Si può osservare che il getto ottimale con segnale costante nel tempo si connota di segnali con la massima portata sul lato inferiore ( $x_2$ ) e su quelli laterali ( $x_3$ ), che interagiscono con una scia bistabile oscillante fino a mitigarla. Un risultato già noto in letteratura è invece il contributo molto ridotto sul lato superiore[9], tanto che un getto eccessivamente pressurizzato nella parte alta della base del modello inficerebbe le prestazioni. Per le condizioni cui il sistema è sottoposto, è importante ricordare il fatto che il segnale ottimale non coincida con il segnale di massima portata su tutti i canali; tuttavia, ci viene fornito un importante dettaglio sul fenomeno, ovvero il forte legame tra un alto valore di getto laterale e un alto valore di guadagno nel  $\Delta C_D$ . Nelle *Figura 6.9, Figura* 6.10 e *Figura* 6.11 viene rappresentato il processo di ottimizzazione del *GA* per il medesimo scenario modificando esclusivamente la tipologia di segnale di controllo. Per facilitare l'analisi, si uniscono i risultati ottenuti in output cioè l'andamento della fitness del *GA* sul lato sinistro – con i set di valori inseriti in input, ossia la rappresentazione radiale di destra.



Figura 6.9 | Fitness function e schema polare di rear Platooning **d/L=**0.5, forcing <u>costante</u>



Figura 6.10 | Fitness function e schema polare di rear Platooning **d/L**=0.5, forcing <u>sinusoidale</u>



Figura 6.11 | Fitness function e schema polare di rear Platooning **d/L**=0.5, forcing <u>con doppia sinusoide</u>

Naturalmente all'aumentare delle incognite il grafico si popola di un congruo numero di assi. La sagoma ottimale che ne risulta si mostra come una spigolosa combinazione di punti, ottenuta dall'unione di regioni differenti da cui prende in prestito solo le caratteristiche migliori, tipico effetto attribuibile alla tecnica di crossover.

Una importante verifica da svolgere prevede l'ispezione e la valutazione della regione del punto di ottimo designata dal GA. Sarebbe sconveniente infatti non controllare che tutti i parametri siano determinanti per il risultato della prova: da qui deriva la necessità di rappresentare [x] e fitness(x) nello stesso grafico, anziché in due grafici separati. Decidendo di mettere in risalto in *Figura 6.12* la distribuzione dei valori generati dall'algoritmo rispetto alla fitness che hanno prodotto, sono stati tracciati dei simboli per distinguere i test che hanno performato bene da quelli poco produttivi o addirittura sconvenienti.

Nello schema proposto si sta discutendo di un caso di forcing con getto sinusoidale<sup>7</sup> ed i parametri incogniti contrassegnati con una *x rossa* dimostrano che l'algoritmo ha trovato un ampio range di valori in cui le impostazioni di forcing sono risultate controproducenti, con una ascissa  $\Delta C_D > 0$ . Dopo una lenta fase di migrazione verso il  $\Delta C_D$  quasi nullo o lievemente negativo contrassegnata con dei *punti blu*, i grafici dimostrano che la regione con le impostazioni ottimali (in verde) è unica e ristretta per tutte le componenti di *x*, e che ogni parametro si concentra su un intorno ben preciso del proprio dominio. Su ogni grafico è incoraggiante la constatazione che la regione di fitness ottimale non sia collocata in zone multiple del dominio bensì in un solo raggruppamento di punti, e che tale addensamento sia di dimensioni ristrette: l'ottimizzazione di ogni incognita  $x_i$  è ben posta.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> dal momento che si contano 9 grafici, con 2 dedicati alle tensioni ed 1 alla frequenza per ogni canale.



Figura 6.12 | Distribuzione dei parametri di ottimizzazione rispetto al valore di fitness corrispondente. (un buon valore di fitness è un valore in ascissa < 0)



#### 6.6 Platooning conforcing e d/L = 0.5

Raccogliendo le performance degli scenari condotti in merito al forcing ottimizzato sulla base del miglior platooning a due modelli, in questa sezione si mostra l'influenza delle tipologie di segnale rispetto alla corrispondente condizione *unforced platooning*. Per ognuna delle condizioni è stata calcolata la drag reduction prodotta per d/L = 0.5, sono stati affiancati i  $\Delta C_D$  conseguiti al termine del *GA* delle rispettive tipologie di controllo, con segnale costante, sinusoidale e a doppia sinusoide.

Il guadagno che si è registrato in galleria del vento rimane dello stesso ordine di grandezza di quello già conseguito nelle pubblicazioni di *Amico et al.* e di *Di Bari et al.* con la differenza che nei precedenti test il prototipo era isolato in galleria.

