

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

Tesi di Laurea Magistrale



**Politecnico  
di Torino**

# Controllo della scia di corpi tozzi mediante Algoritmo Genetico

Relatore:

prof. Iuso Gaetano

ing. Cafiero Gioacchino

Candidato:

Di Bari Domenico s264617

Anno Accademico 2021-2022

## Sommario

Questo lavoro di tesi mostra l'applicazione in ambito sperimentale dell'algoritmo genetico (GA) per il controllo attivo della scia di un veicolo da trasporto commerciale. Il controllo è ottenuto attraverso l'attuazione di quattro getti d'aria, continui e pulsati, posti lungo i bordi della base del modello del veicolo.

È stata valutata la dipendenza del numero di individui che compongono la popolazione, evidenziando che un aumento del numero degli stessi è necessario per l'apprendimento di compiti più complessi, soprattutto nel caso pulsato. Ci si aspetta però che un ulteriore aumento significativo del numero di individui non porti vantaggi.

Nel caso pulsato, come segnale forzante, si è considerata una somma di due sinusoidi. Compito dell'algoritmo genetico è la definizione dei valori ottimi di ampiezza e frequenza di ciascuna delle due sinusoidi. Si è verificato che l'algoritmo trova una strategia per ridurre la resistenza aerodinamica del modello, raggiungendo valori di riduzione della resistenza fino al 15 % nel caso di attuazione continua, mentre il 9 % nel caso di attuazione pulsata. La funzione è stata definita in modo da minimizzare il coefficiente di resistenza, senza tenere conto dell'energia spesa nell'attuazione.

Rispetto ad altre tecniche, l'approccio basato su GA fornisce valori più grandi di riduzione della resistenza, a scapito di un tempo di apprendimento più lungo, dell'ordine di giorni e non ore.

L'analisi del segnale di pressione fluttuante utilizzando la tecnica Proper Orthogonal Decomposition (POD) permette di mostrare che l'effetto del forcing sia tale da simmetrizzare la scia rispetto al piano orizzontale, causando la rottura della cella di ricircolo in due strutture di scala più piccola, mostrando come la forzatura produca una scia più simmetrica.

## Abstract

This work shows the application of the genetic algorithm (GA) for the active control of the near wake of commercial transport vehicle. The control is achieved through the implementation of four air jets, continuous and pulsed, placed along the edges of the base of the vehicle model.

The dependence of the number of individuals in the population was evaluated, showing that an increase in the number of individuals is necessary for learning more complex tasks, especially in the pulsed case. However, it is expected that a further increase in the number of individuals would not lead to advantages.

In the pulsed case a sum of two sine waves was considered, in which the frequency and amplitude of each of the two sine waves is taken into account. It is shown that the algorithm finds a strategy to reduce the aerodynamic drag of the model, reaching drag reduction values to 15 % in the continuous implementation, while 9 % in the pulsed implementation. The function was defined to minimize the drag coefficient, without taking into account the power required for the actuation.

Compared with other techniques, the GA-based approach provides larger values of drag reduction, at the expense of a longer training time, with characteristic time scales of days rather than hours.

The Proper Orthogonal Decomposition (POD) is applied to the fluctuating pressure signals to highlight the most relevant features of the wake, showing how forcing produces a more symmetrical wake and causes the breakdown of the large recirculation cell in two smaller cells.

# Indice

<b>Elenco delle tabelle</b>	III
<b>Elenco delle figure</b>	IV
<b>1 Introduzione</b>	1
<b>2 Algoritmo genetico</b>	5
2.1 Background biologico . . . . .	5
2.2 Generalità dell'algoritmo genetico . . . . .	9
2.3 Struttura dell'algoritmo genetico . . . . .	11
2.3.1 Rappresentazione e inzializzazione della popolazione . . . . .	11
2.3.2 Funzione obiettivo e funzione fitness . . . . .	12
2.3.3 Selezione . . . . .	12
2.3.4 Crossover . . . . .	14
2.3.5 Mutazione . . . . .	16
2.3.6 Sostituzione e Elitismo . . . . .	16
2.3.7 Criteri di stop del codice . . . . .	17
<b>3 Set up sperimentale</b>	18
3.1 Galleria e modello . . . . .	18
3.2 Sistema di attuazione getti . . . . .	20
3.3 Sistema di misura . . . . .	21
<b>4 Implementazione codice</b>	23
<b>5 Risultati</b>	27
5.1 Introduzione . . . . .	27
5.1.1 Check della cella di carico . . . . .	30
5.2 Segnale continuo . . . . .	32
5.2.1 Caso 1: segnale continuo - attuazione simmetrica . . . . .	32
5.2.2 Caso 2: segnale continuo - attuazione asimmetrica . . . . .	34
5.3 Segnale pulsato . . . . .	36
5.3.1 Caso 1 - Popolazione: 5 individui . . . . .	36

5.3.2	Caso 2 - Popolazione: 10 individui . . . . .	39
5.3.3	Caso 3 - Popolazione: 20 individui . . . . .	42
5.3.4	Caso 4 - Popolazione: 30 individui . . . . .	50
5.3.5	Caso 5 - Popolazione: 50 individui . . . . .	53
5.4	Performance dell'algoritmo . . . . .	57
5.4.1	Distribuzione del Cp . . . . .	58
5.4.2	Analisi POD . . . . .	61
5.5	Confronto . . . . .	67
	<b>Conclusioni e sviluppi futuri</b>	<b>70</b>

# Elenco delle tabelle

5.1	Check della cella di carico - Segnale sinusoidale del getto in condizioni di forcing . . . . .	30
5.2	Parametri di attuazione dei getti per segnale pulsato - Popolazione: 20 individui - Prova 1 . . . . .	47
5.3	Parametri di attuazione dei getti per segnale pulsato - Popolazione: 20 individui - Prova 2 . . . . .	47
5.4	Parametri di attuazione dei getti per segnale pulsato - Popolazione: 50 individui . . . . .	55
5.5	Forcing con segnale continuo - attuazione simmetrica . . . . .	57
5.6	Forcing con segnale continuo - attuazione asimmetrica . . . . .	57
5.7	Forcing con segnale pulsato - Popolazione: 20 individui . . . . .	57
5.8	Forcing con segnale pulsato - Popolazione: 30 individui . . . . .	57
5.9	Forcing con segnale pulsato - Popolazione: 50 individui . . . . .	57
5.10	Tabella riepilogativa forcing con segnale continuo - attuazione simmetrica . . . . .	67
5.11	Tabella riepilogativa forcing con segnale continuo - attuazione asimmetrica . . . . .	67
5.12	Tabella riepilogativa forcing con segnale pulsato - Popolazione: 20 individui . . . . .	67
5.13	Tabella riepilogativa forcing con segnale pulsato - Popolazione: 30 individui . . . . .	68
5.14	Tabella riepilogativa forcing con segnale pulsato - Popolazione: 50 individui . . . . .	68

# Elenco delle figure

1.1	Visualizzazioni attorno al corpo di Ahmed . . . . .	3
2.1	Rappresentazione del cromosoma . . . . .	7
2.2	Rappresentazione binaria del cromosoma . . . . .	10
2.3	Schema dell'algoritmo genetico GA . . . . .	11
2.4	Schema della selezione a roulette . . . . .	13
2.5	Crossover a singolo punto . . . . .	15
2.6	Crossover a multi-punto . . . . .	15
2.7	Mutazione . . . . .	16
3.1	Schema del modello . . . . .	18
3.2	Sistema di attuazione e controllo dei getti . . . . .	20
3.3	Schema dell'attuatore . . . . .	21
3.4	Capsule microfoniche . . . . .	22
4.1	Schema concettuale del GA applicato al problema . . . . .	23
4.2	Schema algoritmo attuazione getti . . . . .	25
4.3	Schema algoritmo di acquisizione tramite il modulo National Instrumente . . . . .	26
4.4	Output acquisizione modulo National Instrument . . . . .	26
5.1	Comportamento della cella di carico . . . . .	31
5.2	Comportamento della cella di carico con $-(Cd - Cd_0)$ . . . . .	31
5.3	Voltage vs Generations per segnale continuo - attuazione simmetrica . . . . .	32
5.4	% Cd reduction vs Generations per segnale continuo - attuazione simmetrica . . . . .	33
5.5	Voltage vs Generations per segnale continuo - attuazione asimmetrica . . . . .	34
5.6	% Cd reduction vs Generations per segnale continuo - attuazione asimmetrica . . . . .	35
5.7	Variables vs Generations per segnale pulsato - Popolazione: 5 individui . . . . .	37
5.8	% Cd reduction vs Generations per segnale pulsato - Popolazione: 5 individui . . . . .	38
5.9	Variables vs Generations per segnale pulsato - Popolazione: 10 individui . . . . .	40
5.10	% Cd reduction vs Generations per segnale pulsato - Popolazione: 10 individui . . . . .	41

5.11	Variables vs Generations per segnale pulsato - Popolazione: 20 individui - Prova 1 . . . . .	43
5.12	% Cd reduction vs Generations per segnale pulsato - Popolazione: 20 individui - Prova 1 . . . . .	44
5.13	Variables vs Generations per segnale pulsato - Popolazione: 20 individui - Prova 2 . . . . .	45
5.14	% Cd reduction vs Generations - Popolazione: 20 individui - Prova 2	46
5.15	$\frac{\Delta C_D}{C_\mu}$ vs Generations - Popolazione: 20 individui . . . . .	48
5.16	Andamento dell'onda sinusoidale - Popolazione: 20 individui - 2 prova	49
5.17	Variables vs Generations per segnale pulsato - Popolazione :30 individui	51
5.18	% Cd reduction vs Generations per segnale pulsato - Popolazione: 30 individui . . . . .	52
5.19	Variables vs Generations per segnale pulsato - Popolazione: 50 individui . . . . .	54
5.20	% Cd reduction vs Generations per segnale pulsato - Popolazione: 50 individui . . . . .	55
5.21	Andamento dell'onda sinusoidale - Popolazione: 50 individui . . . . .	56
5.22	Cp base distribution - Getti continui . . . . .	58
5.23	Cp base distribution - Getti pulsati . . . . .	59
5.24	Mode energies per segnale pulsato - Popolazione: 50 individui . . . . .	61
5.25	POD mode 1 per getto continuo simmetrico . . . . .	62
5.26	POD mode 1 per getto continuo asimmetrico . . . . .	63
5.27	POD mode 1 per getto pulsato - Popolazione: 20 individui . . . . .	64
5.28	POD mode 1 per getto pulsato - Popolazione: 30 individui . . . . .	65
5.29	POD mode 1 per getto pulsato - Popolazione: 50 individui . . . . .	66

# Capitolo 1

## Introduzione

Il riscaldamento globale è una problematica che sta assumendo sempre maggior rilevanza a livello globale e sta diventando uno degli argomenti di discussione sempre presenti negli incontri dei vari organismi internazionali; è stata la Commissione Europea, per esempio, a stabilire quali siano le azioni da mettere in atto per ridurre la produzione di  $CO_2$ .

Ad oggi, se consideriamo i mezzi di trasporto su strada quali autovetture e veicoli commerciali leggeri, l'emissione dei gas serra in Europa è pari al 22%.

Con le azioni proposte si cerca di stimolare l'innovazione e lo sviluppo di nuove tecnologie per utilizzare in maniera più efficiente i mezzi di trasporto e realizzare veicoli a basse emissioni, per ridurre quest'ultime del 40% nel breve periodo e del 60% nel lungo periodo e arrivare alla progettazione di veicoli a emissioni "zero". Le stringenti direttive UE [1] fissano, per esempio, la lunghezza massima consentita ai veicoli con spazio extra sfruttato per l'installazione di dispositivi aerodinamici; questi devono essere a scomparsa o pieghevoli e collocati sulla base posteriore, il tutto senza aumentare la capacità di carico del veicolo stesso.

Le emissioni sono proporzionali al consumo di combustibile, il cui prezzo negli ultimi anni ha subito un forte incremento [2]. Il minor consumo comporta una diminuzione dei costi sia per i consumatori, sia per i costi di trasporto sostenuti dalle imprese, che vanno ad impattare sul costo dei prodotti finali.

Lavorare sul quantitativo di emissioni significa non solo cercare di trovare una soluzione al problema ambientale ma anche ottenere benefici dal punto di vista economico.

Per il consumo di combustibile un ruolo di rilievo è dovuto alla resistenza aerodinamica. Questa risulta essere proporzionale al quadrato della velocità, quindi la richiesta di potenza da parte del motore è proporzionale al cubo della velocità stessa. Su strade a scorrimento veloce, il ruolo della resistenza aerodinamica assume un'importanza maggiore rispetto alle strade cittadine e infatti si stima che il consumo di combustibile sia rispettivamente del 50% e 20% [3]. Ancora, da uno

studio condotto nel Regno Unito e negli Stati Uniti si è visto che il carburante rappresenta il 20 – 30% dei costi operativi [4] .

In sostanza, riducendo la resistenza aerodinamica anche di pochi punti percentuale, si ha una notevole riduzione dei costi operativi, del consumo di combustibile e di forti benefici dal punto di vista dell'inquinamento.

Da queste considerazioni notiamo come sia indispensabile ricercare delle condizioni di ottimizzazione aerodinamica al fine di ridurre la resistenza. Le tecniche di riduzione si dividono in tecniche passive e tecniche attive. Per le tecniche passive non è richiesto l'utilizzo di energia e, seppur molto promettenti dal punto di vista dei risultati, hanno delle forte limitazioni legate all'aggiunta di appendici, alla modifica della carrozzeria e alla condizione di funzionamento, perchè sono progettate per lavorare nel punto di massima efficienza solo per la condizione di progetto. Esempi di applicazione di queste tecniche per la riduzione di resistenza di possono trovare in [5] e [6]. Nel caso di controllo passivo su veicoli, in letteratura si trovano diverse soluzioni come l'utilizzo di vortex generators [7], di flaps [8], di deflettori mobili automatici [9] o modifiche locali del corpo [10]. Invece per le tecniche attive è richiesto un certo fabbisogno di energia per il loro utilizzo. Queste risultano più promettenti perché non richiedono una modifica dal punto di vista geometrico, quindi sono più facili da implementare ed essendo più flessibili permettono un corretto funzionamento non solo nella condizione di progetto, ma anche a diverse condizioni al contorno.

In questo lavoro si tratterà la classe di veicoli da trasporto merci usati in strada ad alta velocità, che rientrano nella categoria dei corpi tozzi. Questi corpi presentano una scia a bassa pressione che introduce una drag, principale responsabile della resistenza del veicolo. In questo caso la resistenza è principalmente di forma. Questi corpi sono pensati per ottimizzare il trasporto, penalizzandone l'aerodinamicità. La maggior parte delle tecniche di riduzione della resistenza aerodinamica si concentrano sulla parte posteriore del corpo cercando di aumentare il recupero di pressione. Il motivo di questo risiede principalmente nella forma dello stesso, il quale presenta un retro vettura perpendicolare al suolo.

Per il veicolo possiamo far riferimento al corpo di Ahmed: un solido tridimensionale costruito a partire da un parallelepipedo che presenta una parte anteriore curva, un corpo dritto con sezione trasversale rettangolare e una parte posteriore piatta, che può presentare o meno un angolo inclinato. Questo corpo spesso è utilizzato per studiare il campo di moto di un veicolo, come negli studi di [Ahmed et al.](#) [Minelli et al.](#) hanno dimostrato che migliori prestazioni possono essere ottenute controllando lo strato limite nel punto in cui questo si genera, che nel caso del veicolo coincide con la parte anteriore. Dal punto di vista implementativo però la complessità è maggiore.

La forma di questi corpi permette di generare un'intensa separazione, una dinamica della scia particolarmente complessa che interessa grandi range di scale spaziali. Nonostante la presenza di una geometria simmetrica, avviene la rottura

della scia con conseguente sviluppo di asimmetria. Si è cercato di investigare su quelle che sono le cause e i meccanismi principali all'origine di questo fenomeno. Ad esempio [Evstafyeva et al.](#) hanno studiato e riprodotto numericamente i regimi che caratterizzano la scia prodotta dal corpo di Ahmed. Dai risultati riportati, si osserva come a basso numero di Reynolds la scia si presenta simmetrica e stabile, caratterizzata da due regioni di ricircolo allineate orizzontalmente una accanto all'altra. Verticalmente non è presente simmetria data la presenza di una bolla di ricircolo che crea uno shear layer solo nella parte superiore della base. Nella parte inferiore, nonostante il flusso sottoscocca, non si crea ricircolo.

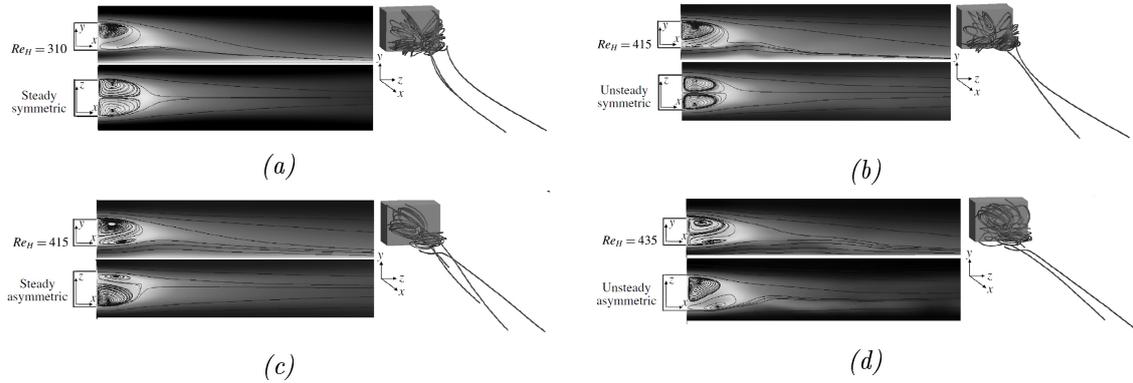


Figura 1.1: Visualizzazioni attorno al corpo di Ahmed a  $Re_H = 310$  (1.1a),  $Re_H = 415$  (1.1b e 1.1c) e  $Re_H = 435$  (1.1d). Le figure a sinistra mostrano le streamline proiettate su di un piano in una vista superiore e laterale, mentre le figure a destra mostrano le streamline nella scia 3D. Fonte: [13]

Aumentando il numero di Reynolds si osserva la formazione di uno stato di simmetria instabile e quindi con durata limitata, perchè si arriva a uno stato asimmetrico stabile. Questo perché [Haffner et al.](#) ha osservato che quando il Reynolds è sufficientemente alto si crea un flusso nel sottoscocca e lo shear layer superiore e inferiore possono interagire e creare un ricircolo nella base sulla parte superiore tale da provocare la rottura della simmetria. La rottura di quest'ultima si ha inizialmente per valori di Reynolds bassi ancora in condizioni di laminarità, come si evince dai lavori di [Grandemange et al.](#), ma persiste anche ad alti numeri di Reynolds e quindi anche quando si raggiunge una condizione turbolenta. La presenza di fluttuazioni nel flusso turbolento è responsabile del passaggio della scia da uno stato asimmetrico ad un altro con scale lente e casuali. In questo caso si parla di bi-stabilità, come nei lavori di [Grandemange et al.](#), o di multi-stabilità come nei lavori di [Rigas et al.](#).

Anche [Barros et al.](#) hanno evidenziato l'importanza cruciale del sottoscocca per l'asimmetria trasversale della scia. Aumentando ulteriormente il numero di Reynolds si osserva una scia instabile e asimmetrica con bolle di ricircolo fisse in

alto sul piano verticale, come si nota in figura 1.1d. Statisticamente la condizione di simmetria viene ripristinata attraverso inversioni laterali casuali della scia stessa. Il comportamento è sempre quello bi-stabile.

In letteratura si trovano diversi lavori in cui si è cercato di correggere l'asimmetria. Va osservato che le tecniche passive determinano un maggiore impatto sulla riduzione della resistenza. Haffner et al. evidenziano come tutte le metodologie utilizzate per controllare il meccanismo dell'asimmetria si basano sul controllo degli shear layers opposti, che è all'origine della bi-stabilità.

Se Li et al. hanno cercato di forzare la scia su entrambi i lati con getti pulsati a bassa frequenza, notando però solo una riduzione pari al 2% della resistenza di pressione, con gli studi di Barros et al. si è dimostrato che per avere una riduzione di resistenza maggiore è necessaria un'attuazione ad alta frequenza. Questo tipo di attuazione è indispensabile se si applica simultaneamente il controllo attivo del flusso e l'effetto Coanda, ovvero la tendenza di un getto di fluido a seguire il contorno di una superficie.

Cerutti et al. hanno effettuato un'indagine sperimentale al fine di ridurre la resistenza del modello di un veicolo a base rettangolare mediante l'utilizzo di getti continui posti nei 4 lati della superficie posteriore. In primo luogo si è osservato che si ottengono benefici esclusivamente con l'attuazione del getto inferiore tale da avere una riduzione della drag di  $\sim 4\%$ ; se a questo si aggiunge l'attuazione dei getti laterali, si ottiene una riduzione maggiore pari al  $\sim 12.7\%$ .

Grandemange et al. hanno effettuato un'indagine sperimentale per comprendere come la geometria e la ground clearance, la distanza da terra, influenzino il campo partendo dalla bi-stabilità della scia. In particolare sono stati usati due modelli con diverso aspect ratio pari a 0.74 e 1.34. L'aspect ratio  $\frac{H}{W}$  è definito come il rapporto tra l'altezza del modello e la larghezza del modello. Diversi sono stati invece i valori della ground clearance, definita come  $\frac{h}{W}$ , cioè il rapporto tra la distanza dal piano inferiore e la lunghezza del modello. Questo studio ha dimostrato che nella condizione di  $\frac{h}{W} > 0.12$  a seconda dei due valori di aspect ratio si ha rispettivamente una condizione di bi-stabilità nella direzione verticale o laterale.

Il presente lavoro di tesi si occupa di investigare gli effetti del controllo attivo del flusso che investe il corpo tramite l'algoritmo genetico (GA) al fine di ridurre la resistenza e analizzare i risultati ottenuti per valutare come evolve la scia nella configurazione di ottimo. Ovviamente, essendo il tipo di controllo attivo, si richiede un consumo energetico per l'attivazione del getto. L'ottimizzazione aerodinamica quindi non consiste solo nella riduzione della resistenza, ma anche nella condizione energetica più vantaggiosa. E' un aspetto che verrà descritto più avanti.