I test forniti dall'ottimizzazione del controllo della scia a valle di un platooning con distanza ravvicinata tra i convogli mostrano che l'effetto del forcing ha apportato beneficio molto consistente al veicolo posizionato in testa (*front condition*), mentre per quello in coda il suo contributo è di gran lunga minore rispetto a quanto già la condizione di *rear* platooning non stia fornendo. In entrambe le condizioni rear e front, il forcing si dimostra comunque una tecnica ad alto potenziale, quando opportunamente ottimizzato.

Dalla *Figura 6.13* si nota che il  $C_D$  di riferimento da cui i test sono originati ha una baseline molto più alta per il convoglio posizionato a monte rispetto al suo analogo a valle: pertanto, se si avesse la possibilità di utilizzare un solo impianto di forcing dedicato ad un gruppo di veicoli, presumibilmente dovrebbe essere installato sul veicolo apripista, poiché è lì che si otterrebbe il massimo beneficio diretto sullo stesso e indiretto sui veicoli in coda.

In tutti i casi il metodo di controllo più efficace è quello con segnale costante, seguito poi dalla doppia sinusoide, con una resa molto simile, mentre il segnale sinusoidale ha performato meno egregiamente. Il fatto che l'algoritmo genetico sia riuscito a garantire l'abbassamento del  $C_D$  di almeno ~0.02 fino ad un massimo ~0.06, anche in condizioni già di per sé largamente migliorate dal platooning, è molto positivo e dimostra le potenzialità di questa tecnica anche quando le condizioni ambiente variano.





Va ricordato che queste performance si registrano su una impostazione di guida elementare con due soli convogli e con uno scenario con condizioni ambientali fisse. La contestualizzazione di questa tecnologia nel settore automotive necessita ancora di perfezionamento, considerando che su un generico tracciato sarebbe necessario poter gestire la capacità di adeguare il forcing ad ogni evenienza. Tuttavia, i risultati proposti offrono un quadro chiaro e vantaggioso delle potenzialità delle tecniche combinate di controllo attivo e passivo, per cui si incoraggiano degli sviluppi ulteriori.

Nel dettaglio, la panoramica generale mostra che:

- I. Il contributo principale nella condizione *rear* è offerto dal platooning quando questo è nella sua distanza ottimale, con un  $\Delta C_D \cong -45\%$  stabile in entrambi i Reynolds testati.
- II. Nella condizione *rear* il forcing registra il suo  $\Delta C_{D max} = -0.056$  e il suo  $\Delta C_{D min} = -0.02$ . Tale escursione nelle performance rende il controllo attivo troppo influenzabile con molta probabilità dalla scia che si origina nello spazio tra i due modelli, rendendo la condizione *rear forced* difficile da gestire dal punto di affidabilità della drag reduction.
- III. Nella condizione *front* il forcing riduce tanto quanto il platooning, se non di più, rispettivamente  $\Delta C_D = -0.052$  e  $\Delta C_D = -0.036$ .
- IV. La tipologia di segnale generalmente migliore è il getto continuo <u>costante</u>. Questa è la tecnica dal punto di vista della portata pneumatica più costosa, ma allo stesso tempo il numero ridotto di parametri facilita i tempi di attesa per l'ottimizzazione rispetto alle metodologie pulsate. Con un *GA* relativamente rapido, si potrebbero investigare più scenari e mappare più accuratamente le impostazioni di forcing ottimale, con lo scopo di realizzare simulazioni non stazionarie in cui è previsto l'utilizzo di un microcontrollore.

Oltre a ciò, l'erogazione di un getto costante risulterebbe più semplice da un punto di vista industriale, portando vantaggi nella realizzazione dell'architettura del sistema e nella scelta dei componenti.

V. Il forcing con segnale sinusoidale ha performato ben al di sotto delle metodologie alternative. Probabilmente le oscillazioni introdotte dalla forzante non riescono a *domare* il comportamento bistabile della scia ma solo ad attenuarlo. VI. Il basso Reynolds concede sia in condizione *front* che *rear* il beneficio più alto del forcing, evidenziando quindi come il forcing sia facilitato nel controllo quando la corrente ha turbolenza debole.

Analizzando il segnale di pressione fluttuante in tre punti strategici della parete posteriore del convoglio, l'informazione raccolta dai microfoni è stata elaborata separando opportunamente il segnale in due porzioni in riferimento alla fase naturale e alla fase forzata del test.



In riferimento all'illustrazione nel capitolo 3, tali punti coincidono con i microfoni n°6, 9, 16

L'analisi in frequenza del segnale di pressione di ogni scenario studiato viene presentata accanto al segnale di controllo ottimale e al coefficiente di resistenza istantaneo. I valori medi di resistenza sono stati calcolati per ognuna delle due fasi del test, per mettere in risalto il  $\Delta C_D$ .

Nella *Figura 6.15 e seguenti* si nota dall'analisi di Fourier dei segnali che ad un efficace segnale di forcing corrisponde inevitabilmente un incremento energetico sul segnale di pressione nella porzione inferiore della base del modello per tutto lo spettro di frequenze.

Osservando le **p**ower **s**pectral **d**ensities relative al forcing con getto costante si fatica a identificare una vera e propria frequenza di picco. Con questo tipo di forcing la densità di potenza del segnale microfonico nella fase forzata è più uniforme rispetto alla versione incontrollata. Utilizzando invece il forcing con segnale sinusoidale si riesce in tutti gli scenari ad identificare una coppia di frequenze dominanti solitamente centrata sui 10 Hz, coincidente in tutti i canali top, side, bot.

In merito ai segnali di pressione non forzati la distribuzione di energia presenta un punto di minimo intorno ad 1 Hz, e l'energia nei 3 canali (top,side,bot) si distribuisce in gran parte negli intorni di [0.1 - 0.5] Hz e di [3 - 10] Hz. Oltre a ciò, la *psd* del caso non forzato sovrappone quasi perfettamente le decomposizioni dei tre canali, validando la presenza nella scia di un'unica struttura pulsante su tutta la base del modello.

Passando al segnale di pressione relativo alla fase controllata, si osserva tra gli effetti principali che, indipendentemente dalla tipologia di forcing, i getti d'aria pressurizzata portano un enorme contributo energetico di pressione nella zona laterale. Confrontando i profili in verde a linea continua e tratteggiata, tale contributo riesce ad innalzare la potenza del segnale di pressione laterale di circa due ordini di grandezza per tutte le frequenze superiori ai 7 Hz. In maniera più attenuata l'effetto si ripropone anche per la pressione fluttuante superiore e inferiore.

Queste informazioni potrebbero indicare che il forcing stia incoraggiando la frequenza di distacco dei vortici dai bordi laterali, e che una regione di sovrapressione dal basso li aiuti nello scorrimento.



Figura 6.15 | Controllo ottimale della scia per ogni tipologia di forcing (rear platooning, bassa velocità)







Figura 6.17 | Controllo ottimale della scia per ogni tipologia di forcing (front platooning, bassa velocità)



Figura 6.18 | Controllo ottimale della scia per ogni tipologia di forcing (front platooning, alta velocità)

## La rappresentazione grafica è accompagnata dalle corrispondenti informazioni numeriche:

Jet Channel	Forcing ottimale (I) [V]	Forcing ottimale (II) $[V_{min} V_{max}] f_{Hz}$	Forcing ottimale (III) $[V_{min} V_{max}] f_{Hz}$ (1° e 2° onda)
top	7.98 V	[7.44, 8.38] V, 7.42 Hz	[0.59, 4.72] V, 4.83 Hz [5.95, 6.33] V, 1.35 Hz
bot	9.28 V	[8.83, 8.98] V, 1.05 Hz	[0.75, 1.13] V, 7.68 Hz [8.07, 8.43] V, 15.36 Hz
side	9.36 V	[9.25, 8.14] V, 21.42 Hz	[3.86, 5.53] V, 20.54 Hz [5.29, 5.78] V18.55 Hz

Tabella 6-4 | Parametri soluzione del GA (rear platooning, d/L=0.5, bassa velocità)

Jet Channel	Forcing ottimale (I) [V]	Forcing ottimale (II) $[V_{min} V_{max}] f_{Hz}$	Forcing ottimale (III) $[V_{min} V_{max}] f_{Hz}$ (1° e 2° onda)
top	7.58 V	[5.85, 8.10] V, 11.49 Hz	[3.79, 5.34] V, 24.24 Hz [1.40, 4.04] V, 13.55 Hz
bot	9.29 V	[7.52, 7.75] V, 33.42 Hz	[3.76, 5.70] V, 10.31 Hz [8.06, 8.11] V, 17.79 Hz
side	9.28 V	[8.22, 9.27] V, 37.13 Hz	[4.54, 4.59] V, 16.02 Hz [6.46, 6.88] V, 4.65 Hz

Tabella 6-5 | Parametri soluzione del GA (rear platooning, d/L=0.5, alta velocità)

Jet Channel	Forcing ottimale (I) [V]	Forcing ottimale (II) $[V_{min} V_{max}] f_{Hz}$	Forcing ottimale (III) $[V_{min} V_{max}] f_{Hz}$ (1° e 2° onda)
top	8.59 V	[7.27, 9.45] V, 40.75 Hz	[1.80, 6.71] V, 41.94 Hz
			[3.01, 8.13] V, 36.42 Hz
bot	9.34 V	[8.48, 8.90] V, 3.75 Hz	[3.68, 8.57] V, 6.30 Hz
			[3.51, 9.25] V, 6.29 Hz
side	9.48 V	[5.72, 9.46] V, 34.32 Hz	[8.87, 8.99] V, 18.82 Hz
			[2.46, 6.24] V, 44.22 Hz

Tabella 6-6 | Parametri soluzione del GA (front platooning, d/L=0.5, bassa velocità)