# Capitolo 2

## Algoritmo genetico

Per *Evolutionary Algorithms (EA)* si intende una famiglia di algoritmi di ottimizzazione stocastica ispirati a processi che avvengono durante l'evoluzione naturale. La maggior parte della sua terminologia ha origine nella biologia, nonostante i concetti risultano essere molto più semplificati rispetto ai processi che avvengono nell'evoluzione biologica. EAs è un termine generico che comprende una varietà di diversi algoritmi. E' possibile dividere questa famiglia in varie categorie:

- *Algoritmi genetici GA*: tecnica di ottimizzazione combinatoria basata sulla ricerca, sulla selezione naturale e sui principi della genetica;
- *Programmazione genetica lineare LGP*: i programmi sono rappresentati come singola sequenza di istruzioni;
- *Calcolo evolutivo computazione interattivo IEC*: metodi di calcolo evolutivo che utilizzano la valutazione umana, usati quando la forma della funzione non è nota o quando il risultato dell'ottimizzazione dovrebbe adattarsi a una particolare preferenza dell'utente;
- *Altro*.

In questo lavoro ci occuperemo dell'algoritmo genetico GA.

### 2.1 Background biologico

L'evoluzionismo è il concetto base della teoria dell'evoluzione [22], secondo cui ogni essere vivente discende da altre forme elementari che col tempo, evolvendosi, sono diventate più complesse. Contrario invece è il concetto di creazionismo, la teoria secondo cui gli esseri viventi sarebbero stati creati 'da qualcuno' e da allora non sarebbero mutati.

Secondo la teoria dell'evoluzione, da generazione a generazione, sono avvenuti alcuni piccoli cambiamenti interni a causa della necessità di adattarsi all'ambiente

che hanno portato poi a un cambiamento più evidente a livello globale. Gli esempi sono molteplici: la crescita di una spessa pelliccia sugli animali artici permette loro di proteggersi dal freddo; la pelle di uno squalo ricoperta da piccole costole allineate alla direzione del movimento permettono, grazie all'interazione tra la stessa pelle e i piccoli vortici fluidi che appaiono durante il movimento, di nuotare più velocemente riducendo l'attrito; le co-evoluzioni tra predatore e preda ha permesso sia ai predatori che alle prede di sviluppare muscoli più grandi che permettono loro di correre più velocemente o di avere una visione più acuta grazie agli occhi puntati in avanti dei predatori e quelli puntati lateralmente della preda; la cooperazione tra alcuni animali come formiche o api che permette di coordinare, sfruttando una comunicazione locale, la raccolta di cibo con efficienza o come stormi di uccelli che, muovendosi in gruppo, migliorano la loro raccolta di cibo oltre che proteggersi dai predatori; il mimetismo, in cui l'aspetto esteriore o il comportamento di una specie arriva ad assomigliare a quello di un'altra specie, come le ali di alcuni tipi di farfalle che posseggono dei segni circolari e che quindi assomigliano agli occhi di un gufo, dissuadono i predatori. Gli esempi sono molteplici e molto significativi.

Il processo mediante il quale quindi la teoria dell'evoluzione regge è il concetto di selezione naturale.

*“La conservazione delle differenze e variazioni individuali favorevoli e la distruzione di quelle nocive sono state da me chiamate "selezione naturale" o "sopravvivenza del più adatto". Le variazioni che non sono né utili né nocive non saranno influenzate dalla selezione naturale, e rimarranno allo stato di elementi fluttuanti, come si può osservare in certe specie polimorfe, o infine, si fisseranno, per cause dipendenti dalla natura dell'organismo e da quella delle condizioni”* scrive Darwin.

È l'azione della selezione naturale, cioè l'interazione tra i singoli individui e il loro ambiente, che guida il corso dell'evoluzione. In pratica, ogni essere vivente ha delle caratteristiche genetiche che lo contraddistinguono e queste possono modificarsi in relazione all'ambiente, ovvero alla necessità di essere più efficaci per la sopravvivenza e di conseguenza si avrà una specie più evoluta. La selezione naturale è dunque ciò che ci permette di cambiare per poter vivere e sopravvivere in un determinato habitat. È lo stesso concetto che sfruttano gli allevatori di bestiame o di cavalli: scelgono gli esemplari di animali da far riprodurre in base alle caratteristiche che sembrano loro più convenienti come mucche che fanno più latte o cavalli che corrono più velocemente. Anche se i due concetti comunque sono gli stessi, uno è del tutto naturale mentre l'altro dipende dall'uomo.

Quando individui con determinate caratteristiche sopravvivono e si riproducono, mentre altri che non posseggono queste caratteristiche sono eliminati, la popolazione lentamente si modifica. La popolazione è uno dei concetti chiave della teoria, perché implica che un gruppo di individui della stessa specie, accoppiandosi, può portare ad avere una prole fertile. Per esempio, se una giraffa avesse il collo più lungo rispetto a

quello di altre giraffe, potrebbe con maggior successo raggiungere e mangiare foglie di alberi più alti e di conseguenza, essendo questa una caratteristica favorevole, si trasmette alla sua prole generando una nuova generazione di giraffe dal collo lungo, facendo sì che quelle con il collo più corto non riescano a sopravvivere.

Il principale fattore su cui si basano i processi evolutivi è la variabilità esistente nelle popolazioni che appartengono alla stessa specie. Secondo **Darwin** le variazioni presenti tra gli individui sono dovute solo al caso e non a una conseguenza dall'ambiente o della volontà degli organismi stessi; queste variazioni infatti non hanno né scopo né direzione, ma possono essere più o meno utili a un individuo per la sua sopravvivenza e la sua riproduzione. Affinché le proprietà favorevole degli individui possano essere trasferite da una generazione all'altra, devono essere in qualche modo memorizzate. Gli strumenti necessari per chiarire il processo di memorizzazione e trasferimento delle informazioni negli organismi biologici, a livello molecolare, non erano disponibili ai tempi di Darwin. La scoperta del DNA e il successivo chiarimento dei processi di base dell'evoluzione naturale costituiscono uno dei grandi successi della biologia molecolare nell'ultimo mezzo secolo [23].

Ad oggi infatti, sappiamo perfettamente come l'informazione viene trasferita da un individuo al successivo. In effetti ogni specie porta con sé, in ogni cellula del corpo, diversi cromosomi sotto forma di DNA molecolare. Ogni cromosoma, a sua volta, contiene un gran numero di geni, che sono le unità dell'ereditarietà e contengono le informazioni necessarie per costruire e mantenere un individuo. Il numero di cromosomi, e quindi anche il numero di geni, varia tra le specie. Negli esseri umani, ogni cellula contiene 23 coppie di cromosomi, e il numero totale di geni è stimato intorno a 20000-25000 [24].

Ogni gene è composto da una sequenza di basi. Ci sono quattro molecole che servono come basi nei cromosomi, e così l'informazione è memorizzata in modo digitale, usando un alfabeto con quattro simboli, come illustrato in figura 2.1.

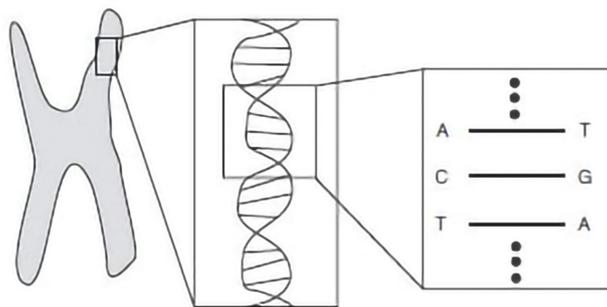


Figura 2.1: Rappresentazione del cromosoma. Nella parte sinistra è presente una rappresentazione schematica di un cromosoma. Sulla destra sono mostrate le singole coppie di basi e si nota come sono accoppiate le varie molecole: A è sempre accoppiata con T e C è sempre accoppiata con G. Fonte: [25]

Le molecole di DNA sono a doppio filamento ed è indispensabile durante la replicazione dello stesso, perché ogni filamento serve per la creazione del filamento opposto. La funzione e lo scopo dei geni è quindi di fornire le informazioni necessarie per formare le proteine, che sono i mattoni della vita e sono coinvolti in un modo o nell'altro in quasi tutte le attività che si svolgono all'interno della cellula. Tuttavia, non tutti i geni sono attivi in ogni momento, ma alcuni geni sono attivi principalmente durante lo sviluppo dell'individuo, mentre altri geni sono attivi durante la vita adulta. Ogni gene può avere diverse impostazioni, note come alleli, e i diversi alleli sono responsabili dei vari aspetti di un individuo, come il colore degli occhi e il colore dei capelli negli esseri umani. Ora, il genoma completo di un individuo, con tutte le sue impostazioni è noto come genotipo. Durante lo sviluppo, le informazioni memorizzate nel genotipo vengono decodificate, e l'individuo mostrerà quindi i suoi tratti distinti, il fenotipo. Va notato, tuttavia, che non tutti i tratti fenotipici sono codificati come singoli geni ma al contrario, molti tratti richiedono un'interazione complessa tra diversi geni. Inoltre, non tutti i geni codificano qualcosa che è facile da visualizzare come, ad esempio, il colore degli occhi.

I due concetti chiave nell'evoluzione sono fitness e riproduzione, e questi concetti sono fortemente intrecciati. Infatti la fitness è uguale alla probabilità di riprodursi. Gli individui che sono ben adattati al loro ambiente, non solo in riferimento al clima o alla geografia della regione in cui essi vivono, ma inteso anche come forza e intelligenza rispetto ad altri membri della stessa specie o di altre specie, hanno una maggiore possibilità di riprodursi e quindi di diffondere il loro materiale genetico, con il risultato di più individui che hanno queste proprietà. Così, nel corso di lunghi periodi di tempo, le proprietà degli organismi biologici cambieranno gradualmente.

La riproduzione è il momento centrale per il cambiamento evolutivo e ne ritroviamo due diversi tipi in natura: la riproduzione asessuata e la riproduzione sessuale. La riproduzione asessuata avviene in organismi unicellulari come i batteri, in cui la cellula e il singolo cromosoma chiuso su se stesso in una struttura a spirale, si dividono in due. La riproduzione sessuale è una procedura molto più complessa, che non sarà qui descritta in dettaglio, ma sostanzialmente basti considerare che il materiale genetico di due individui viene combinato ovvero alcuni geni vengono presi da un genitore e altri dall'altro. La copiatura delle informazioni genetiche avviene con notevole precisione, anche se si verificano spesso alcuni errori conosciuti come mutazioni e costituiscono i fornitori di nuove informazioni su cui l'evoluzione può agire.

Questa breve descrizione riassume alcuni dei concetti principali della biologia evolutiva e della biologia molecolare, anche se in modo semplificato e un po' incompleto. Una presentazione più approfondita di questi argomenti può essere trovata in [Lewin](#).

Questo è tutto ciò che sta alla base degli EA e in particolare, in questo lavoro di tesi, degli algoritmi genetici GA.

## 2.2 Generalità dell'algoritmo genetico

L'algoritmo genetico è un metodo stocastico di ricerca globale che imita il processo di evoluzione naturale descritto da Darwin. La stocasticità dell'algoritmo implica che possono essere ottenuti diversi risultati eseguendo più volte questi algoritmi perchè si basano su numeri casuali nonostante la ricerca sia comunque guidata da parametri ben stabiliti. Di contro, quelli classici sono deterministici, quindi partendo da stesse condizioni iniziali i risultati ottenuti sono sempre gli stessi. La stocasticità non implica sempre uno svantaggio nel metodo di ottimizzazione perchè gli algoritmi genetici sono capaci di trovare diverse soluzioni a un problema, tutte ugualmente valide. Allo stesso tempo questi algoritmi sono il miglior esempio di ottimizzazione basato su fenomeni naturali; non a caso la natura è un adattamento, che può essere quindi considerata come forma di ottimizzazione. A differenza dei metodi classici, l'algoritmo genetico si basa su un insieme di punti che formano una *popolazione*, facendo sì che le singole caratteristiche di ogni individuo della stessa, possano essere combinate con quelle di altri individui e poi trasmesse, adattandosi all'ambiente circostante. I metodi di ottimizzazione classica invece, partono da un solo punto e si muovono in quella direzione. L'adattamento si riferisce al cambiamento graduale delle proprietà o dei comportamenti in risposta all'ambiente, e questo però differisce da ciò che avviene naturalmente a ciò che succede nei problemi ingegneristici: in natura l'obiettivo è sempre in movimento, cioè le specie sono soggette a cambiamenti nell'ambiente simultaneamente; nei problemi ingegneristici l'obiettivo è fisso e specificato in anticipo. Tuttavia, nonostante la complessità degli organismi biologici ma la semplicità di concetti basati sull'evoluzione, è possibile adattare algoritmi genetici all'evoluzione naturale. Con l'algoritmo genetico quindi ad ogni generazione è creato un nuovo "set" di individui, quindi una nuova popolazione, in risposta all'adattamento, definita *fitness*, e accoppiati usando operatori che imitano i processi di selezione naturale. La fitness quindi si basa sulla funzione obiettivo, l'unica funzione che è necessario conoscere. E' per questo che questi algoritmi sono più efficienti rispetto ai metodi di ottimizzazione classica.

Le variabili appartenenti al dominio, vengono codificate in stringhe di cifre, ciascuno delle quali rappresenta un individuo della popolazione. Le stringhe sono definite cromosomi e le cifre che costituiscono ogni stringa sono chiamate geni, in accordo con la terminologia biologica. I cromosomi con i loro specifici geni vengono codificati mediante un determinato alfabeto, così che a ogni genotipo corrisponde un determinato fenotipo nel dominio delle variabili. Diversi sono gli schemi di codifica che si possono usare. Negli algoritmi genetici originali, quelli introdotti da Holland, veniva impiegato uno schema binario composto da  $[0, 1]$ . Per esempio, considerando un problema con  $N$  individui  $x_i$  con  $i = 1, \dots, N$  possiamo definire una struttura cromosomica come segue in figura 2.2

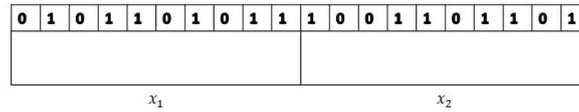


Figura 2.2: Rappresentazione binaria del cromosoma. Nella figura sono rappresentati solo due cromosomi che codificano due individui, con una precisione ciascuna di 10 bit

Ovviamente il numero di bit per ogni variabile si riflette sull'accuratezza e sul range delle variabili.

Quando l'algoritmo viene inizializzato, viene generata una popolazione, cioè un numero di  $N$  cromosomi  $c_i$  con  $i = 1, \dots, N$  assegnando valori casuali ai geni. I cromosomi così formati costituiscono la prima generazione. In natura, in realtà, la popolazione è definita da un insieme di individui e non da un insieme di cromosomi. In questi algoritmi invece non esiste una distinzione tra i cromosomi e gli individui, per rendere quindi tutto più facilmente utilizzabile. Il complesso programma di sviluppo negli organismi biologici è assolutamente assente.

Dopo l'inizializzazione, ciascuno degli  $N$  cromosomi e il relativo genotipo viene decodificato nel suo specifico fenotipo. La procedura può essere implementata in vari modi.

Una volta che si è decodificata la rappresentazione cromosomica, è possibile stimare la fitness di ciascun individuo della popolazione. La fitness è una misura della bontà il cui scopo è quello di fornire un valore, massimizzando o minimizzando una data misura. Questa misura viene stimata tramite la funzione obiettivo, e in analogia al mondo naturale, essa rappresenta la capacità di ogni singolo individuo della popolazione di sopravvivere nell'ambiente in cui si trova. Quindi assegnato a ciascun individuo un valore di fitness mediante la funzione obiettivo, vengono selezionati gli individui che accoppiati daranno vita alla generazione successiva. Quindi la funzione obiettivo stabilisce la base per la selezione di coppie di individui le cui informazioni saranno unite durante la riproduzione. Individui con una maggiore fitness rispetto all'intera popolazione avranno maggiori probabilità di essere selezionati e quindi di riprodursi, al contrario di individui con basso valore di fitness, che invece vengono scartati. Nella controparte biologica possiamo considerare quindi che esista un processo di selezione i cui gli individui più adatti sono scelti come progenitoti. Durante la riproduzione agisce quindi un operatore di ricombinazione definito *crossover* per scambiare le informazioni genetiche tra coppie o gruppi di individui. Con la ricombinazione il materiale genetico contenuto in ogni singolo cromosoma di lunghezza data viene tagliato in un punto a caso e assemblato con un'altra parte di un altro cromosoma. Vi è anche presente un operatore di *mutazione*, che cambia completamente la rappresentazione genetica di un individuo, cioè all'interno di un cromosoma un singolo gene viene mutato da 0 a 1 o viceversa.

Questo operatore è indispensabile perché permette di inibire la possibilità di convergenza verso un ottimo locale, piuttosto che globale. In effetti anche in natura, un individuo meno adatto può contenere una sequenza di geni che combinato con il materiale genetico di un altro individuo può generarne un altro altamente adatto.

Dopo la riproduzione, la popolazione iniziale viene scartata per far posto alla nuova popolazione, quindi troviamo un meccanismo di *sostituzione*. All'intera popolazione della nuova generazione, viene effettuata nuovamente la decodifica in variabili e la valutazione della fitness tramite la funzione obiettivo al fine di eseguire nuovamente una nuova riproduzione e quindi una nuova generazione.

In questo modo, da una generazione all'altra, gli individui migliori possono proseguire nell'evoluzione e arrivare al risultato desiderato.

## 2.3 Struttura dell'algoritmo genetico

La struttura di un semplice algoritmo genetico è visibile in figura 2.3, nella quale sono messi in evidenza tutte le operazioni eseguite in ogni generazione sulla popolazione e che saranno dettagliatamente descritte nel seguito.

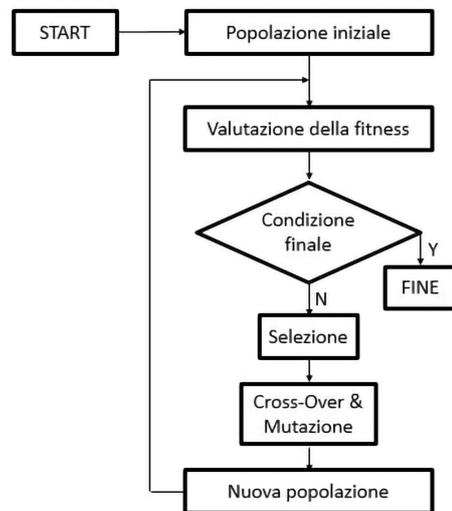


Figura 2.3: Schema dell'algoritmo genetico

### 2.3.1 Rappresentazione e inializzazione della popolazione

La rappresentazione dei cromosomi più comunemente usata è quella binaria nella quale i parametri vengono codificati, appunto, in stringhe binarie e concatenate

per formare un cromosoma. A titolo di esempio, il codice usato per la codifica in binario dei parametri è il codice Grey [28].

In alcuni casi si usano anche geni a valori reali, in modo da avere più informazioni per ogni gene.

Avendo deciso il tipo di rappresentazione, il primo passo è la creazione di una popolazione iniziale. Questa viene generata in maniera casuale e dipende fortemente dai vincoli imposti. Scelto il numero di popolazione, ogni individuo è assegnato in modo da creare una popolazione costituita da variabili uniformemente distribuiti nel range desiderato. Una popolazione è tipicamente composta da un numero di individui compreso tra 30 e 100. E' possibile comunque usare una popolazione di dimensione molto più piccola, quindi 5 – 10 individui, in modo da raggiungere a una soluzione ottimale in breve tempo, considerando però che l'algoritmo non avrà una grande possibilità di spaziare nella ricerca delle variabili appartenenti al dominio. In [29] è stato condotto anche uno studio considerando un numero di popolazione superiore a 100 e si è osservato come non si ottiene nessun vantaggio nell'accuratezza della soluzione, se non invece un costo computazionale decisamente più elevato.

### 2.3.2 Funzione obiettivo e funzione fitness

La funzione obiettivo è quella funzione usata per avere una misura della “performance” di ogni cromosoma e quindi ogni individuo presente all'interno della popolazione.

Nei problemi di minimizzazione, il miglior individuo è caratterizzato dal valore numerico più basso associato alla funzione obiettivo. La funzione obiettivo permette anche il calcolo della fitness dell'intera popolazione. Il valore di fitness si calcola con la funzione di fitness:

$$F(x) = g(f(x)) \tag{2.3.1}$$

in cui  $f$  è la funzione obiettivo mentre  $g$  trasforma il valore fornito dalla funzione obiettivo in un numero  $F$ , cioè appunto il valore di fitness relativo ad ogni individuo della popolazione.

Comunemente viene usata una trasformazione in cui il valore di fitness rappresenta la miglior performance di un individuo all'interno della popolazione.

### 2.3.3 Selezione

La selezione è il processo di identificazione e scelta di particolari individui che saranno utilizzati per riprodursi e formare nuovi individui.

La selezione può essere effettuata in molti modi diversi ma i più comunemente usati sono la selezione a roulette e quella a torneo.

Nella selezione a roulette come in figura 2.4 gli individui sono selezionati nella popolazione usando una procedura proporzionale al fitness: immaginando una ruota della roulette dove ogni individuo occupa una fetta proporzionale al suo fitness e facendola girare e poi fermare, la probabilità che un individuo possa essere selezionato sarà proporzionale allo spazio occupato nella stessa ruota. In pratica, la procedura viene eseguita formando i valori cumulativi di fitness relativa  $\phi_j$  definiti come

$$\phi_j = \frac{\sum_{i=1}^j F_i}{\sum_{i=1}^N F_i} \text{ con } j = 1, \dots, N \quad (2.3.2)$$

con  $j = 1, \dots, N$  e  $F_i$  rappresenta il fitness di un individuo. Successivamente viene estratto un numero casuale  $r \in [0,1]$  e l'individuo selezionato è quello con il piccolo  $j$  che soddisfa  $\phi_j > r$ .

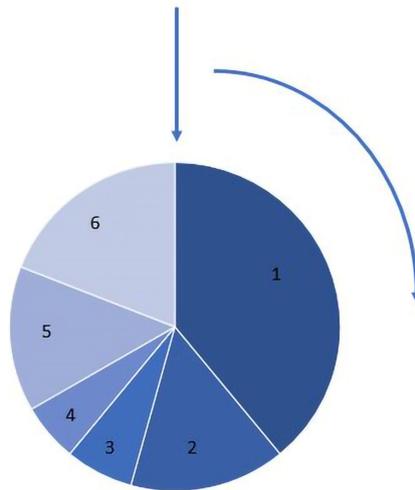


Figura 2.4: Schema della selezione a roulette in una popolazione di cinque individui, ognuno con un suo valore diverso di fitness

La selezione a roulette non è molto plausibile da un punto di vista biologico.

Una procedura alternativa che meglio descrive le tipiche competizioni tra coppie di animali è la selezione a torneo. Nella sua forma più semplice, la selezione a torneo consiste nel prendere due individui a caso dalla popolazione, poi selezionare l'individuo migliore della coppia, cioè quello con la fitness migliore, che quindi assume un certo valore “p”. Così, l'individuo peggiore assume il valore “1-p”. “p”

indica il parametro di selezione del torneo e tipicamente assume valori intorno a 0.7-0.8. In pratica, la selezione dell'individuo si ottiene estraendo un numero casuale  $r \in [0,1]$  e selezionando il migliore dei due individui solo se  $r < p$ , altrimenti viene selezionato l'individuo peggiore. La selezione a torneo può essere generalizzata per coinvolgere più di due individui.