Jet Channel	Forcing ottimale (I)	Forcing ottimale (II)	Forcing ottimale (III)
	[V]	$[V_{min} V_{max}] f_{Hz}$	$[V_{min} V_{max}] f_{Hz}$ (1° e 2° onda)
top	6.83 V	[5.74, 8.29] V, 8.13 Hz	[5.42, 7.25] V, 3.73 Hz
			[1.31, 8.33] V, 24.09 Hz
bot	6.71 V	[5.51, 8.03] V, 36.03 Hz	[3.58, 5.65] V, 8.79 Hz
			[4.78, 5.50] V, 15.18 Hz
side	8.80 V	[8.14, 9.45] V, 8.59 Hz	[7.22, 9.36] V, 43.24 Hz
			[2.60, 7.70] V, 45.73 Hz

Tabella 6-7 | Parametri soluzione del GA (front platooning, d/L=0.5, alta velocità)

## 6.7 Platooning conforcing: d/L = 0.25 e d/L = 3.00

Discostandosi dalla modalità di platooning più efficace, con distanza d/L = 0.5, sono anche stati eseguiti dei test con getto sinusoidale al variare della distanza nelle *Figura* 6.19 e Figura 6.20, per avere una stima generale sulla riduzione del  $C_D$  ottenibile dal controllo attivo della scia in una fascia più ampia di scenari.



Tutti i test sono stati svolti attuando i getti sul veicolo in coda, con il preciso obiettivo di ottenere dalle tecniche congiunte attive e passive la massima drag reduction possibile su un singolo veicolo.

Il  $\Delta C_D$  ottenuto non è allo stesso livello di quello che si otterrebbe presumibilmente con un getto continuo; tuttavia, il beneficio che ne deriva (compreso tra il ~5% d il ~17% del valore nominale) resta non trascurabile<sup>8</sup>. Osservando i segnali di controllo, ci si accorge che le configurazioni sono tra loro molto differenti. Per platooning con distanze ravvicinate l'algoritmo genetico predilige segnali con oscillazioni medio-alte, mentre quando i due modelli sono molto distanti vengono utilizzate frequenze al limite di quelle concesse dagli strumenti. Da notare inoltre che l'unico test (*rear*, d/L = 0.25, alta velocità) che non è riuscito a ridurre il  $C_D$  di almeno un fattore 0.02 presenta un segnale laterale molto debole.

Si presentano i risultati numerici indicati dal *GA* per il controllo ottimale fuori dalla condizione più efficace di platooning a due veicoli:

Jet channel	<i>V<sub>min</sub></i> [V]	<i>V<sub>max</sub></i> [V]	<i>f</i> [ <i>Hz</i> ]
top	6.1625	8.2351	38.28
bot	8.3905	8.9364	44.46
side	9.1191	9.2662	39.08

Tabella 6-8   forcing ottimale (	rear platooning, d <sub>/</sub>	′L=0.25, bassa velocità)
----------------------------------	---------------------------------	--------------------------

Jet channel	<i>V<sub>min</sub></i> [V]	<i>V<sub>max</sub></i> [V]	<i>f</i> [ <i>Hz</i> ]
top	5.7058	5.8873	2.858
bot	6.1779	7.3171	12.47
side	6.2554	6.7419	8.623

Tabella 6-9 | forcing ottimale (rear platooning, d/L=0.25, alta velocità)

Jet channel	<i>V<sub>min</sub></i> [V]	<i>V<sub>max</sub></i> [V]	<i>f</i> [ <i>Hz</i> ]
top	6.1556	6.6950	13.69
bot	6.6334	6.7881	21.22
side	7.8770	8.0068	16.70

Tabella 6-10 | forcing ottimale (rear platooning, d/L=3, bassa velocità)

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> durante lo svolgimento dei test, non era stato definitivamente accertato che il segnale sinusoidale sarebbe stato il meno performante. Si suggerisce una revisione del processo di ottimizzazione ma con controllo a getto costante.

Jet channel	<i>V<sub>min</sub></i> [V]	<i>V<sub>max</sub></i> [V]	<i>f</i> [ <i>Hz</i> ]
top	7.1324	7.6066	26.11
bot	7.1329	8.7184	31.40
side	8.4356	8.8825	17.71

Tabella 6-11 | forcing ottimale (rear platooning, d/L=3, alta velocità)

In tutti gli scenari, la frequenza più alta è sempre sulla forzante *bottom*, mentre la tensione generalmente più alta è riservata al getto laterale. Anche se non in tutti i canali, la differenza tra la tensione minima e massima tende a ridursi, portando le sinusoidi ad avvicinarsi ad un ipotetico segnale costante.

#### 6.8 Analisi di Wavelet sul segnale di pressione fluttuante

Il segnale di pressione fluttuante è stato anche rielaborato utilizzato la *trasformata di Wavelet*[26]: la *Figura 6.21*, mostra una rappresentazione preliminare di questa analisi. I segnali di pressione dei microfoni in *top, side, bot* installati sulla base del prototipo vengono descritti con una mappa in codice colore in funzione del tempo e della frequenza delle Wavelet, in maniera analoga allo periodogramma ottenibile con l'analisi di Fourier. I colori sono riferiti all'intensità, o *magnitudo,* assunta dalla Wavelet ad un dato istante temporale e ad una specifica frequenza.

Più la magnitudo di una Wavelet ad una data (t, f) è alta, più la porzione del segnale in quello stesso intorno temporale s(t) si approssima ad una Wavelet con frequenza f. Generalmente, la presenza nel diagramma di regioni ristrette con alta intensità ed isolate le une dalle altre lungo la linea temporale indicano che il segnale in analisi registra degli impulsi, non necessariamente periodici nel tempo<sup>9</sup>. La differenza principale con l'analisi di Fourier è connessa alla forma d'onda per la decomposizione del segnale: sul diagramma a doppia risoluzione (tempo-frequenza) l'analisi di Fourier mette in risalto le componenti oscillanti intrinseche di un segnale, evidenziando le armoniche di un fenomeno rispetto ad una frequenza caratteristica, le onde di Wavelet invece le componenti impulsive.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Difatti, l'analisi di Wavelet risulta molto utile in sismografia.



Figura 6.21 | Scomposizione dei segnali di pressione microfonici (TOP, SIDE, BOT) con la trasformata Wavelet. Scala logaritmica, completa estensione temporale dell'esperimento. Si nota il cono di influenza in apertura e chiusura della simulazione.

Rappresentando lo spettro wavelet in scala logaritmica, si nota una regione a bassa fedeltà di decomposizione negli angoli inferiori, denominata *cono di influenza*. Inoltre, utilizzando una banda troppo ampia di frequenze risulta molto difficile una analisi efficace del segnale: per questa serie di motivi, lo spettro è stato riproposto per una banda più ristretta di frequenze, in scala lineare, e nella porzione *centrale* del segnale, lontano dal cono di influenza, nella *Figura 6.23* e seguenti.

Il segnale inizialmente analizzato è stata la pressione del veicolo isolato sottoposto a un numero crescente di Reynolds con getti pneumatici disattivati. La scia di questo ventaglio di condizioni è connotata da un diagramma con un fondo scala piuttosto esiguo, con picchi di magnitudo poco al di sopra di 1.5. L'aumento del Reynolds porta con sé un aumento di magnitudo: quando la velocità della corrente aumenta, sulla base del modello i microfoni registrano una fluttuazione crescente di pressione.



Figura 6.22 | analisi wavelet della scia al variare del Reynolds. Scia associata al test di Figura 5.1 (caso naturale isolato)

Dal caso naturale isolato sono state estratte le due porzioni temporali relative al Reynolds di *bassa* e *alta* velocità, rispettivamente nelle *Figura 6.23 e Figura 6.24.*




In entrambi i casi si nota una distribuzione di picchi omogenea nel tempo nella fascia tra i 20 Hz e i 40H, (connotata in giallo-rosso). Incrociando i segnali dei tre canali, i picchi più intensi avvengono all'incirca nei medesimi istanti temporali. Una seconda componente impulsiva si registra anche al di sopra dei 60 Hz. Applicando il controllo attivo, si verifica un netto incremento di pressione, e l'effetto si riflette anche nello spettro del segnale di *Figura 6.25* e

Figura 6.26. Il fondo scala cambia in maniera diversa da canale a canale, conseguentemente ai valori massimi assunti dalle tensioni di comando, e al tipo di segnale impartito. Nella versione con veicolo isolato, si registra una lunga sequenza di impulsi molto marcata, poco al di sotto dei 50 *Hz*, ma solo su uno dei microfoni di riferimento, anziché in tutti contemporaneamente: tra questi canali, la scia della regione superiore è sempre quella meno energizzata, con il fondo scala più basso.



Figura 6.25 | Analisi wavelet della scia. Confronto tra situazione naturale e forzata. (bassa velocità, caso isolato, sinusoide propo sta con Reinforcement Learning)



Figura 6.26 | Analisi wavelet della scia. Confronto tra situazione naturale e forzata. (alta velocità, caso isolato, sinusoide proposta con Reinforcement Learning)

Aggiungendo un secondo veicolo al sistema forzato, la scia cambia configurazione: l'analisi di Wavelet di *Figura 6.27, Figura 6.28Figura 6.29* mostra le analogie sulla struttura nella condizione *rear* al variare dei tipi di forcing.

Nella condizione *rear*, la compatta sequenza di impulsi verificatasi nel caso *isolato forzato* viene meno: con il platooning sembra che solamente la scia laterale sia interessata da una discreta attività, sebbene piuttosto irregolare. Il fondoscala di pressione laterale supera la magnitudo 5 in tutti le tipologie di forcing. Altra peculiarità in comune tra questi test è la presenza di un impulso di pressione al momento dell'attivazione dei getti registrata dal microfono *bottom*.