Va notato che in linea di principio nella selezione a torneo sono ammessi valori di fitness negativi, mentre nella selezione a roulette tutti i valori di fitness devono essere positivi. Inoltre, nella selezione a torneo sono importanti solo i valori di fitness relativi tra gli individui scelti, mentre nella selezione a roulette vengono considerati tutti gli individui della popolazione: può capitare infatti che un individuo possa avere valori di fitness superiori alla media nella prima generazione generata casualmente e questo tende a essere presente anche nelle generazioni successive, portando l'algoritmo a bloccarsi in un ottimo locale.

I metodi di selezione introdotti finora sono i due più comuni. Tuttavia, a meno che i parametri di selezione non siano regolati gradualmente, generazione dopo generazione, la fitness degli individui ad alta idoneità è costante nel tempo e questo ovviamente non è sempre favorevole. Considerando che nelle prime fasi di un GA, nessuno degli individui è probabilmente molto buono rispetto all'optimum globale, la procedura di selezione non dovrebbe tener conto del valore di fitness del singolo individuo ma la selezione dovrebbe avvenire in modo da esplorare lo spazio di ricerca e solo successivamente, dopo varie generazioni, valutare il valore di fitness più opportuno. Anche per questo inconveniente è utile avere un numero di individui per popolazione sufficientemente alto.

Quindi, per riassumere, i due metodi di selezione appena presentati non affrontano il problema dell'esplorazione. Per risolvere questo inconveniente si possono usare metodi di implementazione sia per la selezione a roulette che per quella a torneo, come la selezione di Boltzmann, una procedura che introduce concetti di fisica nei meccanismi dei GAs.

Esistono tuttavia altri metodi poco usati e poco pratici per la scelta degli individui da riprodurre.

### 2.3.4 Crossover

Il crossover è un componente essenziale negli algoritmi genetici, perchè permette la ricombinazione parziale di diversi cromosomi per la riproduzione di nuovi. Come nei processi naturali, il crossover produce nuovi individui il cui materiale genetico è dato da entrambi i progenitori. Tuttavia negli algoritmi genetici le dimensioni tipiche della popolazione sono molto più piccole delle migliaia o milioni di individui che si trovano in molte popolazioni biologiche, così che un individuo con tutte le

caratteristiche di ottimo si diffonderà molto velocemente nella popolazione, riducendo così la diversità. Può succedere che si rimanga quindi bloccati in un ottimo locale.

La procedura di crossover può essere implementata in vari modi. La versione più semplice rappresentata in figura 2.5, è il crossover a punto singolo: considerando due cromosomi di lunghezza  $m$ , il punto in cui viene effettuato il crossover è scelto casualmente.

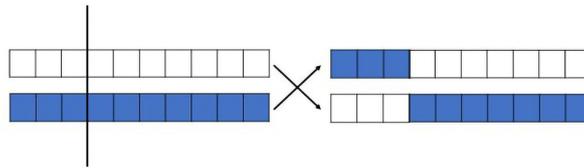


Figura 2.5: Crossover a singolo punto

La procedura può essere generalizzata al crossover a multi-punti rappresentata in figura 2.6 in cui i  $k$  punti di crossover sono selezionati a caso.

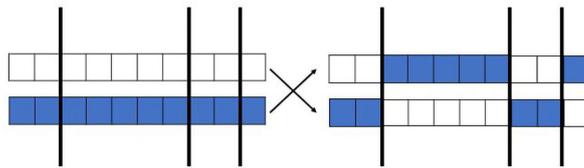


Figura 2.6: Crossover a multi-punto

Questi metodi di crossover permettono di preservare la lunghezza del cromosoma, utile quando si conosce la struttura del sistema, tipo il numero di variabili. E' applicabile sia per il codice binario che per quello a valore reali.

In molte situazioni, è possibile anche che ci sia necessità di cambiare il numero di geni per ogni cromosoma in base allo specifico caso.

### 2.3.5 Mutazione

Le mutazioni svolgono l'importante ruolo di fornire nuovo materiale genetico in ogni generazione per permettere il progredire dell'evoluzione. Utile nel lungo periodo, le mutazioni cercano e recuperano individui potenzialmente utili per la riproduzione, che potrebbero essere stati scartati con l'azione di selezione o crossover.

Negli algoritmi genetici, il valore della probabilità di mutazione è impostato dall'utente prima dell'inizio dell'esecuzione del codice, e viene poi lasciato invariato. La mutazione avviene, in genere, dopo un certo numero di generazioni e dipende dal codice stesso, cioè la decisione di mutare o meno è indipendente dall'operatore. Quello che però si può effettuare è un tasso di mutazione variabile, ma bisogna specificare prima come questo dovrebbe variare, con quale regolarità e frequenza. I tassi di mutazione costanti sono più comunemente usati.

Nel caso di schemi con codifica binaria, la mutazione consiste nel cambiamento di un generico bit, ovvero uno 0 mutato diventa un 1, e viceversa come in figura 2.7.

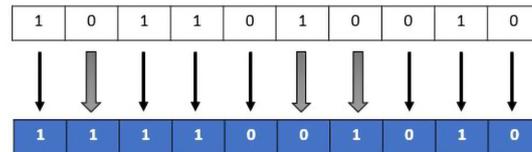


Figura 2.7: Mutazione di due geni all'interno di un cromosoma

Al contrario, nelle codifiche a numeri reali, le modifiche sono tipicamente molto più grandi perché ogni gene a valore reale codifica più informazioni di uno a valore binario.

### 2.3.6 Sostituzione e Elitismo

La sostituzione permette a tutti gli individui nella generazione considerata di essere sostituiti da un numero uguale di figli generati applicando selezione, crossover e mutazione per fornire quindi generazioni successive. La sostituzione non è molto realistica da un punto di vista biologico, perché in natura, diverse generazioni coesistono contemporaneamente mentre negli algoritmi genetici ogni generazione è sostituita dalla successiva e non c'è competizione diretta tra individui di generazioni diverse. Tuttavia, se i tassi di crossover e mutazione sono sufficientemente bassi, è probabile che alcuni individui della prole sarà identica ai genitori, quindi di fatto è una sovrapposizione di generazioni.

Quello che più comunemente avviene è che l'individuo migliore in una data generazione è molto probabile che venga selezionato per la riproduzione ma venga poi distrutto durante il crossover. Quindi per evitare che l'individuo migliore venga perso, è comune fare una o più copie esatte di questo individuo e metterle direttamente, senza alcuna modifica, nella nuova generazione che si sta formando; questa procedura è nota come elitismo.

### 2.3.7 Criteri di stop del codice

A causa della natura stocastica dell'algoritmo genetico risulta difficile andare a definire dei criteri specifici di arresto. Gli individui della popolazione potrebbero rimanere uguali per molte generazioni prima che un individuo con caratteristiche migliori sia trovato; l'applicazione dei criteri convenzionali di stop dell'algoritmo diventano problematici.

La pratica più comune è quella di terminare l'algoritmo dopo un numero ben preciso di generazioni e identificare il miglior individuo. Se la soluzione non è accettabile, si può riavviare l'algoritmo a partire dall'ultima popolazione ottenuta.

Da notare comunque che, nonostante la popolazione iniziale è generata in modo casuale, la maggior parte degli individui potrebbe avere un valore di fitness tale da far sì che si riproducano generando nuova prole ma generazione dopo generazione non ci siano grossi cambiamenti: siamo vicini a un ottimo locale, non globale. Il crossover qui è inutile perché la prole è simile ai progenitori. Solo un serie di mutazioni casuali può mettere in risalto qualche altro individuo, quindi qualche altro ottimo, ma se gli ottimi sono abbastanza vicini, l'intera popolazione rimarrà intorno all'ottimo locale. Questa convergenza verso un risultato ottimale locale è indicato come convergenza prematura. Ovviamente tali mutazioni contemporanee favorevoli sono comunque molto improbabili.

In natura può essere presente questo fenomeno considerando la perdita di diversità.

Esistono comunque dei metodi per evitare la convergenza prematura: tassi di mutazione variabili, in modo che anche la mutazione varia al variare delle generazioni o modificando la selezione e il crossover, passando per esempio da singolo punto a multi punto e così via.

E' comunque più conveniente far riprendere il procedimento dal principio.

# Capitolo 3

## Set up sperimentale

### 3.1 Galleria e modello

La prova viene eseguita utilizzando una galleria del vento a circuito aperto. Il flusso viene accelerato mediante due eliche, ciascuna con dodici pale, poste a monte della camera di prova e il controllo delle stesse è affidato a un pannello a bordo galleria, che permette quindi la regolazione delle eliche contemporaneamente o singolarmente, in modo tale che esse presentino lo stesso numero di giri al minuto, evitando la nascita di flussi non allineati. La camera di prova ha una sezione rettangolare di altezza pari a 0.9 m, larghezza pari a 1.2 m e lunghezza pari a 6.5 m. Questa è inclinata di un angolo di divergenza pari a 1% in modo da tenere in considerazione la crescita dello strato limite legato alla presenza delle pareti. Il flusso viene convogliato mediante un convergente.

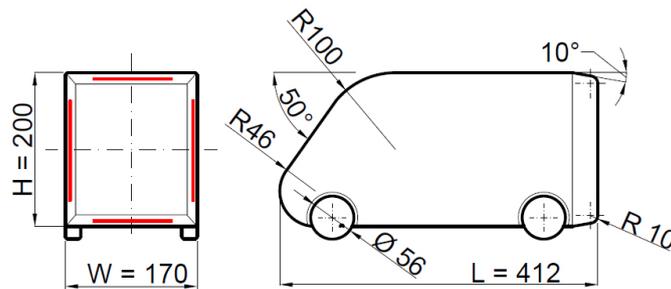


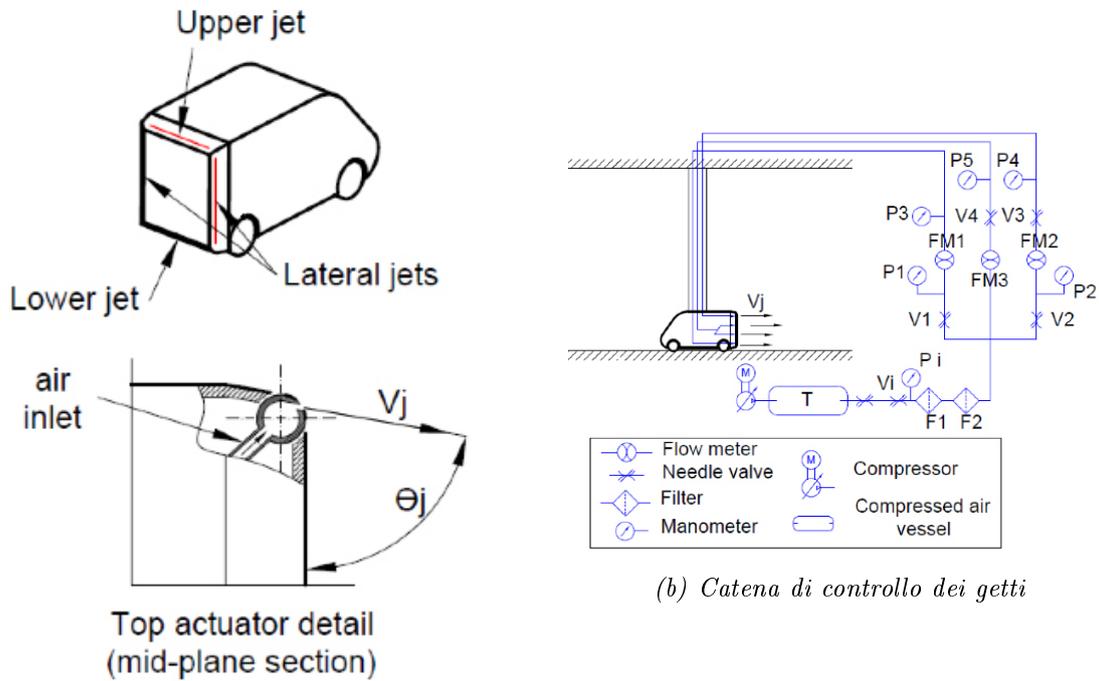
Figura 3.1: Schema del modello. La linea rossa continua rappresenta gli slot di iniezione del sistema di controllo attivo del flusso - Fonte : [21]

Il modello utilizzato è lo stesso utilizzato per studi precedenti [21], un modello in scala 1 : 10 di uno square-back road vehicle, un veicolo medio adibito al trasporto merci con una sezione di altezza  $H = 0.2 \text{ m}$  e larghezza  $W = 0.17 \text{ m}$ . Come illustrato in figura 3.1 la superficie anteriore è inclinata di  $50^\circ$  rispetto all'orizzonte e presenta gli angoli adiacenti arrotondati, mentre la parte posteriore presenta un angolo di inclinazione di  $10^\circ$  nella direzione della scia per enfatizzare l'effetto del controllo attivo, come illustrato nel lavoro di Barros et al.. L'area frontale del modello è pari al 3.1% della sezione trasversale della galleria del vento.

Trattandosi di un problema di ambito automotive, la sperimentazione in galleria del vento presenta principalmente due grandi problematiche: le ruote fisse, non in rotazione, e la presenza di una velocità relativa tra la corrente e la parete inferiore della galleria. Come si evince in [30] la prima problematica interferisce con la misura della resistenza, in quanto si stima che circa il 25% della resistenza sia imputabile ad essa, mentre la seconda problematica crea uno strato limite nel sottoscocca con conseguente diversa distribuzione di pressione e sforzi di attrito, tale da alterare la misura di portanza, non di resistenza. Per risolvere il primo problema si utilizzano dei sistemi in grado di mettere in rotazione le ruote. Per il secondo problema si utilizza o un sistema di aspirazione a monte del modello, così da aspirare lo strato limite, oppure un sistema simile a un tapis roulant, chiamato moving belt, posto in rotazione alla stessa velocità della corrente indisturbata.

Nell'esperimento in esame non vengono applicate queste soluzioni, se non un sistema di aspirazione dello strato limite; svolgendo le prove preliminari si è osservato che l'effetto che si vuole correggere è comunque trascurabile, quindi non più usato nelle prove successive.

Come evidenziato nella figura 3.2b nella parte superiore del modello è posto un supporto con una sezione alare con  $t/c = 0.2$  e  $c/W = 0.07$ , che si estende fino alla parte superiore della galleria. La carenatura aerodinamica serve per ridurre al minimo i problemi legati all'interferenza. Questo supporto è cavo e al suo interno passano le linee pneumatiche per le misure di pressione e per l'attuazione dei getti, il cavo ethernet di connessione con la Smart-Zoc e le linee di connessione con la cella di carico. In questo caso l'aria frontale del modello, tenuto conto anche del puntone, è del 4.5% della sezione trasversale della galleria del vento.



(a) Dettaglio slot di attuazione

Figura 3.2: Sistema di attuazione e controllo getto. Fonte : [21]

## 3.2 Sistema di attuazione getti

Come riportato in figura 3.2a nella parte posteriore del modello sono presenti 4 fessure dove sono posizionati gli attuatori denominati top, bottom e lateral, attraverso le quali è possibile far uscire una certa portata di aria, tale da poter modificare la struttura del flusso circostante. Gli slot superiore e inferiore hanno una lunghezza rispettivamente di  $104\text{ mm}$ , mentre quello laterale di  $132\text{ mm}$ .

Come si nota in figura 3.3 il singolo attuatore è costituito da un cilindro con una fessura rettangolare realizzata sulla sua lunghezza con una larghezza di  $1\text{ mm}$ . E' possibile andare a modificare l'orientazione del getto, semplicemente ruotando il singolo attuatore, ma nella sperimentazione si è mantenuto un angolo fisso pari a  $65^\circ$ .

In figura 3.2b è riportato il sistema di alimentazione dei getti. La regolazione della portata avviene mediante valvole ( $V$ ) e flussimetri ( $FM$ ).

In [21] è stato verificato che la velocità del getto è uniforme per almeno il 95% della lunghezza della fessura.

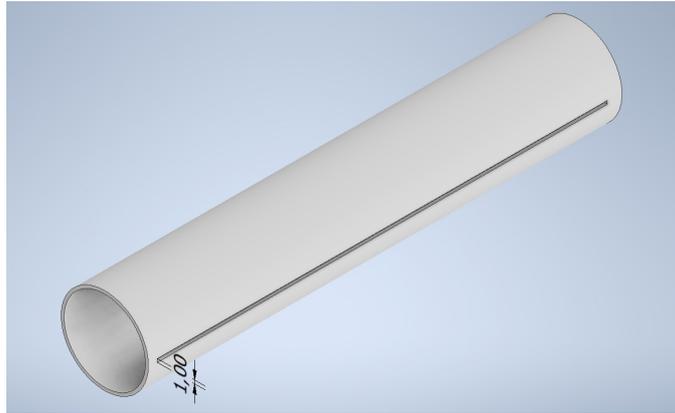


Figura 3.3: Schema dell'attuatore - Fonte: [31]

### 3.3 Sistema di misura

Il modello è strumentato in modo tale da acquisire informazioni sulla pressione statica e fluttuante. La pressione statica viene acquisita tramite trasduttori di pressione multi-input, mentre le fluttuazioni di pressione vengono acquisite tramite capsule microfoniche.

Scendendo in dettaglio i segnali relativi alle pressioni statiche vengono acquisiti mediante una Scanivalve 33 connessa ad una Smart Zoc 100, sistema che permette di acquisire simultaneamente fino a 64 canali. E' possibile scegliere diversi valori di frequenza di campionamento e nel caso in esame è stato scelto un valore pari a  $f = 100\text{Hz}$ . Il trasduttore ha un fondo scala di  $\pm 2.5\text{ kPa}$  ed una accuratezza di  $0.15\%$  del *FS*. I 64 canali sono connessi alle prese di pressione mediante delle connessioni pneumatiche con diametro interno pari a  $\Phi = 1\text{ mm}$ : 31 prese di pressione sono presenti nella parte posteriore del modello, mentre le restanti 33 sono distribuite tra superficie laterale e frontale del modello.

Per quanto riguarda l'acquisizione della pressione fluttuante si utilizzano 16 capsule microfoniche capacitive aventi un diametro esterno di  $9.8\text{ mm}$  ed un elemento sensibile con diametro a  $1\text{ mm}$ . Vi sono presenti 12 microfoni posti sulla faccia posteriore e i restanti 4 sono stati posti sulle quattro facce laterali ad una distanza di  $10\text{ mm}$  dal bordo di uscita, come in figura 3.4. Come si può notare, le capsule microfoniche sono presenti solo nella metà destra del modello.

I microfoni hanno una risposta piatta nel range di frequenze  $0.005 - 13\text{ kHz}$  ed una sensibilità di  $-60 \pm 3\text{ dB}$ . Come riportato e suggerito da Cerutti et al., tutti i sensori sono stati calibrati usando una *Bruel & Kjaer probe*, seguendo quanto riportato in Sardu et al. e, sia per la misurazione che per la calibrazione è stata utilizzata una configurazione di tipo *pinhole* con il segnale elettrico filtrato per eliminare i contributi spuri.

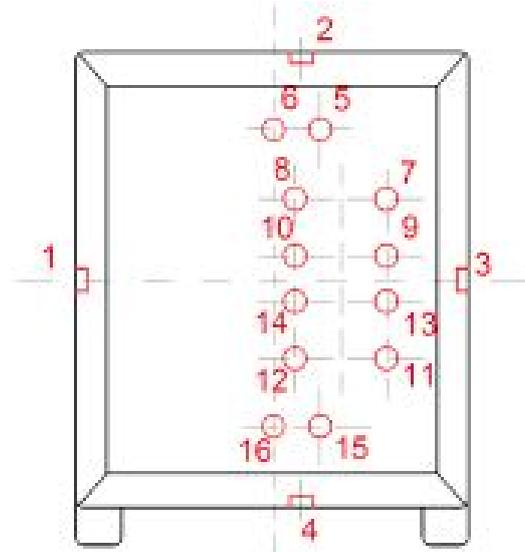


Figura 3.4: Posizione delle capsule microfoniche per l'acquisizione della pressione fluttuante. Fonte : [21]

La misura della resistenza viene eseguita mediante una cella di carico, in particolare una cella *Dacell UU-K002* con un fondo scala  $F.S. = 2 \text{ Kg}_f$  e una precisione pari a  $0.002\%$  del  $F.S.$  Il segnale della cella di carico viene campionato utilizzando uno chassis NI-cDAQ con un modulo convertitore  $A/D$  *NI-9215* dedicato. Il segnale elettrico della cella di carico viene convertito in resistenza attraverso una mappatura di calibrazione.

La misura della velocità a monte viene eseguita mediante il valore del rapporto di pressioni nel convergente. Per far questo è stata effettuata una calibrazione mediante l'introduzione di un tubo di Pitot nella camera di prova, che è stata rimossa subito dopo averla eseguita. La calibrazione ha permesso di ottenere una relazione in grado di convertire la misura del salto di pressione nel convergente in una misura della velocità a monte.

# Capitolo 4

## Implementazione codice

Nel capitolo 2 si è presentato l'algoritmo genetico, mentre ora verrà osservato come questo è stato implementato per poterlo sfruttare nel problema in esame.

L'algoritmo deve essere strutturato in modo da ottenere il controllo dei getti posti nella base posteriore del veicolo e per determinare la condizione di ottimo è necessario che l'algoritmo sia in grado di ricevere informazioni sulla resistenza aerodinamica generata dallo stesso; quest'ultima è garantita dalla connessione con la cella di carico. Solo successivamente si prenderà anche in considerazione la distribuzione di pressione attorno al veicolo.

Nella figura 4.1, è presentato lo schema dell'algoritmo generico, già visto precedentemente, ma applicato al lavoro in esame.

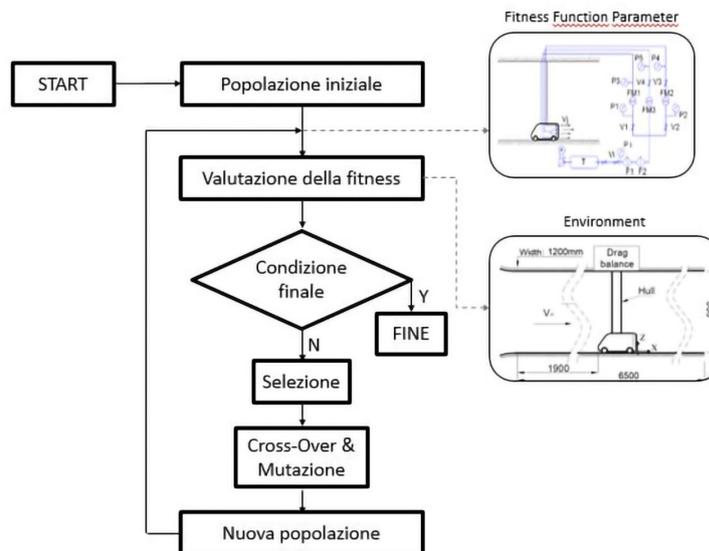


Figura 4.1: Schema concettuale del GA applicato al problema

Dal punto di vista concettuale è possibile delineare quali sono le operazioni che verranno eseguite dall'algoritmo, facendo riferimento alla figura 4.1.