Figura 6.27 | Analisi wavelet della scia. Confronto tra situazione naturale e forzata. (alta velocità, rear platooning, forcing di **tipo 1,** <u>riferimento a test di Figura 6.16</u>)





Figura 6.29 | Analisi wavelet della scia. Confronto tra situazione naturale e forzata. (alta velocità, rear platooning, forcing di **tipo 3**)

Per una panoramica più concisa, vengono presentate (*Figura 6.30* e *seguenti*) le trasformate di wavelet della scia registrata dal microfono laterale (quello di maggior interesse) a parità di condizioni ambientali. Dal momento che nei casi naturali l'energia è minore, è stato assegnato un fondo scala adeguato differente dai test forzati.











15

10

5



Figura 6.31 | Trasformata di Wavelet della scia, da sinistra verso destra: - caso isolato (bassa velocità), - front platooning (d/L=0.5), - tecniche di forcing.

10

Time [s]

20





Time [s]

Time [s]

Time [s]

Time [s]

Time [s]

Applicando la cross-correlazione sui segnali di pressione, un risultato notevole è che la scia del convoglio isolato, così come in quello di platooning non forzato, presenta

similarità in tutte le sorgenti di acquisizione, e che non è presente *delay* nel segnale di pressione: le variazioni propagano in maniera simultanea e omogenea nello spazio attorno al modello; quando si abilita il controllo attivo della scia, i coefficienti di cross correlazione si riducono di un ordine di grandezza, e lo shift temporale che li massimizza diventa non nullo. La scia ottiene maggior intensità di pressione, ma le varie parti top, bot e side agiscono in maniera indipendente, in particolar modo adottando il getto costante o a doppia sinusoide.

Nel controllo di tipo sinusoidale, l'andamento dei coefficienti di cross correlazione in funzione dello shift temporale assume talvolta qualche pattern regolare quando la corrente in galleria è sufficientemente elevata, ma considerato il calo generale rispetto al corrispondente non forzato, ciò non ottiene particolare rilevanza affinché sussista un principio di somiglianza tra le regioni della scia. Probabilmente se si potesse applicare maggiore pressurizzazione si otterrebbe una configurazione tale da interferire con forza contro la creazione di strutture organizzate di turbolenza così come si è già verificato a bassa velocità. È interessante notare inoltre che gli shift temporali per la massimizzazione dei coefficienti sono stati investigati in un intorno molto ampio, di  $\pm 8 \ secondi$ : ciò evidenzia quanto sia profondamente cambiata la pressione sulla base posteriore del convoglio durante l'apertura dei getti rispetto alla condizione naturale. Tutti i coefficienti di cross-correlazione sono stati normalizzati in modo tale che le

$$\mathcal{R}_{s1,s2}(\tau) = \frac{1}{\sqrt{\mathcal{R}_{s1,s1}(0) \, \mathcal{R}_{s2,s2}(0)}} \cdot \, \mathcal{R}_{s1,s2}(\tau)$$

sequenze microfoniche dessero come risultato 1 in *auto-correlazione* per il *delay* nullo:



Figura 6.34 | Nella prima fila: coefficienti normalizzati di cross correlazione dei segnali di pressione al variare del parametro di delay 'tau' per i vari scenari; Nelle file successive: i segnali di pressione dei microfoni TOP, SIDE, BOT. (bassa velocità, rear platooning, d/L=0.5)



Figura 6.35 | coefficienti normalizzati di cross correlazione dei segnali di pressione al variare del parametro di delay 'tau' nei vari scenari (**bassa** velocità, **front** platooning, **d/L**=0.5)



Figura 6.36 | coefficienti normalizzati di cross correlazione dei segnali di pressione al variare del parametro di delay 'tau' nei vari scenari (**alta** velocità, **rear** platooning, **d/L**=0.5)



Figura 6.37 | coefficienti normalizzati di cross correlazione dei segnali di pressione al variare del parametro di delay 'tau' nei vari scenari (**alta**velocità, **front** platooning, **d/L**=0.5)

## Conclusioni e sviluppi futuri

Le attività descritte in questo lavoro di tesi hanno tentato di coprire molteplici obiettivi riguardo la riduzione della resistenza di *bluff body* nel settore automotive. Considerate le pubblicazioni preesistenti sugli argomenti che sono stati citati, questa trattazione si propone come un possibile legame fra le parti, fornendo una chiave di lettura ad ampio raggio. Inoltre, con questa tesi si è tentato di dare risposta ad alcune delle domande conclusive di altri, supportando quindi la continuità di un lavoro concreto e ricco di potenzialità.