L'implementazione dell'algoritmo genetico è stata effettuata su *Matlab*, sfruttando già codici di calcolo presenti e sviluppati in modo da poterli applicare al problema presentato.

*ga* è il solver di *Matlab* per trovare il minimo di una funzione usando l'algoritmo genetico, quindi parliamo di un problema di ottimizzazione, basandoci su un qualsiasi tipo di vincolo. Nel caso in esame il vincolo è posto dalla funzione definita come *simple – constraint*, ma nel capitolo successivo saranno dettagliatamente descritti quali sono quelli usati per il problema in esame.

Per la minimizzazione si utilizza la funzione di fitness definita *simple – fitness*, che valuta quanto è buona una singola soluzione in una popolazione; con *population – size* è definito il numero degli individui che compongono la popolazione, mentre con *nvars* facciamo riferimento a quante sono le variabili che entrano in gioco nel codice.

La funzione che si vuole minimizzare, quindi la funzione obiettivo per il problema in esame, è del tipo:

$$f = Cd - Cd_0 \quad (4.0.1)$$

dove  $Cd_0$  è il valore del coefficiente di resistenza nella condizione naturale, mentre  $Cd$  è il valore del coefficiente di resistenza nella condizione con forcing.

Il motivo per cui si è introdotta la differenza tra le due resistenze risiede nella natura sperimentale dell'implementazione e quindi la necessità di prendere in considerazione i fenomeni di isteresi e ulteriori problematiche legate alle misure sperimentali.

Nel codice si è usato anche un set di *option* per *ga*, già presenti in *Matlab*, richiamando la funzione *optimoptions*, che permette quindi di poter utilizzare e sfruttare i processi naturali descritti precedentemente, quali Crossover, Mutazione, Selezione e Elitismo. Nel seguente codice è stata utilizzata la selezione a roulette.

L'algoritmo funzionerà quindi in questo modo: in una prima fase il sistema di forcing è mantenuto spento e si acquisisce il segnale dalla cella di carico per determinare  $Cd_0$ , quindi coefficiente di resistenza aerodinamico in condizione naturale. Dopo si aziona il forcing, con la forzante individuata dall'algoritmo, considerando quindi gli individui che compongono le varie popolazioni, e si acquisisce il segnale per determinare il valore di  $Cd$ , quindi coefficiente di resistenza aerodinamico in condizioni forzate. A questo punto è possibile determinare il valore di fitness ed effettuare i processi naturali; questo viene iterato per tutti gli elementi della popolazione e per ogni generazione.

Prima di procedere però è importante andare a definire come poter interfacciare il modello e il codice.

Si è reso necessario far comunicare diversi linguaggi di programmazione cioè *LabView*, *Python 3.6* e *Matlab*, per permettere quindi di pilotare i getti, acquisire i dati ed effettuare il post-processing.

Considerando che l'algoritmo è stato scritto in *Matlab* è stato necessario integrare con gli altri due linguaggi di programmazione, con cui sono scritti i diversi script che permettono l'interazione con il sistema di forcing.

Seguendo il lavoro di *Amico* è stato esportato da *LabView* una libreria DLL, dynamic-link library, in modo da richiamare questa in *Python*. Nel seguito, verrà presentato brevemente il metodo utilizzato, descritto in [31].

Per il controllo dei getti è stato utilizzato uno script *Matlab* che scrive su di un file *.csv* le variabili relative all'attuazione; queste sono lette ciclicamente da un file *Python*, sempre richiamato dallo stesso *Matlab*, che, tramite una libreria DLL, richiama la funzione per attuare i getti. In figura 4.2 è presente uno schema riassuntivo.

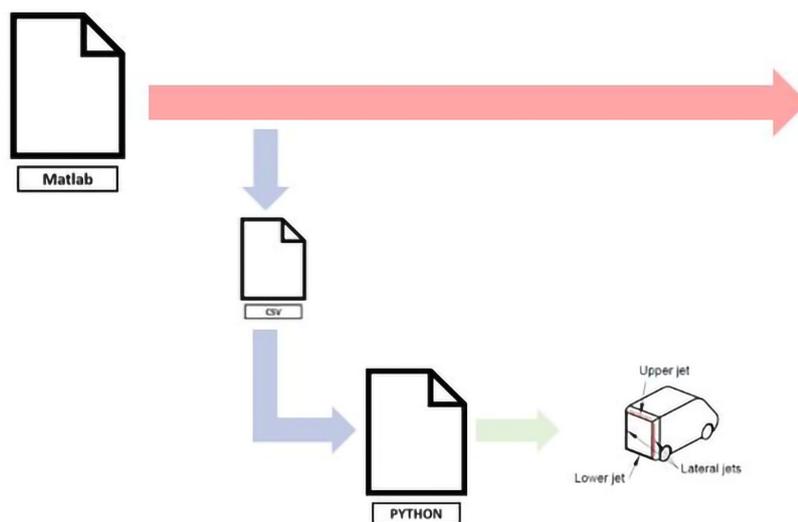


Figura 4.2: Schema algoritmo attuazione getti - In rosso viene rappresentato il processo principale ed in blu il processo secondario che ciclicamente legge il file *.csv* e richiama la libreria DLL con i nuovi parametri di attuazione del getto - Fonte: [31]

Per l'acquisizione dei dati, si richiede la comunicazione con il modulo di National Instrument. A questo sono connesse le 23 capsule microfoniche, la cella di carico e il salto di pressione della contrazione. L'interfaccia con il computer avviene mediante connessione USB. *Matlab* richiama un file *Python* che, tramite una ulteriore libreria DLL, richiama la funzione per acquisire i dati da *LabView* e questi possono essere

visualizzati in un file *.tdms*. Questi dati saranno poi la base per il post processing. In figura 4.3 è presente uno schema riassuntivo del processo, mentre in figura 4.4 viene riportato lo schema dell'output.

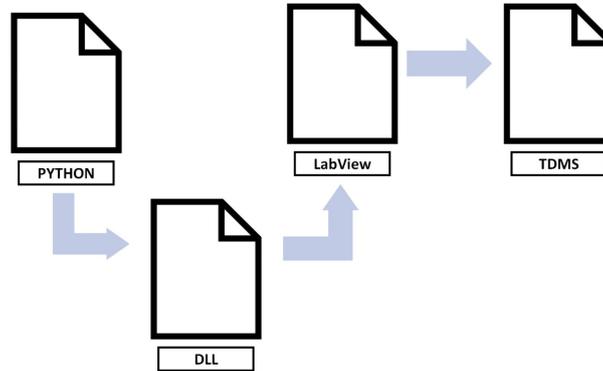


Figura 4.3: Schema algoritmo di acquisizione tramite il modulo National Instrument - Fonte: [31]

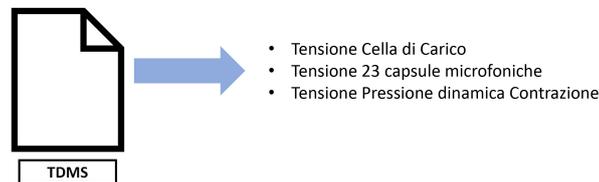


Figura 4.4: Output acquisizione modulo National Instrument - Fonte: [31]

E' importante osservare che nella definizione della funzione obiettivo che si vuole minimizzare non sono presenti considerazioni energetiche, ma si pone come unico obiettivo quello di ridurre il coefficiente di resistenza. Infatti per come è definita l'equazione 4.0.1 si ha che minimizzare la funzione implica una riduzione di  $Cd$ .

Un altro possibile sviluppo di questo lavoro potrebbe essere effettuato imponendo dei riferimenti energetici. In questo modo si può garantire di cercare non la condizione di minor resistenza ma quella che lo fa con miglior efficienza e questo per quanto riportato nel capitolo 1 è particolarmente importante.

# Capitolo 5

## Risultati

### 5.1 Introduzione

In questo capitolo vengono analizzati i risultati ottenuti.

Nel capitolo 3 si è introdotto il set-up sperimentale, in particolare descrivendo il sistema di attuazione dei getti. Questi riescono a riprodurre perfettamente un segnale continuo o un segnale pulsato, non solo come onda sinusoidale ma anche come un'onda quadra o triangolare e così via, con una specifica frequenza, ampiezza e duty cycle. Inoltre il sistema di attuazione è tale per cui l'attuazione superiore, inferiore e laterale sono tra loro indipendenti, ma si tiene conto che l'attuazione laterale, destra e sinistra, non può essere svincolata. Quindi si parla di attuazione simmetrica quando tutti i getti attuano lo stesso segnale, mentre asimmetrica quando i segnali di up, bottom e lateral sono tra loro diversi.

Nel seguente lavoro si è utilizzato sia un segnale continuo sia un segnale pulsato, in particolare un'onda sinusoidale, composta da due sinusoidi, considerando sia l'attuazione simmetrica che quella asimmetrica. In particolare il segnale continuo presenta una fissata ampiezza e duty cycle che nel caso di attuazione simmetrica risulta uguale per il getto up, bottom e lateral e nel caso di attuazione asimmetrica è invece diversa, mentre il segnale sinusoidale presenta una fissata frequenza, ampiezza e duty cycle e il tipo di attuazione considerata è solo simmetrica.

Considerando che il duty cycle è mantenuto sempre fisso e costante, l'algoritmo andrà a definire una serie di parametri in base al segnale e all'attuazione:

- *Getto con segnale continuo e attuazione simmetrica*: una sola variabile, cioè l'ampiezza del segnale;
- *Getto con segnale continuo e attuazione asimmetrica*: tre diverse variabili, cioè tre diverse ampiezze per i tre segnali del getto up, bottom e lateral;

- *Getto con segnale sinusoidale e attuazione simmetrica*: quattro diverse variabili, perché i segnali sono due sinusoidi quindi devono essere definite due frequenze e due ampiezze ma essendo l'attuazione simmetrica, questi parametri saranno uguali ovunque;
- *Getto con segnale sinusoidale e attuazione asimmetrica*: dodici diverse variabili, perché i segnali sono due sinusoidi quindi devono essere definite due frequenze e due ampiezze per ogni getto.

Nel seguito si analizzeranno i tipi di segnali più nel dettaglio.

La mancata presenza di risultati con getto pulsato e attuazione asimmetrica è giustificata dall'elevato tempo richiesto per ottenere dei risultati accettabili. Tuttavia questa analisi rappresenta un suo possibile sviluppo futuro.

I parametri che l'algoritmo deve definire sono quindi per l'appunto, frequenza e ampiezza del segnale.

Per il segnale continuo non c'è bisogno della frequenza e quindi l'ampiezza è solo definita da un segnale di tensione del tipo:

$$y = V_{max} \quad (5.1.1)$$

con  $V_{max} \in [5.5, 9]V$ . Nell'attuazione simmetrica, quindi, l'unico parametro che l'algoritmo deve definire è appunto una tensione, mentre nell'attuazione asimmetrica l'algoritmo deve definire tre diverse tensioni per i tre diversi getti.

Per il segnale sinusoidale c'è invece bisogno di definire una frequenza e una ampiezza ed è del tipo:

$$y = (\Delta V_1 \cdot \sin(2\pi f_1 t) + V_{mean1}) + (\Delta V_2 \cdot \sin(2\pi f_2 t) + V_{mean2}) \quad (5.1.2)$$

in cui le ampiezze sono:

$$\Delta V_1 = \frac{V_{max1} - V_{min1}}{2} \quad (5.1.3)$$

$$\Delta V_2 = \frac{V_{max2} - V_{min2}}{2} \quad (5.1.4)$$

mentre le parti costanti sono:

$$V_{mean1} = \frac{V_{max1} + V_{min1}}{2} \quad (5.1.5)$$

$$V_{mean2} = \frac{V_{max2} + V_{min2}}{2} \quad (5.1.6)$$

L'algoritmo dovrà quindi andare a definire il valore della frequenza, della tensione massima e della tensione minima della prima onda e la frequenza, la tensione massima e la tensione minima della seconda ora. Prima si è parlato di quattro diversi parametri per l'attuazione simmetrica, ma in realtà, dividendo l'ampiezza in

due diversi valori di tensione, i parametri risultano essere sei. Stesso discorso vale per l'attuazione asimmetrica, dove i parametri risultano essere diciotto. I valori di frequenza sono compresi tra  $[0, 50]$  Hz e quelli di tensione tra  $[5.5, 9.5]$  V.

La funzione che si vuole minimizzare è definita da  $f = Cd - Cd_0$ , come si è descritto nel capitolo 4.

Per il segnale continuo non sono presenti vincoli, se non i range dove l'algoritmo deve cercare la tensione. Per il segnale pulsato invece, vengono imposti dei vincoli:

- $\sum V_{max} < 9.5$  V
- $\sum V_{min} > 5.5$  V
- $V_{max}$  prima onda  $>$   $V_{min}$  prima onda
- $V_{max}$  seconda onda  $>$   $V_{min}$  seconda onda

In letteratura si trova riscontro di come le alte velocità di attuazione risultano essere le più efficienti al fine di ridurre la resistenza aerodinamica. Questi risultati si trovano sia in [Cerutti et al.](#) che in [Barros et al.](#). Sempre [Cerutti et al.](#) hanno dimostrato che l'attuazione dei getti laterali ed inferiore, combinati tra loro, permette di ottenere una riduzione della resistenza aerodinamica due volte maggiori rispetto ai getti indipendenti, grazie all'elevata tridimensionalità della scia.

Per verificare il corretto funzionamento dell'algoritmo si può considerare di attuare indipendentemente i tre sistemi di attuazione e di trovare quindi tre parametri, cioè frequenza, ampiezza e duty cycle, per ognuno dei tre getti e se i risultati ottenuti si portano alle condizioni simili a quelle trovate in letteratura, si può affermare che l'algoritmo funziona in modo corretto. Tuttavia questa analisi non viene eseguita in questo lavoro.

Le prove sono state eseguite a una sola condizione della corrente a monte, cioè quella pari a  $Re_\infty \sim 0.9 \cdot 10^5$ . Variando tale velocità si potrebbe capire se l'algoritmo è in grado di raggiungere una condizione di riduzione della resistenza aerodinamica maggiore.

### 5.1.1 Check della cella di carico

Sempre nel capitolo 3 si è parlato della cella di carico, che misura il valore della resistenza aerodinamica a partire da un segnale elettrico convertito mediante una mappa di calibrazione. Questa però presenta numerosi problemi. Non a caso infatti, essendo un trasduttore elettrico basato su estensimetri, il segnale misurato e di conseguenza il valore di resistenza, è alterato nel corso della prova.

Le prove eseguite preliminarmente dimostrano come con il trascorrere del tempo, il valore di resistenza in condizione di forcing e unforcing varia significativamente.

Sono state eseguite due prove diverse, una a galleria spenta e l'altra a galleria accesa in cui la velocità del vento indisturbata è a  $Re_\infty \sim 0.9 \cdot 10^5$ , per valutare il comportamento della cella di carico al variare del tempo.

Nella condizione di unforcing si è valutato il valore del  $Cd_0$ , mentre nella condizione di forcing si è valutato il valore del  $Cd$ . Per la condizione di forcing, i parametri per il segnale sinusoidale sono descritti in tabella .

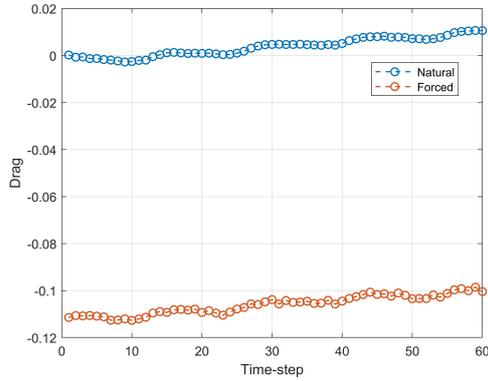
Up					
$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$E_{max1}$ [V]	$E_{min1}$ [V]	$E_{max2}$ [V]	$E_{min2}$ [V]
40	0	9	5.5	0	0
Bottom					
$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$E_{max1}$ [V]	$E_{min1}$ [V]	$E_{max2}$ [V]	$E_{min2}$ [V]
40	0	9	5.5	0	0
Lateral					
$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$E_{max1}$ [V]	$E_{min1}$ [V]	$E_{max2}$ [V]	$E_{min2}$ [V]
40	0	9	5.5	0	0

Tabella 5.1: Check della cella di carico - Segnale sinusoidale del getto in condizioni di forcing

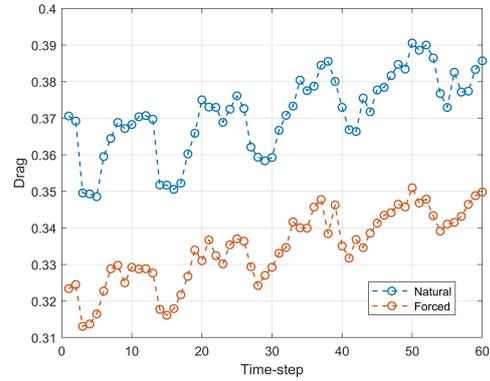
In figura 5.1a e 5.1b vengono riportati gli andamenti del valore di resistenza misurato dalla cella di carico al variare del tempo.

Le prove sono state eseguite per un tempo totale di 2h seguendo un criterio ben preciso: nel primo minuto la cella di carico ha valutato la condizione di unforcing e nel secondo minuto la condizione di forcing, per un totale quindi di 60 diverse misurazioni.

Come si nota, al variare dei time-step, il valore di drag misurato, che dovrebbe quindi essere sempre lo stesso dato che le condizioni non variano, subiscono delle alterazioni e si possono facilmente notare dei salti al variare dei time step. Come si nota però, le condizioni naturale e forzata vengono modificate circa simultaneamente.



(a) Drag vs Time-step a galleria spenta



(b) % Drag vs Time-step a  $Re_\infty \sim 0.9 \cdot 10^5$

Figura 5.1: Comportamento della cella di carico

Nella figura 5.2 si nota infatti che a  $Re_\infty \sim 0.9 \cdot 10^5$ , il valore di  $-(Cd - Cd_0)$  oscilla tra un valore massimo di 0.0472 a un valore minimo di 0.0296, quindi può essere considerato  $\sim$  costante. Tutte le prove sono state eseguite senza tenere conto degli effetti mutevoli della cella di carico.

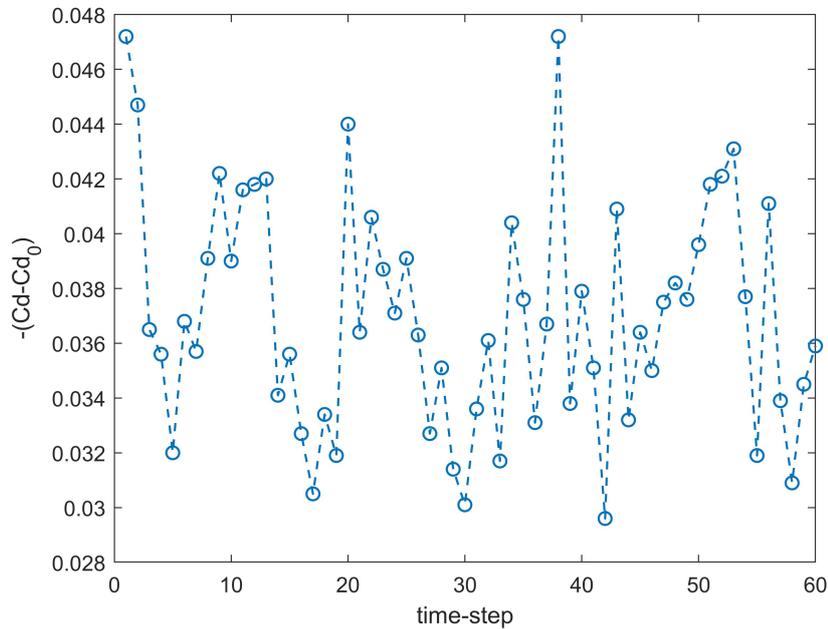


Figura 5.2: Comportamento della cella di carico:  $-(Cd - Cd_0)$  vs time step a  $Re_\infty \sim 0.9 \cdot 10^5$

## 5.2 Segnale continuo

### 5.2.1 Caso 1: segnale continuo - attuazione simmetrica

Il primo caso che si considera riguarda un segnale continuo con una attuazione simmetrica.

Per ogni generazione si è usato un numero di popolazione pari a venti per un totale di venti generazioni, corrispondenti ad un tempo fisico di circa 6 h e 40 minuti.

In figura 5.3a si mettono in evidenza i diversi di valore di tensione per ogni generazione.

La figura 5.3b rappresenta la stessa immagine, mostrando però un andamento generale della banda di tensione scelta dall'algoritmo per tutte le generazioni. Le figure che incontreremo nei casi successivi saranno tutte di questo tipo.

Come si nota dalle due identiche figure quindi, l'algoritmo sceglie 20 diversi punti nel range di tensione considerato, cioè [5.5, 9.5] V e a questi valori associa un valore di fitness in base alla funzione da minimizzare e prosegue quindi usando crossover, mutazione e elitismo per le generazioni successive, portandosi quindi a un valore di convergenza. Il concetto di mutazione si può notare particolarmente nella nona e nella diciottesima generazione; l'algoritmo ha selezionato due punti di tensione che si allontanano particolarmente dalla convergenza, e ciò dimostra quindi che la strada presa sia comunque quella più giusta al fine dello scopo della prova.