Disponendo delle informazioni sperimentali raccolte sulle tecniche di platooning e forcing, sono state ripetute le medesime prove con lo scopo di sostenerne l'autenticità in prima istanza, e in un secondo momento di espanderne il dettaglio. La riduzione della resistenza attraverso tecniche passive e attive non poteva che trovare un punto di incontro, considerando il beneficio individuale dei metodi, ma l'impatto che si sarebbe verificato sulle prestazioni doveva assolutamente essere investigato. L'innovazione agli inizi della ricerca lascia progressivamente il posto all'esplorazione, e ciò che ne consegue è incoraggiante: la tecnica attiva di forcing porta a riduzioni del  $C_D$  con lo stesso ordine di grandezza sia che venga utilizzata singolarmente, sia che venga affiancata al controllo passivo con platooning in una ampia scelta di contesti.

Effettuare un ragionamento in termini percentuali potrebbe risultare fuorviante, considerando che gli esperimenti hanno condotto a risultati differenti a seconda delle condizioni, e ognuno di questi necessita delle dovute premesse. Degno di nota è il fatto che il platooning riduce considerevolmente la resistenza globale del sistema quando la distanza che intercorre tra i modelli è la metà della loro lunghezza. Questa tecnica si lascia influenzare solo marginalmente dalla variazione del Reynolds associata alla velocità della corrente, in maniera più visibile sul convoglio in testa - con un vantaggio dal -17% al - 11% - di quanto non succeda su quello in coda - con una riduzione stabile al -45% sul  $C_D$  nominale.

A partire da questo contesto, il forcing prosegue l'opera di drag reduction, con un  $\Delta C_{D max} \cong -0.055$  quando in condizioni ottimali. L'effetto raggiunto con questa tecnica attiva è altamente influenzato dal Reynolds, poiché la sua efficacia è garantita fintanto che il rapporto tra velocità dei getti pneumatici rispetto alla velocità della

75

corrente rimane alto. Le variazioni del Reynolds degradano in maniera più evidente sul convoglio in coda, mentre garantiscono un consistente  $\Delta C_{D min} \cong -0.035$  sull'apripista durante la condizione più sfavorevole, ad alta velocità. Una importante peculiarità raggiunta in merito al forcing è sulla tipologia del getto: il getto con velocità costante performa meglio rispetto ad altri segnali di controllo pulsati, ed è facile da realizzare da un punto di vista tecnico, e potrebbe trovare una maggior approvazione nel mondo industriale. Di contro, la pressione registrata sulla base del modello equipaggiato durante le prove forzate è superiore rispetto alle prove in assenza di controllo attivo, e bisognerà quindi verificare l'impatto dal punto di vista strutturale di questo aspetto su prototipi più realistici. In aggiunta, quando si utilizza forcing la pressione introdotta dai getti pneumatici si distribuisce in maniera non uniforme lungo la base del modello, perdendo correlazione tra le sue regioni: quella scia dalla struttura regolare che si registra o in assenza delle tecniche o in presenza di solo platooning, scompare con l'introduzione del controllo attivo.

Circa il costo del carburante, alla resistenza aerodinamica se ne attribuisce il merito di circa il 20 - 30%, pertanto la sua riduzione è un obiettivo fondamentale considerando il vantaggio in termini economici e ambientali.

Il fatto che il punto di ottimo non sia lo stesso quando lo scenario modifica le sue condizioni purtroppo richiede l'utilizzo di tecniche di ottimizzazione. L'utilizzo dell'algoritmo genetico è stato scelto per la sua intuitività, per la sua flessibilità nel risolvere problemi multidisciplinari e per la facilità con cui i linguaggi di programmazione lo hanno reso facile da utilizzare in ambito di ricerca. La sua resa può essere definita sufficiente se si pensa ai risultati ottenibili in tempi ragionevoli, ma non ottimale, considerato che attualmente nuovi metodi risolutivi come il machine learning potrebbero risultare più competitivi in problemi come quello in esame.

In merito al progetto, ci si auspica una prosecuzione su più fronti, con sviluppi nel concreto e nella teoria. Oltre ad un ampliamento delle performance del platooning con un numero più alto di convogli con distanze eterogenee, dovrebbero essere investigati i margini prestazionali derivanti dall'uso simultaneo di forcing su entrambi i modelli. Maggiore attenzione dovrebbe essere riservata alla ricerca di segnali di controllo ottimali dal punto di vista dell'efficienza energetica, anziché della resa prestazionale. Si potrebbe anche ritenere interessante incrementare il range di Reynolds da analizzare

76

mantenendo invariata la configurazione di platooning e la configurazione con getto continuo, in modo tale da ottenere una mappatura completa del segnale di controllo ottimale e giungere alla realizzazione di un microcontrollore per simulazioni a velocità variabile.

I migliori studi che si possono fare sono quelli intrapresi per seguire le proprie passioni e per soddisfare la propria curiosità, ecco, la curiosità è il vero motore.