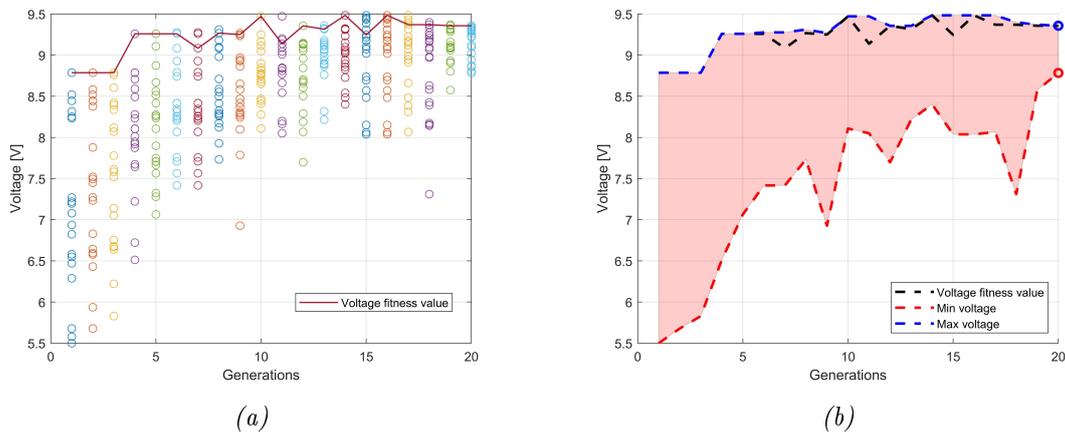


Figura 5.3: Voltage vs Generations per segnale continuo - attuazione simmetrica

In figura 5.4 viene riportato l'andamento della riduzione percentuale di resistenza al variare delle generazioni. Le curve rappresentano i valori di riduzione massima, media e minima all'interno della generazione.

Dalla curva si evidenzia come la riduzione percentuale tende ad aumentare all'aumentare delle generazioni, evidenziando quindi come l'algoritmo abbia selezionato, al trascorrere delle generazioni, il giusto segnale che porta caratteristiche vantaggiose al fine della minimizzazione della funzione obiettivo.

L'algoritmo permette di arrivare ad una riduzione percentuale media di resistenza di  $\sim 8\%$  con valori massimi che arrivano a  $\sim 10\%$ . Questi valori sono quelli che ci si aspetterebbe di trovare, considerando che si sta analizzando il caso di attuazione simmetrica.

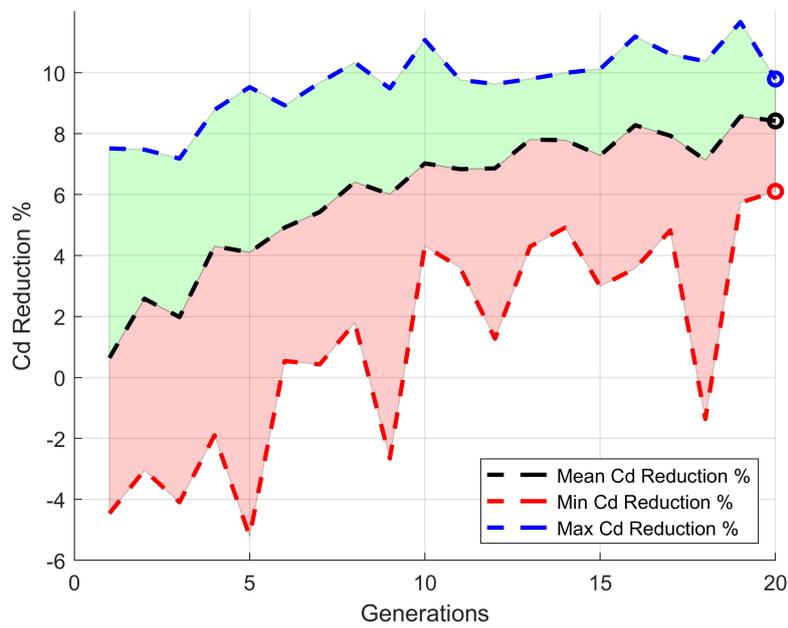
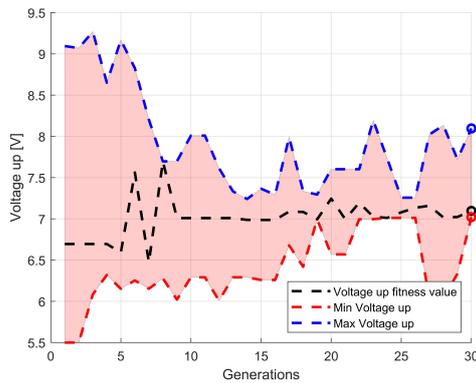


Figura 5.4: % Cd reduction vs Generations per segnale continuo - attuazione simmetrica

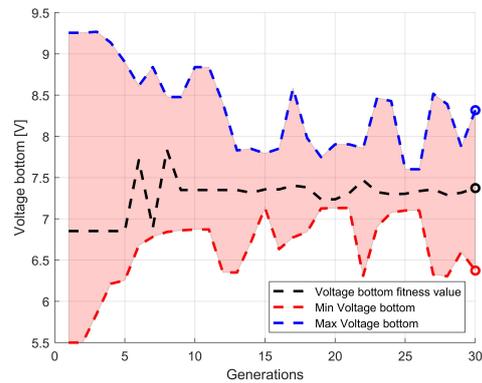
### 5.2.2 Caso 2: segnale continuo - attuazione asimmetrica

Il secondo caso che si considera riguarda un segnale continuo con una attuazione asimmetrica. Per ogni generazione si è usato un numero di popolazione pari a venti per un totale di trenta generazioni, corrispondenti ad un tempo fisico di circa 10h.

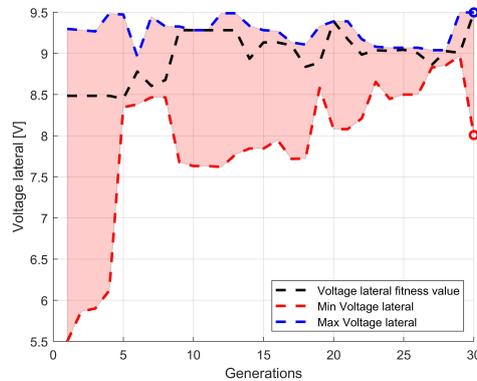
Nelle figure 5.5a e 5.5b e 5.5c vengono riportati gli andamenti della variazione della tensione di attuazione per il getto up, bottom e lateral. Dalle figure si mette in evidenza come l'algoritmo sceglie i valori che ritiene più idoneo in base al fitness value.



(a) Variazione della tensione di attuazione del up jet nelle diverse generazioni



(b) Variazione della tensione di attuazione del bottom jet nelle diverse generazioni



(c) Variazione della tensione di attuazione del lateral jet nelle diverse generazioni

Figura 5.5: Voltage vs Generations per segnale continuo - attuazione asimmetrica

In figura 5.6 viene riportato l'andamento della riduzione percentuale di resistenza al variare delle generazioni. Le curve rappresentano i valori di riduzione massima, media e minima all'interno della generazione.

Dalla curva si evidenzia come la riduzione percentuale media tende ad aumentare all'aumentare delle generazioni, anche se nella curva che rappresenta la riduzione

massima si nota come un valore alto, pari al  $\sim 10\%$  di riduzione, sia stata trovata già nella prima generazione.

L'algoritmo permette di arrivare ad una riduzione media percentuale della resistenza di  $\sim 10\%$  con valori massimi che arrivano a  $\sim 15\%$ .

Come si nota si è ottenuta una riduzione percentuale di resistenza maggiore rispetto al caso simmetrico. I tre getti, lavorando simultaneamente, con una loro diversa tensione, permettono di avere dei vantaggi in termini di riduzione di drag, perchè l'algoritmo trova e sceglie la giusta combinazione di valori più opportuni per la minimizzazione della funzione obiettivo.

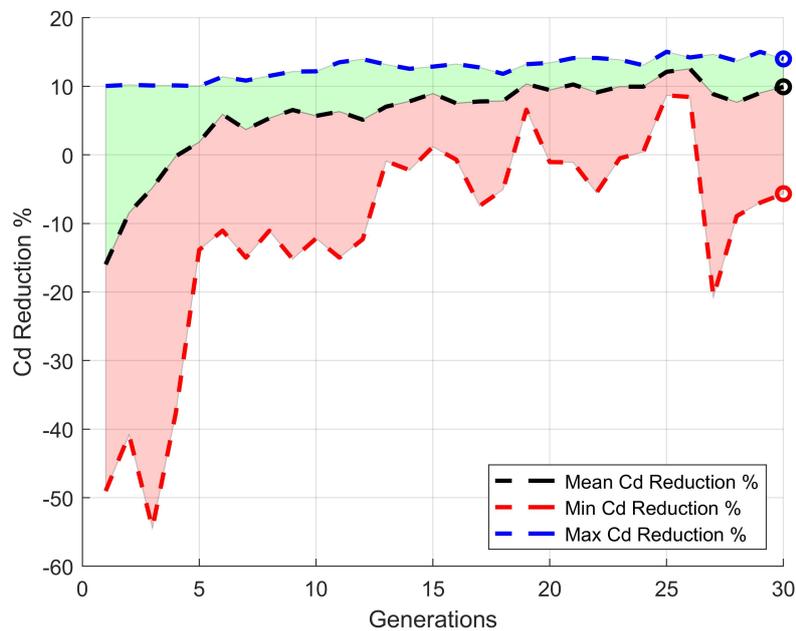


Figura 5.6: % Cd reduction vs Generations per segnale continuo - attuazione asimmetrica

## 5.3 Segnale pulsato

In questa sezione si analizza solo il segnale pulsato simmetrico, in cui quindi l'up, bottom e lateral jet avranno lo stesso segnale di attuazione. Come si evincerà, il calcolo richiede un tempo fisico oneroso, che aumenta considerevolmente con il getto asimmetrico. Tuttavia, questa analisi rappresenta un suo possibile sviluppo futuro.

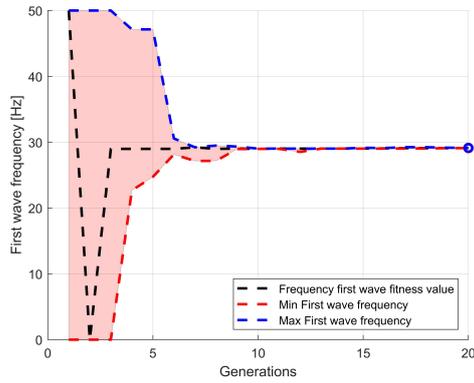
### 5.3.1 Caso 1 - Popolazione: 5 individui

Nel primo caso di attuazione simmetrica, con segnale pulsato, si fa riferimento a 5 individui per popolazione.

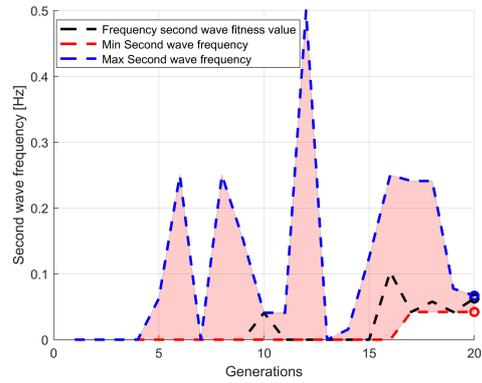
Sono bastate solo 20 generazioni perchè la prova non produceva risultati accettabili, come si evincerà in seguito. Il tempo fisico corrispondente alla prova è di circa 1 h e 40 *minuti*.

Quello che il codice effettua è una scelta di tutti i sei parametri di attuazione, in base alla minimizzazione della funzione obiettivo.

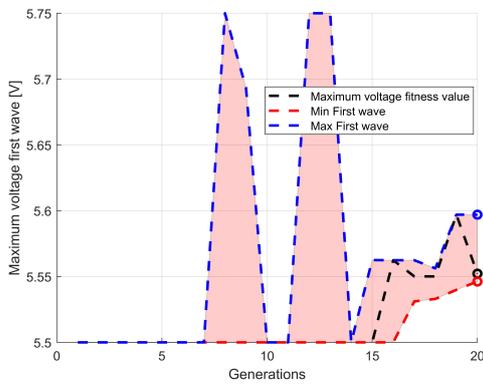
Come si nota dalle figure però, 5 popolazioni sono un numero troppo basso per ogni generazione, perchè l'algoritmo nella fase iniziale, sceglie pochi valori e su questo effettua poi i processi naturali identificati prima, quindi di conseguenza la scelta si basa su un numero di punti troppo basso. Infatti se dalla figura 5.7a notiamo che nelle prime generazioni abbiamo un ampio range che va nei limiti stabili di  $[0, 50]Hz$  per poi raggiungere un valore di convergenza di  $f_1 = 29Hz$  nelle sesta generazione, della figura 5.7b notiamo che il valore della frequenza varia in range molto più basso, cioè tra  $[0, 0.5]Hz$ , non avendo quindi possibilità di scegliere la più giusta condizione di attuazione per la seconda onda. Da notare che nel campo delle tensioni, i risultati sono esattamente gli stessi: caso emblematico è quello delle tensioni minime di figura 5.7e e 5.7f in cui il valore è rispettivamente fisso a 5.5 V o circa a 0 V, con piccoli picchi diversi, simbolo che la mutazione sta agendo.



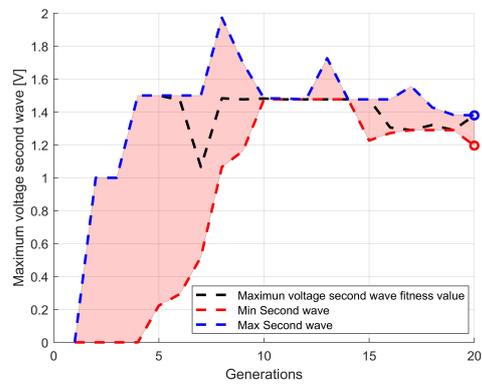
(a) Variazione della frequenza della prima onda nelle diverse generazioni



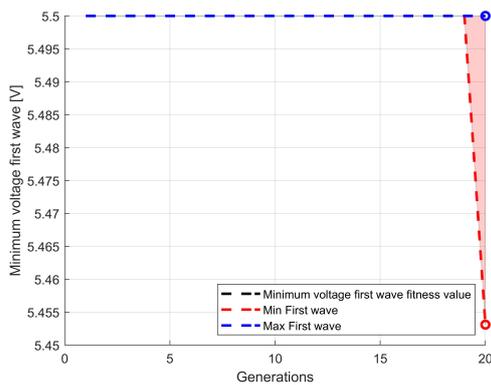
(b) Variazione della frequenza della seconda onda nelle diverse generazioni



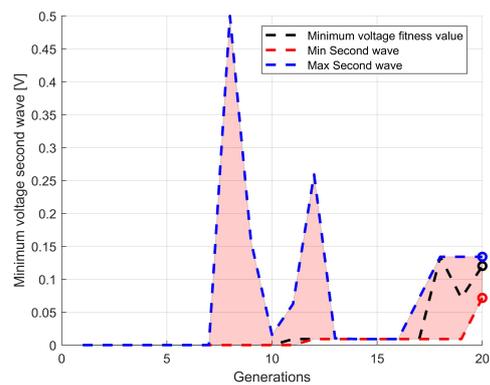
(c) Variazione della tensione massima della prima onda nelle diverse generazioni



(d) Variazione della tensione massima della seconda onda nelle diverse generazioni



(e) Variazione della tensione minima della prima onda nelle diverse generazioni



(f) Variazione della tensione minima della seconda onda nelle diverse generazioni

Figura 5.7: Variables vs Generations per segnale pulsato - Popolazione: 5 individui

In figura 5.8 viene riportato l'andamento della riduzione percentuale media di resistenza al variare delle generazioni. Le curve rappresentano i valori di riduzione massima, media e minima all'interno della generazione.

Dalla curva si evidenzia come la riduzione percentuale tende a non variare particolarmente all'aumentare delle generazioni, ma a mantenersi circa costante in un intorno di  $\sim 1\%$ .

E' evidente quindi che un numero così basso di popolazioni non rappresenta un grande vantaggio.

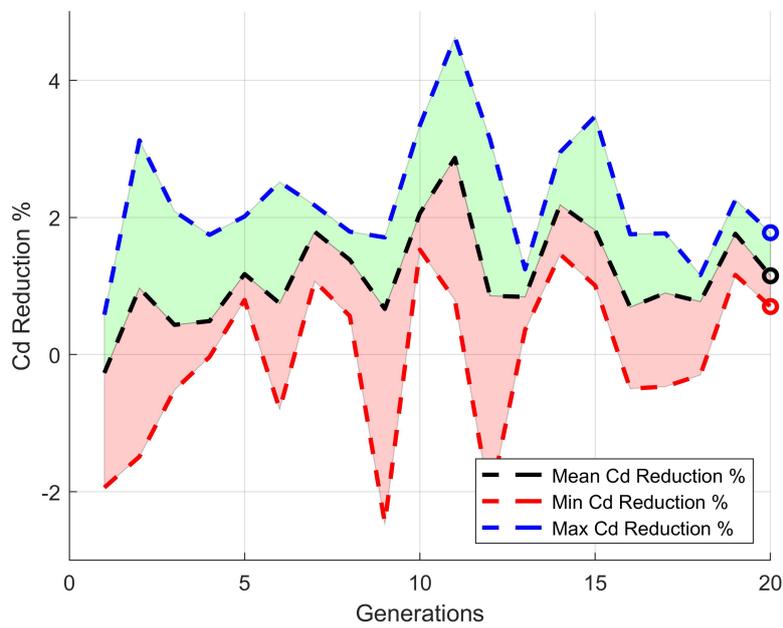


Figura 5.8: % Cd reduction vs Generations per segnale pulsato - Popolazione: 5 individui

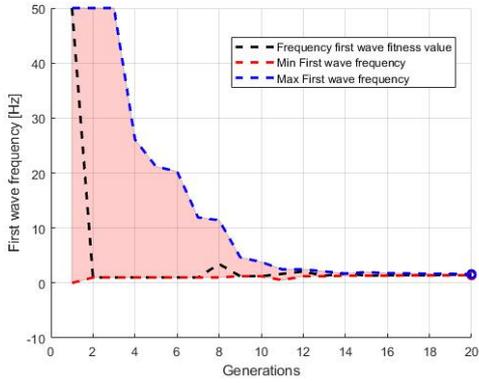
### 5.3.2 Caso 2 - Popolazione: 10 individui

Nel secondo caso di attuazione simmetrica, con segnale pulsato, si fa riferimento a 10 individui per popolazione.

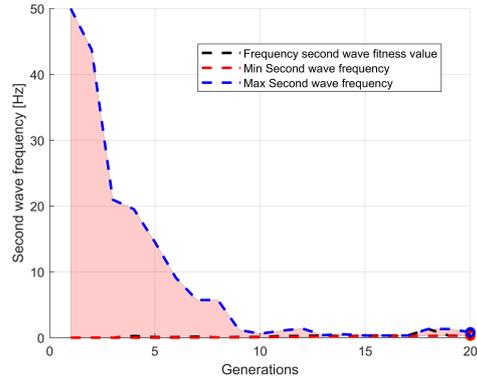
Le generazioni totali sono anche in questo caso 20, perchè, come si evincerà, i parametri di attuazione raggiungono presto un valore di convergenza. Il tempo fisico corrispondente alla prova è di circa 3 h e 20 *minuti*.

Quello che il codice effettua è una scelta di tutti i sei parametri di attuazione, in base alla minimizzazione della funzione obiettivo.

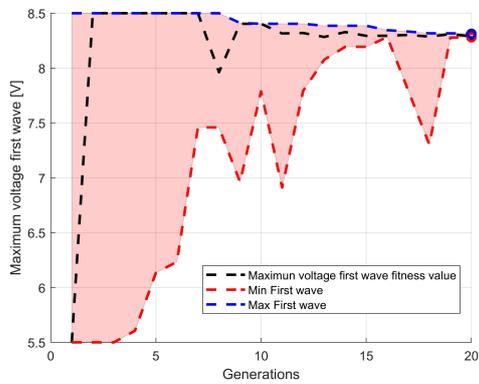
Come si nota dalle figure però, si evince già una differenza sostanziale tra questo caso e quello precedente: l'algoritmo, dovendo basarsi su un numero di popolazioni iniziali maggiore, cioè dieci, riesce a spaziare in un range più ampio e quindi avere una possibilità maggiore di trovare valori che minimizzano la funzione obiettivo. Dalle figure 5.9a e 5.9b notiamo che già nella decima generazione raggiungiamo un valore di convergenza per la frequenza, mentre per i valori di tensione, nonostante la convergenza è comunque raggiunta, l'algoritmo tende ancora a spaziare: a titolo di esempi, nella figura 5.9c, il valore di convergenza è circa pari a 8.4 V, ma nella undicesima generazione l'algoritmo sceglie anche 6.9 V o nella diciottesima generazione 7.4 V, valori quindi che si discostano dalla convergenza, ma che gli sono utili per altre possibili combinazioni dei parametri.



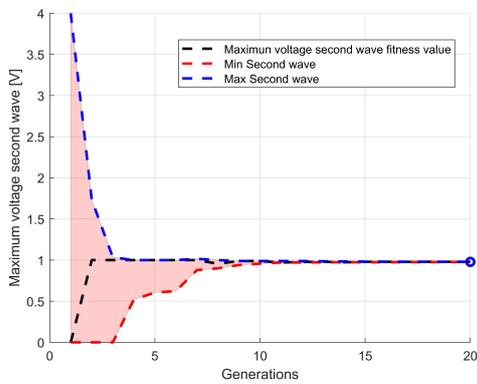
(a) Variazione della frequenza della prima onda nelle diverse generazioni



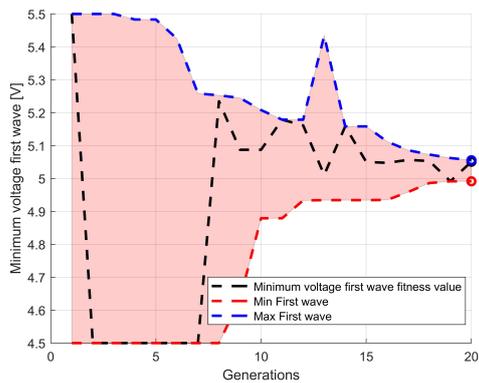
(b) Variazione della frequenza della seconda onda nelle diverse generazioni



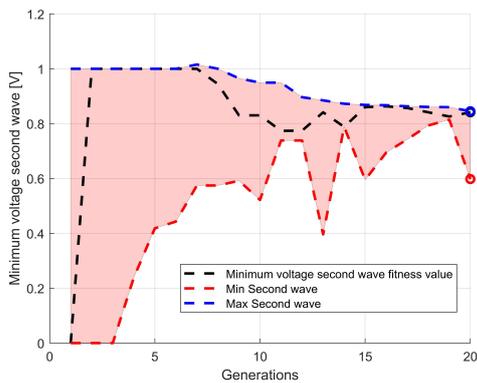
(c) Variazione della tensione massima della prima onda nelle diverse generazioni



(d) Variazione della tensione massima della seconda onda nelle diverse generazioni



(e) Variazione della tensione minima della prima onda nelle diverse generazioni



(f) Variazione della tensione minima della seconda onda nelle diverse generazioni

Figura 5.9: Variables vs Generations per segnale pulsato - Popolazione: 10 individui

In figura 5.10 viene riportato l'andamento della riduzione percentuale di resistenza al variare delle generazioni. Le curve rappresentano i valori di riduzione massima, media e minima all'interno della generazione.

Dalla curva si evidenzia come la riduzione percentuale tende ad aumentare all'aumentare delle generazioni, anche se, come i parametri di attuazione, dopo la decima generazione il valore medio raggiunge una convergenza pari a  $\sim 5\%$ .

Per ottenere risultati migliore è evidente quindi che il numero di popolazioni è ancora basso.

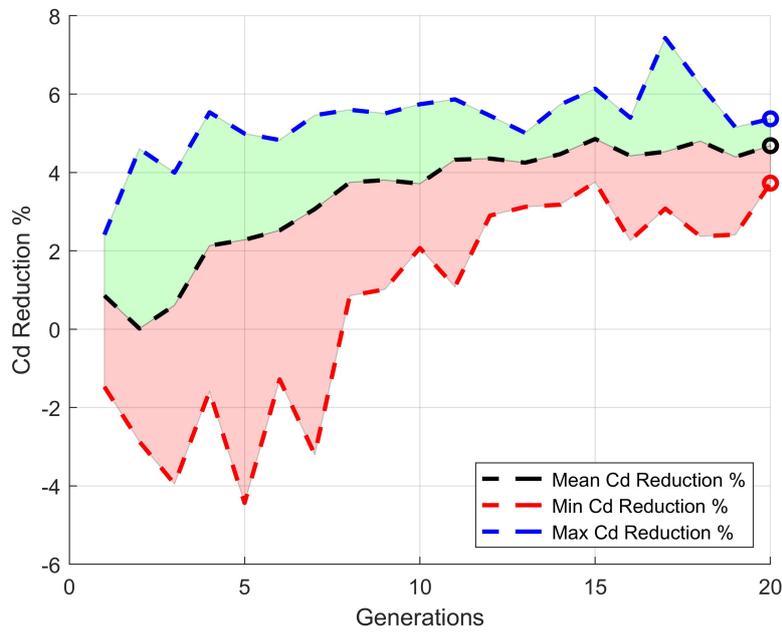


Figura 5.10: % Cd reduction vs Generations per segnale pulsato - Popolazione: 10 individui

### 5.3.3 Caso 3 - Popolazione: 20 individui

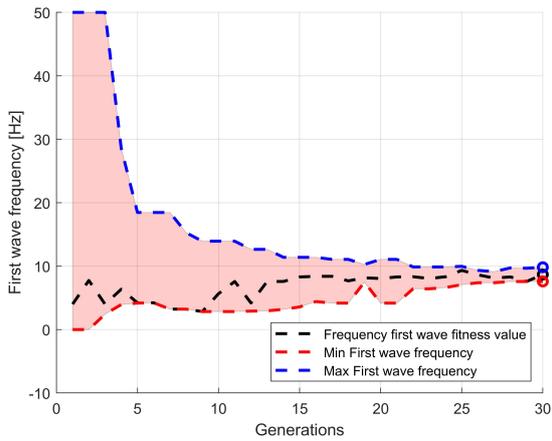
Per questo caso di attuazione simmetrica, con segnale pulsato, si fa riferimento a 20 individui per popolazione.

Si è reso necessario effettuare due diverse prove utilizzando sempre lo stesso numero di popolazione, per dimostrare come l'algoritmo spazia e sceglie i più giusti parametri. Nel seguito verrà chiarito il concetto.

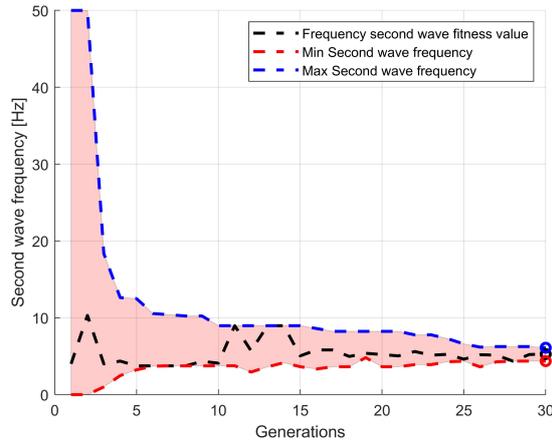
Le generazioni totali sono state 30 per la prima e 40 per la seconda prova con un tempo fisico corrispondente rispettivamente a 10 *h* per la prima e 13*h* e 20 *minuti* per la seconda. Si nota quindi come, all'aumentare della popolazione per ogni generazione e all'aumentare delle generazioni, le prove richiedono un tempo maggiore.

Come già precedentemente affermato, l'algoritmo ha una possibilità ancora maggiore di scelta di parametri di attuazione, nella prima generazione e così via nelle altre.

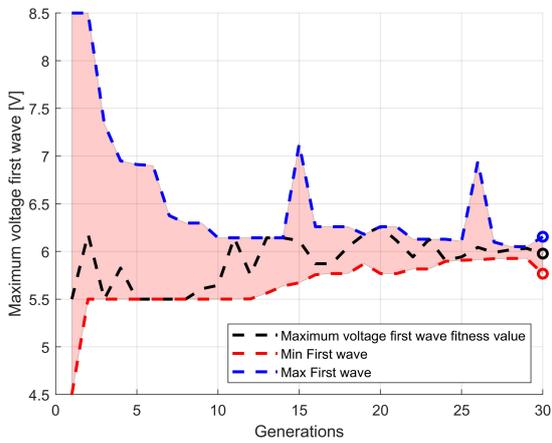
Nella prima prova ciò che emerge è che i valori di attuazione della prima onda rimangono circa costanti già dalle prime generazioni, come si nota nella figure 5.11a, 5.11c e 5.11e, mentre nella seconda onda il valore di frequenza è circa costante, come si evince dalla figura 5.11b, mentre il valore della tensione massima e minima tende a cambiare: dalla figura 5.11d notiamo come il valore di tensione massima passa da un valore di  $\sim 4$  V a un valore di  $\sim 3$  V dopo dodici generazioni, mentre dalla figura 5.11f notiamo come il valore di tensione minimo passa da un valore di 1 V a un valore di 2.5 V dopo undici generazioni. Questo dipende fortemente da come l'algoritmo sceglie i parametri più giusti per la funzione obiettivo, in questo caso modificando i parametri di attuazione della seconda onda.



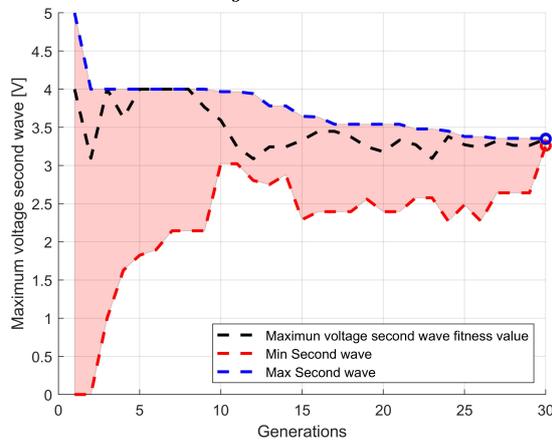
(a) Variazione della frequenza della prima onda nelle diverse generazioni



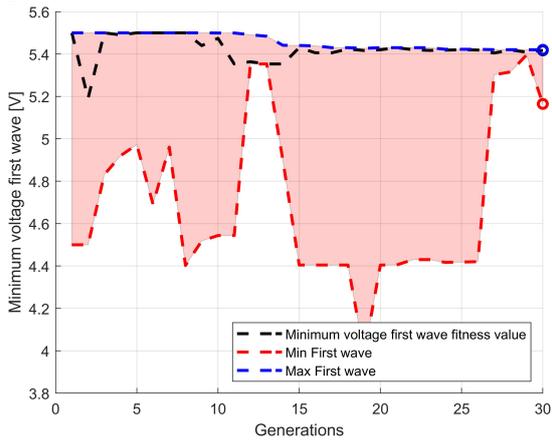
(b) Variazione della frequenza della seconda onda nelle diverse generazioni



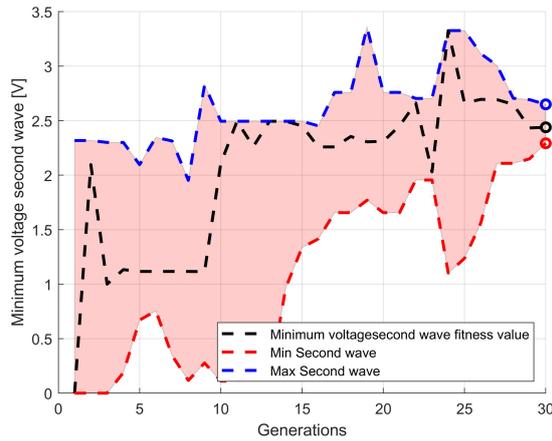
(c) Variazione della tensione massima della prima onda nelle diverse generazioni



(d) Variazione della tensione massima della seconda onda nelle diverse generazioni



(e) Variazione della tensione minima della prima onda nelle diverse generazioni



(f) Variazione della tensione minima della seconda onda nelle diverse generazioni

Figura 5.11: Variables vs Generations per segnale pulsato - Popolazione: 20 individui - Prova 1

In figura 5.12 viene riportato l'andamento della riduzione percentuale di resistenza al variare delle generazioni per la prima prova. Le curve rappresentano i valori di riduzione massima, media e minima all'interno delle generazioni raggiungendo un valore medio pari a  $\sim 5\%$ .

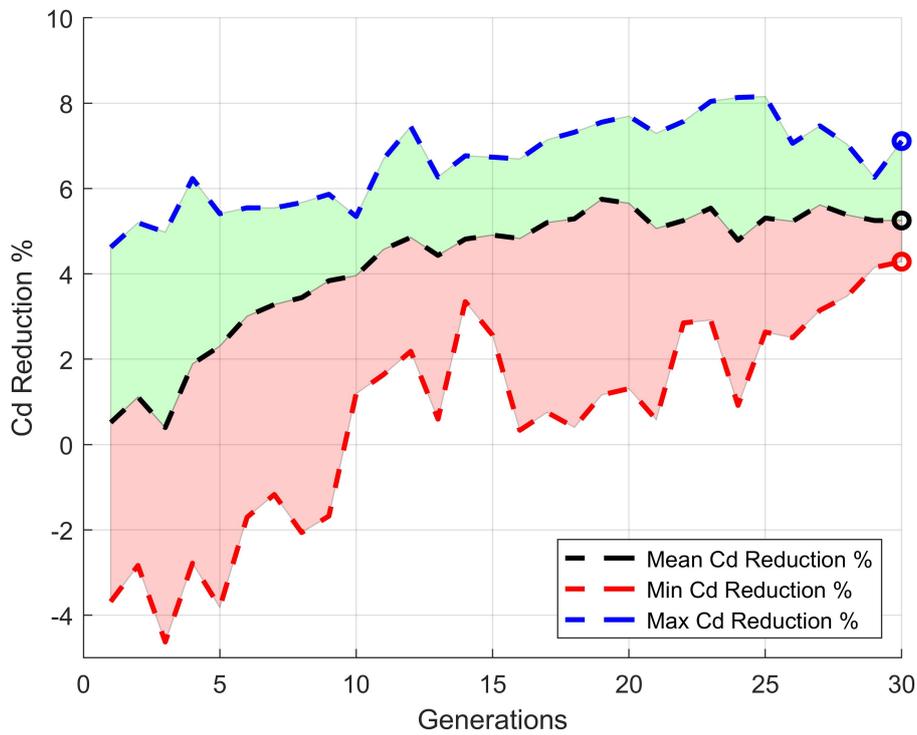
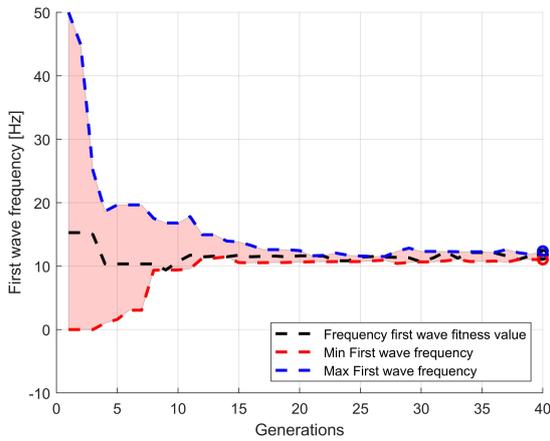
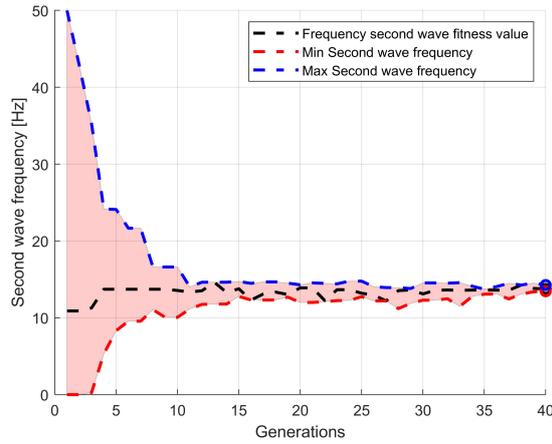


Figura 5.12: % Cd reduction vs Generations per segnale pulsato - Popolazione: 20 individui - Prova 1

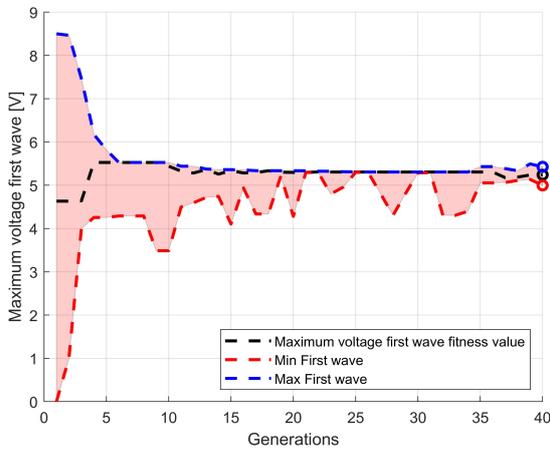
Nella seconda prova, i valori di attuazione restano lineari sia nella prima che nella seconda onda, come si evince dalle figure.



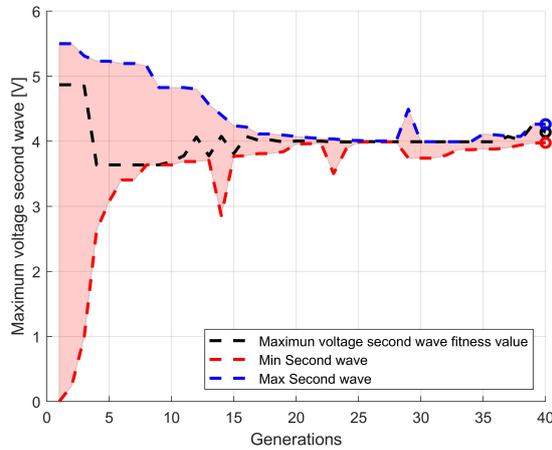
(a) Variazione della frequenza della prima onda nelle diverse generazioni



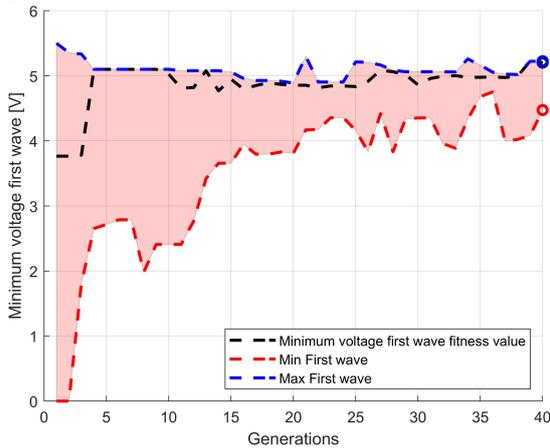
(b) Variazione della frequenza della seconda onda nelle diverse generazioni



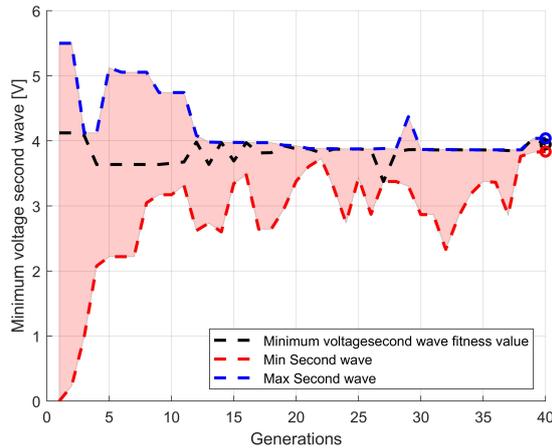
(c) Variazione della tensione massima della prima onda nelle diverse generazioni



(d) Variazione della tensione massima della seconda onda nelle diverse generazioni



(e) Variazione della tensione minima della prima onda nelle diverse generazioni



(f) Variazione della tensione minima della seconda onda nelle diverse generazioni

Figura 5.13: Variables vs Generations per segnale pulsato - Popolazione: 20 individui - Prova 2

In figura 5.14 viene riportato l'andamento della riduzione percentuale di resistenza al variare delle generazioni per la seconda prova. Le curve rappresentano i valori di riduzione massima, media e minima all'interno delle generazioni raggiungendo un valore medio pari a  $\sim 7\%$ .

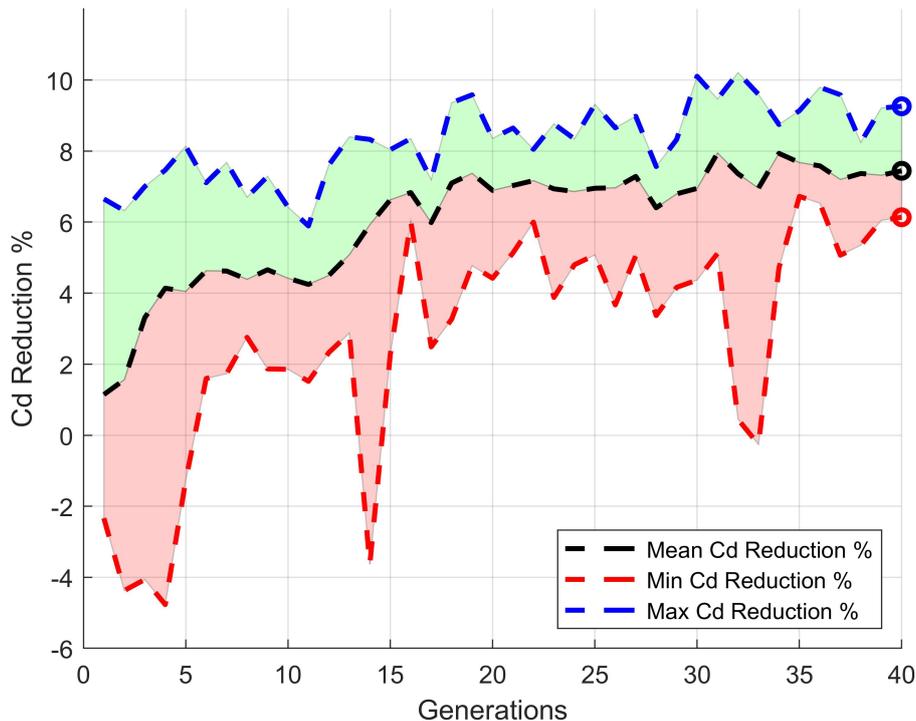


Figura 5.14: % Cd reduction vs Generations - Popolazione: 20 individui - Prova 2

Confrontando le due diverse prove si evince che i valori ottenuti, nonostante il numero delle popolazioni sia lo stesso, sono completamente diversi, sia in termini di parametri di attuazione che in termini di riduzione percentuale.

Questo è dovuto a diversi aspetti: le condizioni di prova sono diverse perchè svolte in tempi diversi, la cella di carico influenza la prova ma soprattutto la popolazione iniziale scelta dall'algoritmo è del tutto casuale, quindi non è detto che in momenti diversi la scelta ricada sugli stessi valori che compongono la popolazione; di conseguenza i processi naturali vengono svolti su valori di parametri di attuazione diversi.

Nelle tabelle 5.2 e 5.3 troviamo i parametri di attuazione dell'ultima generazione che rendono massima la riduzione percentuale rispettivamente nella prima e nella seconda prova.

$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$E_{max1}$ [V]	$E_{min1}$ [V]	$E_{max2}$ [V]	$E_{min2}$ [V]
9.3303	4.6101	5.9429	3.2724	5.4205	2.6619

Tabella 5.2: Parametri di attuazione dei getti per segnale pulsato - Popolazione: 20 individui - Prova 1

$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$E_{max1}$ [V]	$E_{min1}$ [V]	$E_{max2}$ [V]	$E_{min2}$ [V]
12.262	13.62	5.3049	3.9925	4.9938	3.8604

Tabella 5.3: Parametri di attuazione dei getti per segnale pulsato - Popolazione: 20 individui - Prova 2

Come si nota, i valori sono completamente diversi e portano quindi a una riduzione di resistenza aerodinamica diversa, infatti per la prima prova abbiamo una riduzione massima percentuale pari a 7.1% e per la seconda prova abbiamo una riduzione massima percentuale di 9.2%.

Per chiarire un ulteriore aspetto in merito a queste due prove, c'è bisogno di effettuare una precisazione.

Nel paragrafo 1 si è introdotto il concetto di bilancio energetico. In effetti, quando si utilizzano getti per il controllo della scia, va tenuta in considerazione non solo la riduzione di resistenza aerodinamica, ma bisogna anche garantire che questo avvenga in maniera efficiente, cioè che il vantaggio deve essere comunque maggiore di quanto effettivamente si spenda.

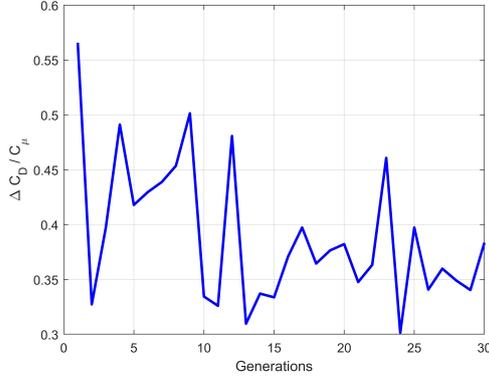
Un possibile approccio per il bilancio energetico è quello suggerito da Englar che ha analizzato la sensitività del controllo sulla scia attraverso il rapporto tra la variazione di resistenza e il coefficiente di quantità di moto del getto  $C_\mu$ :

$$\frac{\Delta C_D}{C_\mu} = \frac{D - D^C}{0.5 \sum_{i=1}^{N_{jets}} \rho A_i V_{i,j}^2} \quad (5.3.1)$$

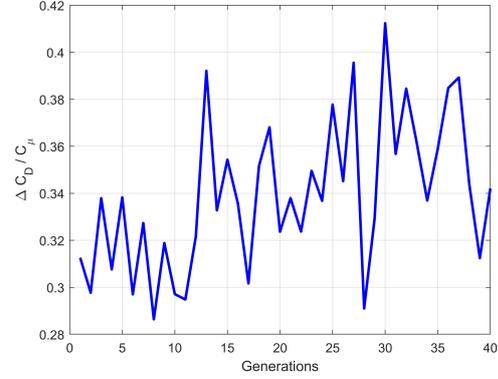
L'equazione può assumere sia valori positivi sia valori negativi; quando facciamo riferimento alla riduzione di resistenza allora dobbiamo aspettarci valori positivi e soprattutto valori di  $\frac{\Delta C_D}{C_\mu} > 1$  corrispondono a configurazioni molto efficienti dal punto di vista energetico.