## Bibliografia

- G. Minelli, T. Dong, B. R. Noack, and S. Krajnovi
  *Construct of the provided and the state of the sta*
- O. Evstafyeva, A.S. Morgans, and L. Dalla Longa. Simulation and feedback control of the ahmed body flow exhibiting symmetry breaking behaviour. Journal of Fluid Mechanics, 917, 2017.
- 3. S.R. Ahmed, G. Ramm, and G. Faltin. *Some salient features of the time-average d ground vehicle wake*. <u>SAE-Techn. Paper Series</u>, 1984.
- 4. M. Grandemange, M. Gohlke, and O. Cadot. *Reflectional symmetry breaking of the separated flow over three-dimensional bluff bodies*. <u>Physical review. E,83, 2012.</u>
- 5. M. Grandemange, M. Gohlke, and O. Cadot. *Bi-stability in the turbulent wake past parallelepiped bodies with various aspect ratios and wall effects*. <u>Physics of Fluids</u>, <u>725, 2013</u>.
- Y. Haffner, J. Borée, A. Spohn, and T. Castelain. Mechanics of bluff body drag reduction during transient near-wake reversals. Journal of Fluid Mechanics, 894, 2020.
- G. Rigas, A.R. Oxlade, A.S. Morgans, and J. F. Morrison. Low-dimensional dynamics of a turbulent axisymmetric wake. Journal of Fluid Mechanics, 755, 2014.
- 8. D. Barros, J. Borée, B. R. Noack, A. Spohn, and T. Ruiz. *Bluff body drag manipulation using pulsed jets and coanda effect*. Journal of Fluid Mechanics, 805, 2016.
- 9. J. J. Cerutti, C. Sardu, G. Cafiero, and G. Iuso. *Active flow control on a square-back road vehicle*. <u>Fluids, 2020.</u>
- 10. D. Barros, J. Borée, B. R. Noack, and A. Spohn. *Resonances in the forced turbulent wake past a 3d blunt body*. <u>Physics of Fluids, 2016.</u>
- 11. J. D'Errico (2022). Surface Fitting using gridfit. MATLAB Central File Exchange. Retrieved July 1, 2022.
- 12. Seolyoung Lee, Cheol Oh, and Gunwoo Lee. Impact of Automated Truck Platooning on the Performance of Freeway Mixed Traffic Flow. Journal of Advanced <u>Transportation, 2022.</u>

- 13. European Union Commission, CO2 emission standards for new cars and vans, <u>2022.</u>
- 14. C. Darwin. The origin of species by means of natural selection. 1859.
- 15. M. Wahde. Biologically inspired optimiztion methods an introduction. <u>1986.</u>
- 16. J. H. Holland. Adaptation in natural and artifical systems. <u>University of Michigan</u> <u>Press, 1975.</u>
- 17. M. Paprzycki O. Roeva, S. Fldanova. Influence of the population size on the genetic algorithm performance in case of cultivation process modelling. <u>2013.</u>
- 18. E. Amico. Controllo della scia di corpi tozzi mediante Reinforcement Learning. <u>Tesi Magistrale, 2021.</u>
- 19.D. Di Bari. Controllo della scia di corpi tozzi mediante algoritmo genetico. <u>Tesi</u> <u>Magistrale, 2022.</u>
- 20. P. W. Bearman, D. De Beer, E. Hamidy, and J. K. Harvey. *The effect of a moving floor on wind-tunnel simulation of road vehicles*. <u>SAE Technical Paper 880245</u>, <u>1988. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2941229</u>.
- 21.H. Hassan, S. Dessouky, A. Talebpour. *Investigating the Impacts of Truck Platooning on Transportation Infrastructure in the South-Central Region*. <u>Retrieved</u> <u>from https://digitalcommons.lsu.edu/transet\_pubs/84. Tran-SET, 2020.</u>
- 22. C. Darwin. The origin of species by means of natural selection. 1859.
- 23. A. H. Wright, Genetic Algorithms for Real Parameter Optimization, <u>1991.</u>
- 24. D. J. Bernstein, Understanding brute force, 2005.
- 25. C. Sardu, D. Lasagna, and G. Iuso. Noise filtering for wall pressure fluctuations in measurements around a cylinder with laminar and turbulent flow separation. Journal of Fluids Engineering, 2016. doi: 10.1115/1.4032034.
- 26.L. Verdoliva. La Trasformata Wavelet. Appunti di Elaborazione di Segnali Multidimensionali, <u>2017/2018</u>.
- 27. European Parliament. *Emissioni di CO2 delle auto: i numeri e i dati. Infografica.* Legislative Observatory, pubblicato 25/03/2019, aggiornato 15/06/2022.
- K. Deep, K. P. Singsh, M. L. Kansal, C. Mohan. A real coded genetic algorithm for solving integer and mixed integer optimization problems. <u>Applied Mathematics and</u> <u>Computation, 212 (2009), 505–518</u>.
- 29. A. Kuhn, J. Carmona, E. Thonhofer, D. Hildenbrandt. Scenario-Based Simulation Studies on Platooning Effects in Traffic. In: Schirrer, A., Gratzer, A.L., Thormann, S.,

Jakubek, S., Neubauer, M., Schildorfer, W. (eds) Energy-Efficient and Semiautomated Truck Platooning. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. Springer 2002.