Dalle figure 5.15a e 5.15b si evince come il valore di  $\frac{\Delta C_D}{C_\mu}$  sia particolarmente basso per entrambi le prove e non si ha un andamento crescente durante le generazioni. Questo si giustifica ricordando che la funzione obiettivo è stata fissata senza considerare il lato energetico, quindi senza considerare una condizione di efficienza. Un possibile sviluppo di questo lavoro di tesi potrebbe essere proprio quello di andare a capire come l'algoritmo segua una possibile diversa strada considerando

l'efficienza energetica.



(a) Budget energetico - Prova 1



(b) Budget energetico - Prova 2

Figura 5.15:  $\frac{\Delta C_D}{C_\mu}$  vs Generations - Popolazione: 20 individui

A fronte del bilancio energetico appena introdotto, si è osservato un risultato interessante per quanto riguarda la seconda prova.

Come è stato già detto, il segnale sinusoidale è del tipo:

$$y = (\Delta V_1 \cdot \sin(2\pi f_1 t) + V_{mean1}) + (\Delta V_2 \cdot \sin(2\pi f_2 t) + V_{mean2}) \quad (5.3.2)$$

in cui le ampiezze sono:

$$\Delta V_1 = \frac{V_{max1} - V_{min1}}{2} \quad (5.3.3)$$

$$\Delta V_2 = \frac{V_{max2} - V_{min2}}{2} \quad (5.3.4)$$

mentre le parti costanti sono:

$$V_{mean1} = \frac{V_{max1} + V_{min1}}{2} \quad (5.3.5)$$

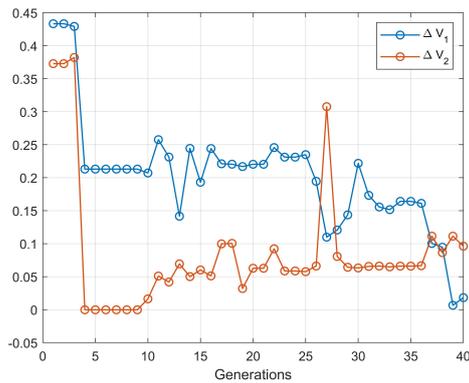
$$V_{mean2} = \frac{V_{max2} + V_{min2}}{2} \quad (5.3.6)$$

L'algoritmo è interessato solo alla funzione obiettivo, senza considerare ovviamente la spesa energetica. Avendo una riduzione in termini di resistenza aerodinamica maggiore usando un getto continuo rispetto a un getto alternato, l'algoritmo si porta in questa condizione, nonostante il segnale usato per la prova sia appunto uno sinusoidale. In questo caso, infatti i parametri di attuazione si portano nella condizione in cui  $\Delta V_1$  e  $\Delta V_2 \sim 0$ , quindi rendono indipendente entrambi le

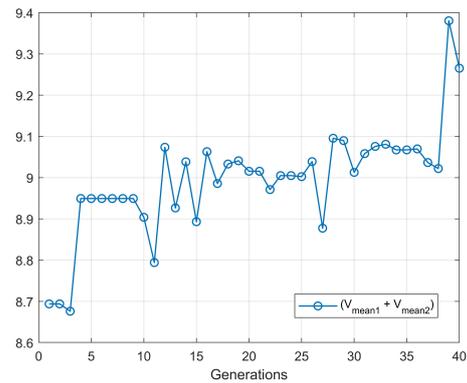
frequenze delle due onde, mentre tendono a massimizzare la somma tra  $V_{mean1}$  e  $V_{mean2}$ .

Nelle due figure 5.16a e 5.16b notiamo come sia  $\Delta V_1$  sia  $\Delta V_2$ , all'aumentare delle generazioni, tendono sempre più ad annullarsi, mentre al contrario la  $\sum(V_{mean1} + V_{mean2})$  tende sempre più ad aumentare.

Nella seconda prova infatti, la diminuzione percentuale di resistenza aerodinamica, è maggiore rispetto alla prima prova, dove questo risultato non era presente.



(a) andamento  $\Delta V_1$  e  $\Delta V_2$



(b) andamento  $\sum(V_{mean1} + V_{mean2})$

Figura 5.16: Andamento dell'onda sinusoidale - Popolazione: 20 individui - 2 prova

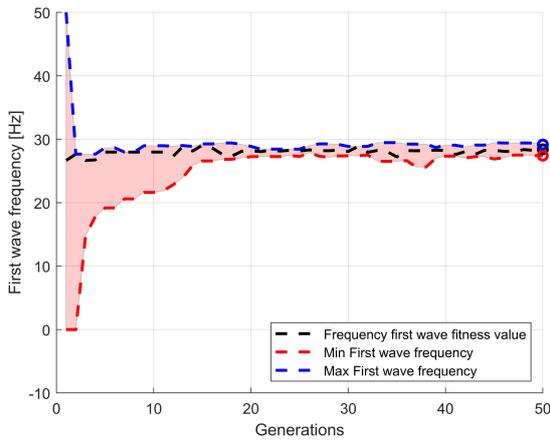
Questo risultato non è presente in tutte le prove, quindi questo dimostra come l'algoritmo non abbia una ben precisa direzione, ma segue e si adatta, generazione dopo generazione, avendo come fine ultimo la funzione obiettivo.

### 5.3.4 Caso 4 - Popolazione: 30 individui

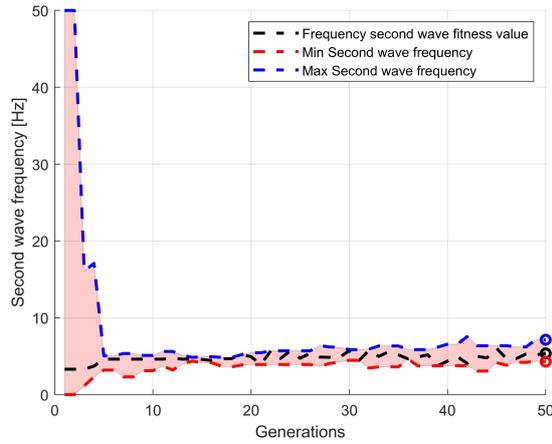
Nel quarto caso di attuazione simmetrica, con segnale pulsato, si fa riferimento a 30 individui per popolazione.

Le generazioni totali sono 50, perchè, come si evincerà, si è voluto osservare come evolve l'algoritmo all'aumentare delle generazioni. Il tempo fisico corrispondente alla prova è di circa 25 *h*.

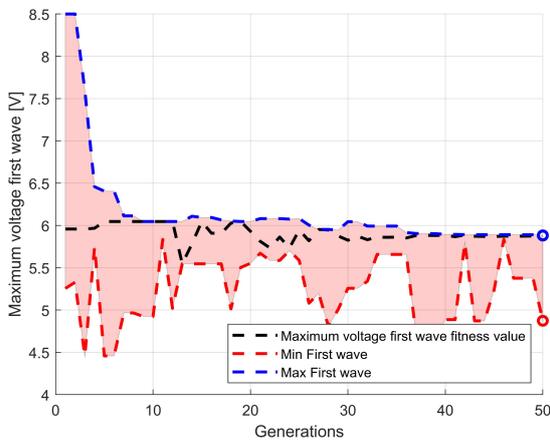
Quello che il codice effettua è una scelta di tutti i sei parametri di attuazione, in base alla minimizzazione della funzione obiettivo. Come si nota dalle figure però il valore dei parametri che hanno miglior fitness resta circa uguale al variare delle generazioni. La curva dei minimi invece, si discosta maggiormente; principalmente si nota nelle tensioni minime in figura 5.17e e 5.17f, perchè l'algoritmo effettuando i suoi processi naturali, quali per esempio mutazione, prova a trovare valori più utili al fine della funzione obiettivo, senza successo.



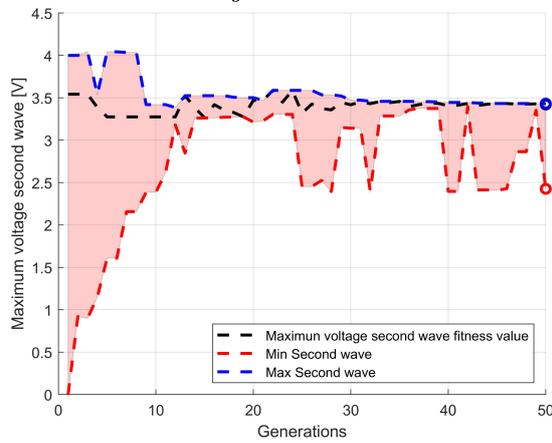
(a) Variazione della frequenza della prima onda nelle diverse generazioni



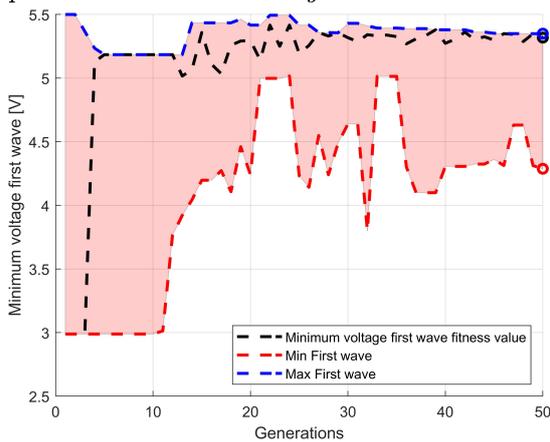
(b) Variazione della frequenza della seconda onda nelle diverse generazioni



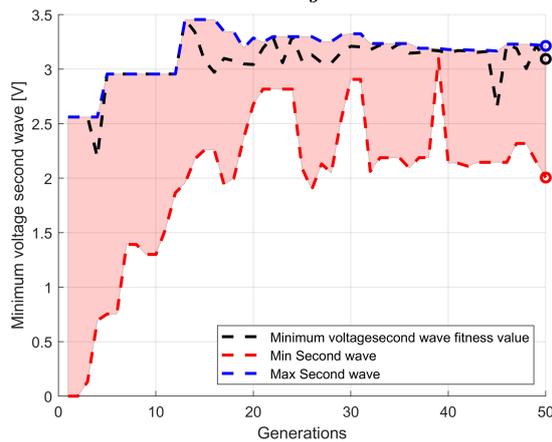
(c) Variazione della tensione massima della prima onda nelle diverse generazioni



(d) Variazione della tensione massima della seconda onda nelle diverse generazioni



(e) Variazione della tensione minima della prima onda nelle diverse generazioni



(f) Variazione della tensione minima della seconda onda nelle diverse generazioni

Figura 5.17: Variables vs Generations per segnale pulsato - Popolazione :30 individui

In figura 5.18 viene riportato l'andamento della riduzione percentuale di resistenza al variare delle generazioni. Le curve rappresentano i valori di riduzione massima, media e minima all'interno della generazione.

Dalla curva si evidenzia come la riduzione percentuale raggiunge un andamento medio circa costante, pari a  $\sim 6.5\%$  dopo 30 generazioni.

In questo caso risulta evidente come la curva della minima riduzione percentuale si discosta da quella media; questa curva dimostra infatti come i parametri trovati tramite processi naturali dall'algoritmo, come precedentemente affermato, siano del tutto inutili al fine della minimizzazione della funzione obiettivo.

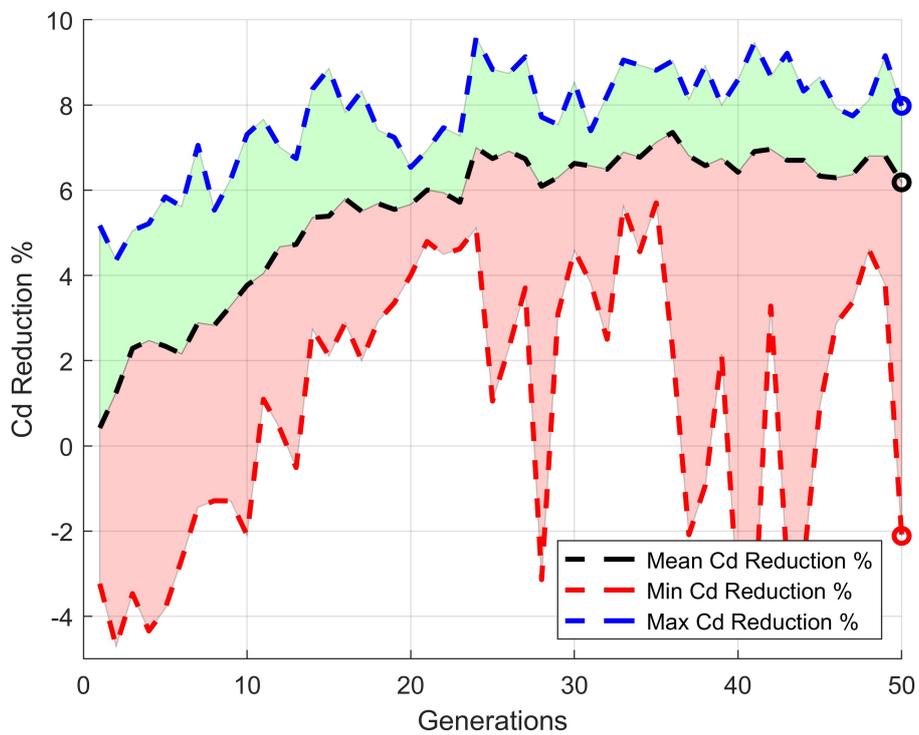


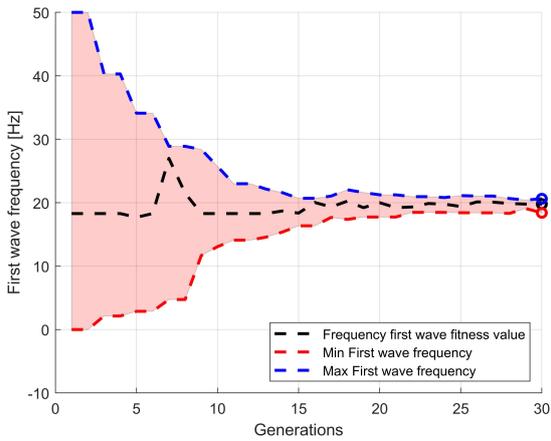
Figura 5.18: % Cd reduction vs Generations per segnale pulsato - Popolazione: 30 individui

### **5.3.5 Caso 5 - Popolazione: 50 individui**

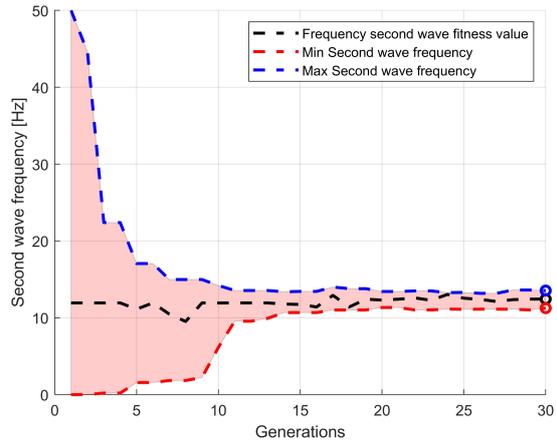
Nel quinto caso di attuazione simmetrica, con segnale pulsato, si fa riferimento a 50 individui per popolazione.

Le generazioni totali sono 30. Il tempo fisico corrispondente alla prova è di circa 25 *h*.

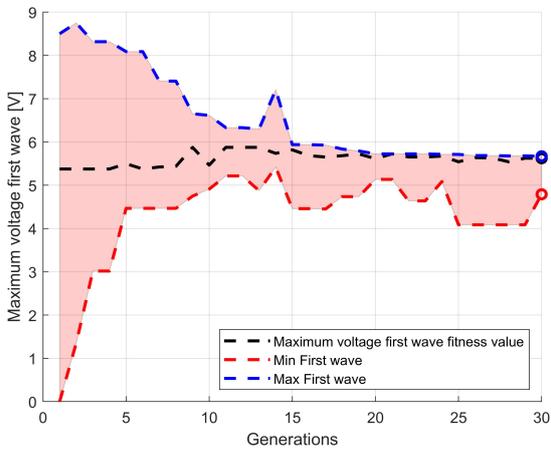
L'ultima prova è stata compiuta con 50 individui per popolazione, per osservare come l'algoritmo scelga i più giusti parametri di attuazione in base alla richiesta della funzione obiettivo, avendo a disposizione una più ampia gamma nella generazione iniziale.



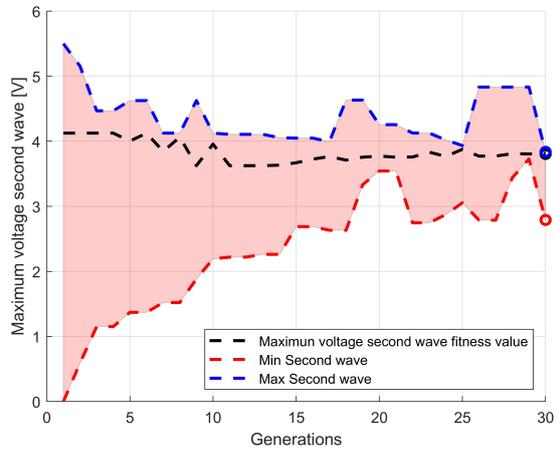
(a) Variazione della frequenza della prima onda nelle diverse generazioni



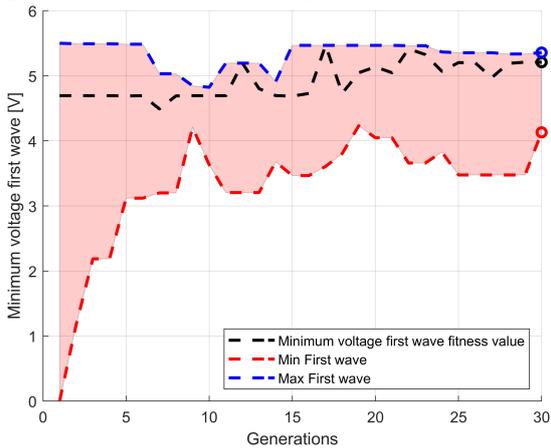
(b) Variazione della frequenza della seconda onda nelle diverse generazioni



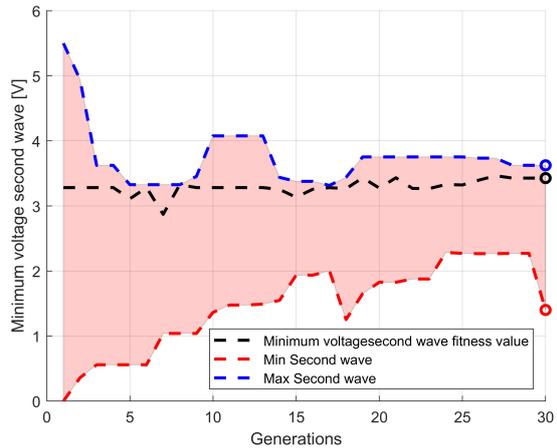
(c) Variazione della tensione massima della prima onda nelle diverse generazioni



(d) Variazione della tensione massima della seconda onda nelle diverse generazioni



(e) Variazione della tensione minima della prima onda nelle diverse generazioni



(f) Variazione della tensione minima della seconda onda nelle diverse generazioni

Figura 5.19: Variables vs Generations per segnale pulsato - Popolazione: 50 individui

In figura 5.20 viene riportato l'andamento della riduzione percentuale di resistenza al variare delle generazioni. Le curve rappresentano i valori di riduzione massima, media e minima all'interno della generazione.

Dalla curva si evidenzia come la riduzione percentuale aumenti all'aumentare delle generazioni raggiungendo un valore medio pari a  $\sim 7\%$  dopo 30 generazioni.

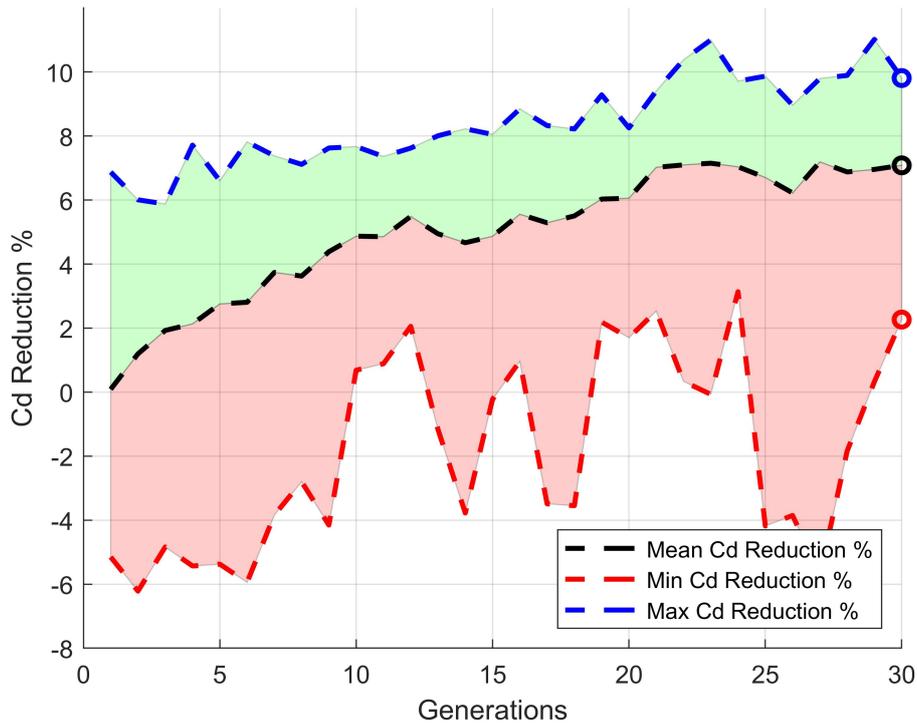


Figura 5.20: % Cd reduction vs Generations per segnale pulsato - Popolazione: 50 individui

Andando a valutare come si comporta l'algoritmo, considerando il tipo di segnale usato, possiamo effettuare le stesse considerazioni viste precedentemente per la prova con 20 individui per generazione.

All'aumentare delle generazioni, si è osservato che i parametri di attuazione con valori di fitness ottimali, non variavano considerevolmente, ma sono circa sempre costanti e pari al valore riportato in tabella 5.4 .

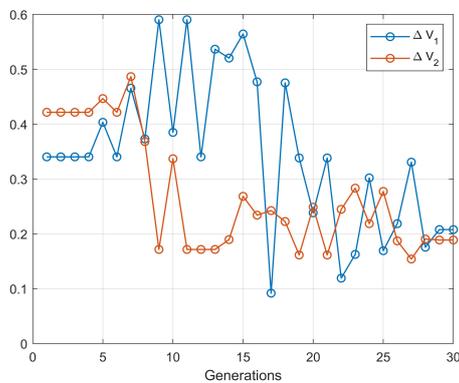
$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$E_{max1}$ [V]	$E_{min1}$ [V]	$E_{max2}$ [V]	$E_{min2}$ [V]
19.781	12.43	5.6243	3.8054	5.2088	3.4278

Tabella 5.4: Parametri di attuazione dei getti per segnale pulsato - Popolazione: 50 individui

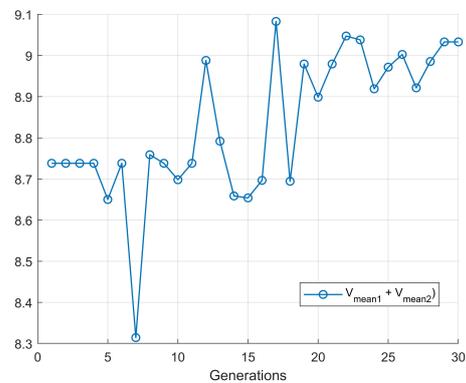
Come si nota dalle figure 5.21a e 5.21b i valori di  $\Delta V_1$  e  $\Delta V_2$  non sono  $\sim 0$ , ma tendono a un valore asintotico di  $\sim 0.2$ , mentre il valore di  $\sum(V_{mean1} + V_{mean2})$  tende a un valore di  $\sim 9.2$ .

Anche se la prova è stata interrotta alla trentesima generazioni, ci si aspetta che non si presentino grandi cambiamenti, in base ai dati ottenuti. Questo quindi implica che l'algoritmo abbia trovato un minimo locale, dal quale, nonostante i processi naturali, non riesca comunque a dissociarsi.

Da questa prova risulta evidente come l'algoritmo sia soggetto a molteplici interpretazioni.



(a) andamento  $\Delta V_1$  e  $\Delta V_2$



(b) andamento  $\sum(V_{mean1} + V_{mean2})$

Figura 5.21: Andamento dell'onda sinusoidale - Popolazione: 50 individui

## 5.4 Performance dell'algoritmo

Conclusa la fase di training è possibile eseguire la fase di valutazione, cioè la fase in cui vengono valutati i dati raccolti in modo da capire come l'algoritmo si comporti da un punto di vista fluidodinamico.

Nelle tabelle successive vengono riportate le condizioni di forcing che implicano la massima riduzione percentuale di resistenza aerodinamica nei casi considerati. Su queste è stata effettuata la fase di valutazione. Sono stati però trascurati i casi pulsati in cui erano presenti 5 individui e 10 individui per popolazione, perchè come già dimostrato, non permettono di ottenere un risultato accettabile; anche la Prova 1 con 20 individui per popolazione è stata trascurata perchè la seconda prova produceva risultati più accettabili e interessanti.

E' importante evidenziare come le condizioni di forcing sono sempre diverse in tutti i casi segnati.

$E_{up}$ [V]	$E_{bottom}$ [V]	$E_{lateral}$ [V]
9.3577	9.3577	9.3577

Tabella 5.5: Forcing con segnale continuo - attuazione simmetrica

$E_{up}$ [V]	$E_{bottom}$ [V]	$E_{lateral}$ [V]
7.0232	7.3173	9.008

Tabella 5.6: Forcing con segnale continuo - attuazione asimmetrica

$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$E_{max1}$ [V]	$E_{min1}$ [V]	$E_{max2}$ [V]	$E_{min2}$ [V]
12.262	13.62	5.3049	3.9925	4.9938	3.8604

Tabella 5.7: Forcing con segnale pulsato - Popolazione: 20 individui

$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$E_{max1}$ [V]	$E_{min1}$ [V]	$E_{max2}$ [V]	$E_{min2}$ [V]
28.266	5.172	5.875	3.4286	5.3491	3.2132

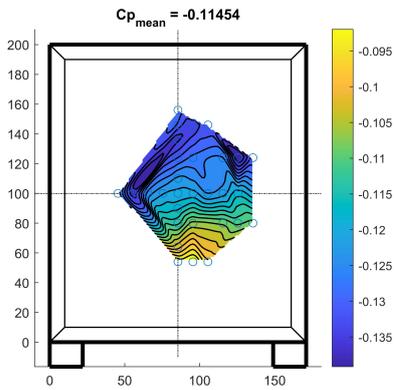
Tabella 5.8: Forcing con segnale pulsato - Popolazione: 30 individui

$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$E_{max1}$ [V]	$E_{min1}$ [V]	$E_{max2}$ [V]	$E_{min2}$ [V]
19.781	12.43	5.6243	3.8054	5.2088	3.4278

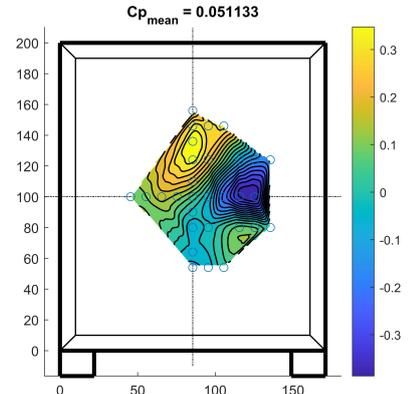
Tabella 5.9: Forcing con segnale pulsato - Popolazione: 50 individui

### 5.4.1 Distribuzione del $C_p$

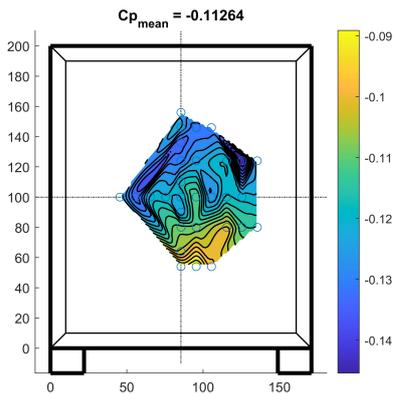
Di seguito si riportano le distribuzioni del coefficiente di pressione  $C_p$  del modello, in modo tale da poter osservare cosa succede nel momento in cui vengono azionati i getti con i parametri di attuazione forniti dall'algoritmo.



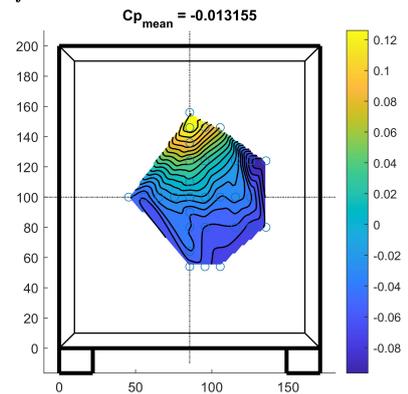
(a) *Getti continui simmetrici - unforced*



(b) *Getti continui simmetrici - forced*

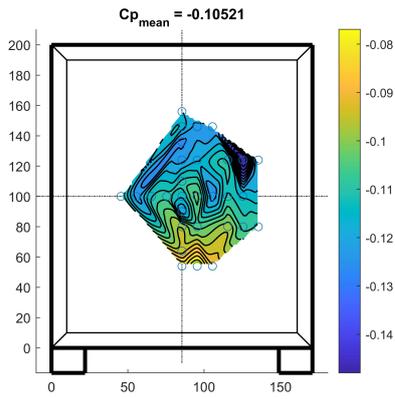


(c) *Getti continui asimmetrici - unforced*

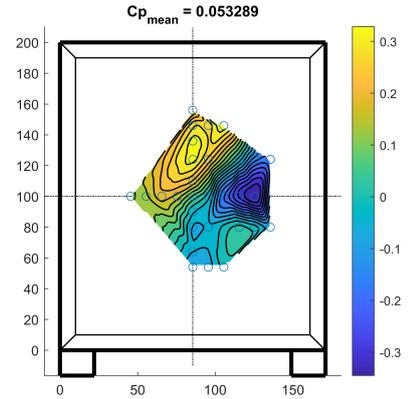


(d) *Getti continui asimmetrici - unforced*

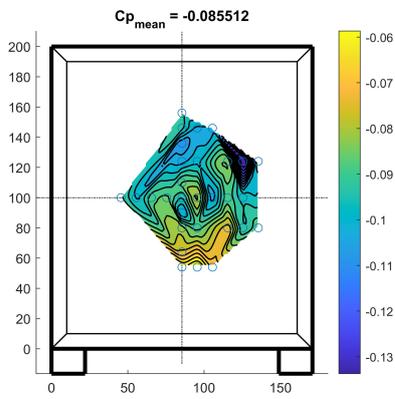
Figura 5.22:  $C_p$  base distribution - Getti continui



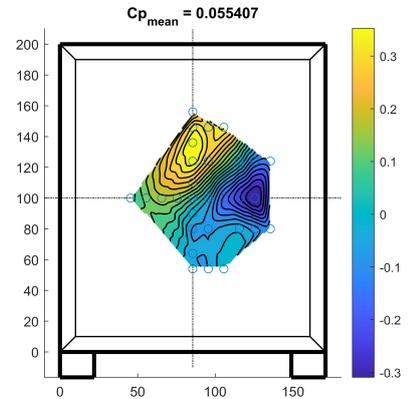
(a) *Getti pulsati - 20 individui - unforced*



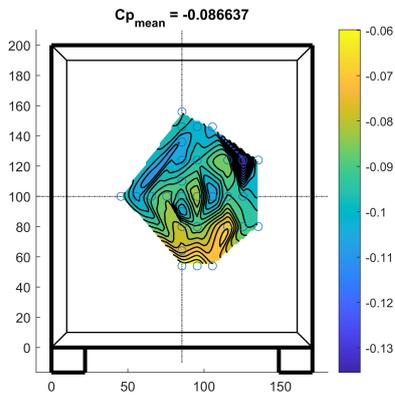
(b) *Getti pulsati - 20 individui - forced*



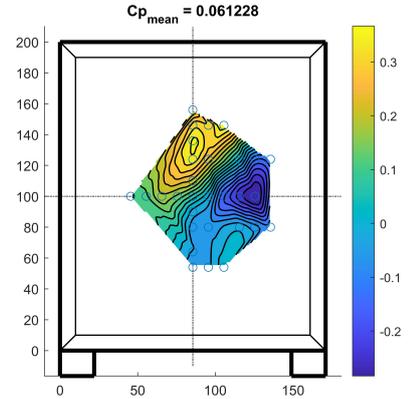
(c) *Getti pulsati - 30 individui - unforced*



(d) *Getti pulsati - 30 individui - forced*



(e) *Getti pulsati - 50 individui - unforced*



(f) *Getti pulsati - 50 individui - forced*

Figura 5.23:  $Cp$  base distribution - *Getti pulsati*

Nelle figure si osserva che nella condizione unforced il  $C_p$  medio risulta essere negativo, mentre quando si inizia a forzare tramite l'attuazione dei getti, quindi nella condizione forced, il  $C_p$  medio risulta positivo. Questo ovviamente dipende dall'azione del modello che, nella condizione unforced, genera una forte resistenza aerodinamica. Il forcing permette di ottenere una riduzione della stessa, agendo sulla riduzione di pressione.

Dal punto di vista della distribuzione di pressione è possibile distinguere chiaramente il caso forzato dal caso non forzato, ma soprattutto si nota come il caso con getti continui e quello pulsati sia molto simile.

Infatti nel caso unforced si distingue una regione di sovrappressione quindi un  $C_p$  più positivo nella parte inferiore mentre una zona di depressione quindi un  $C_p$  più negativo nella parte superiore. E' possibile quindi intuire una struttura asimmetrica della scia nella condizione naturale, risultato atteso data la condizione al contorno non simmetrica per la presenza del pavimento.

Nelle altre condizioni, cioè nelle condizioni di forcing, la distribuzione appare molto simile in tutti i casi, con la presenza di una forte regione di sovrappressione nella zona superiore della base. In realtà si evidenzia uno spostamento della zona di sovrappressione verso il lato destro del modello e questo si potrebbe giustificare con la presenza di un angolo di imbardata al quale la scia risulta essere molto sensibile [34].

### 5.4.2 Analisi POD

Per meglio comprendere come si comporta l'algoritmo da un punto di vista fluidodinamico si effettua un'analisi *POD*, confrontando la condizione di unforced e quella di forced, sfruttando i dati raccolti dalle capsule microfoniche posizionate nella base del modello, come mostrato e descritto nel capitolo 3.

L'analisi POD, Proper Orthogonal Decomposition, ha lo scopo di determinare i modi con maggior energia, così da confrontarle con la letteratura, e di valutare l'effetto del forcing sulla struttura della scia.

La tecnica POD, come spiegato in [Berkooz et al.](#), decompone il segnale temporale in modi e coefficienti modali. Un generico segnale temporale  $p'(Y, Z, t)$  viene decomposto in una somma di  $k$  modi ognuno dei quali è costituito da un coefficiente temporale  $a_k(t)$  ed una autofunzione  $\varphi_k(Y, Z)$  nel seguente modo:

$$p'(y, z, t) = \sum_k a_k(t) \varphi_k(Y, Z) \quad (5.4.1)$$

Ogni autofunzione  $\varphi_k(Y, Z)$  deve soddisfare la condizione:

$$\int \langle p'(Y, Z, t) \cdot p'(Y, Z, t)^T \rangle_t \cdot \varphi_j(Y, Z) dydz = \lambda_j \cdot \varphi_j(Y, Z) \quad (5.4.2)$$

dove  $j$  varia da 1 al numero totale delle capsule microfoniche, nel nostro caso 12.

Nelle figure 5.24 facciamo riferimento al caso con attuazione simmetrica di un segnale pulsato, in riferimento a una popolazione di 50 individui.

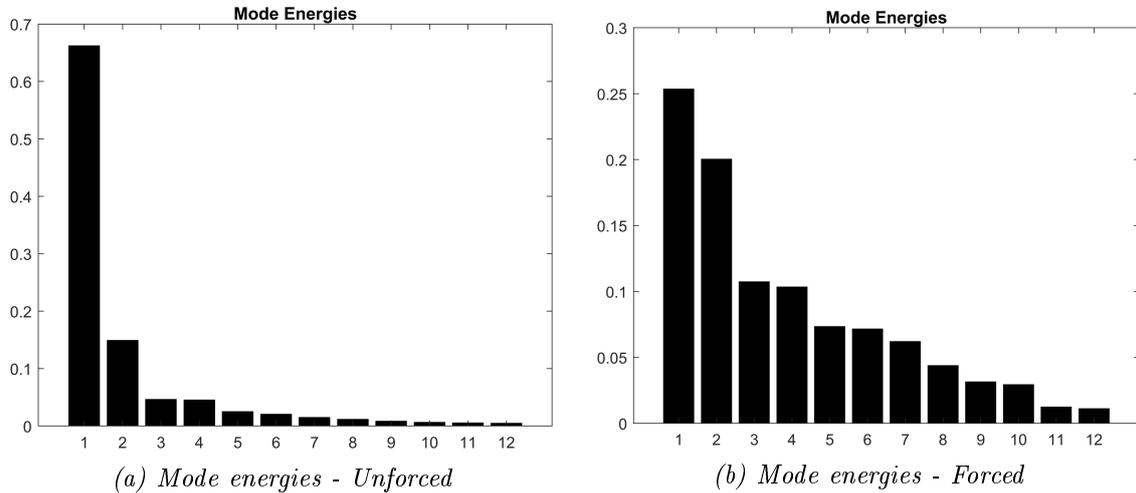


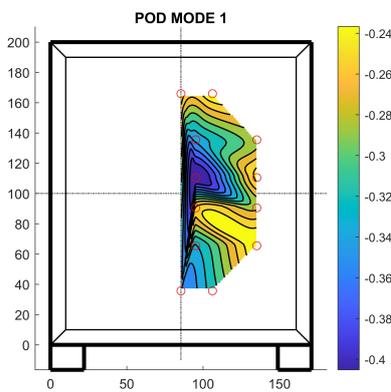
Figura 5.24: Mode energies per segnale pulsato - Popolazione: 50 individui

Appare evidente la differenza tra i due casi. Nel caso unforced, in figura 5.24a, il primo modo è sede di circa il 70% dell'energia complessiva, mentre nel caso forced, in figura 5.24b, l'energia ha una più equa suddivisione tra i modi.

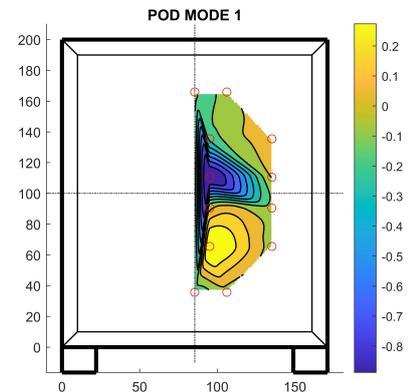
Di seguito è analizzato solo il modo 1 in condizione di unforcing e forcing, per i casi sopra citati.

Analizzando i modi dell'analisi POD, è possibile evidenziare come le due condizioni, di unforcing e di forcing, siano molto diversi tra loro. Per la condizione naturale, si nota una condizione asimmetrica; a questo infatti è il modo in cui è associata maggiore energia. Diversamente, per la condizione forzata, si nota una simmetrizzazione della struttura fluidodinamica.

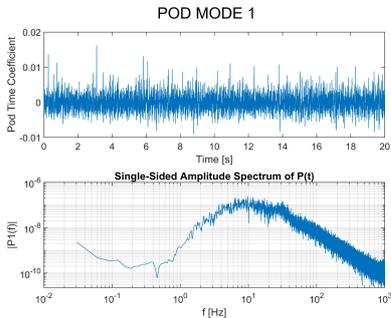
Analizzando i risultati dell'analisi spettrale, nella condizione forzata, si nota come i picchi si riferiscono al forcing, riportate nelle tabelle del paragrafo 5.4.



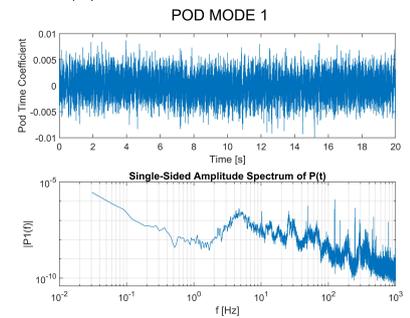
(a) Pod Mode 1 - Unforced



(b) Pod Mode 1 - Forced

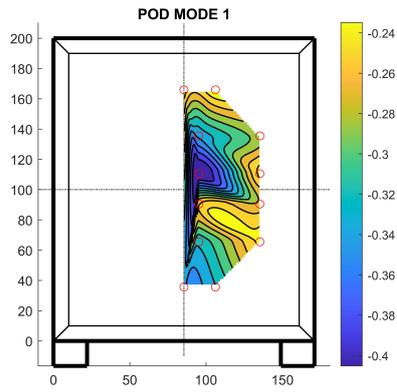


(c) Pod Mode 1 - Time Coefficient - Unforced

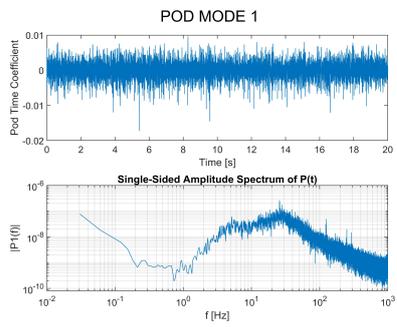


(d) Pod Mode 1 - Time Coefficient - Forced

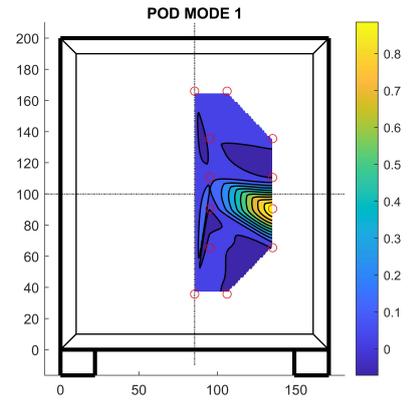
Figura 5.25: POD mode 1 per getto continuo simmetrico



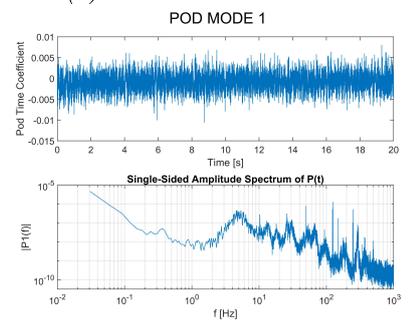
(a) Pod Mode 1 - Unforced



(c) Pod Mode 1 - Time Coefficient - Unforced

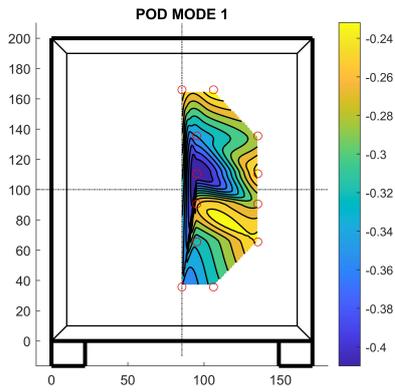


(b) Pod Mode 1 - Forced

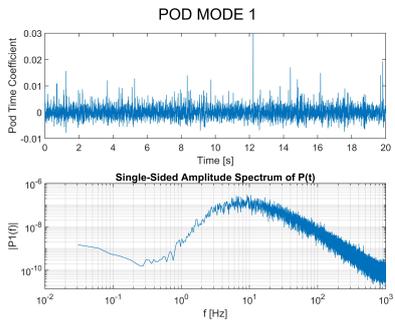


(d) Pod Mode 1 - Time Coefficient - Forced

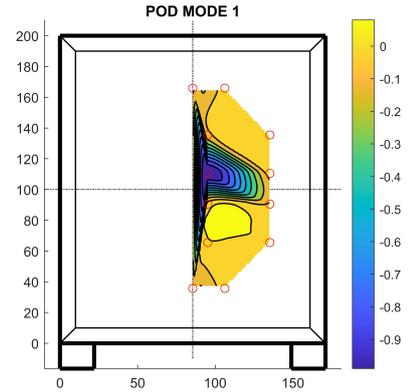
Figura 5.26: POD mode 1 per getto continuo asimmetrico



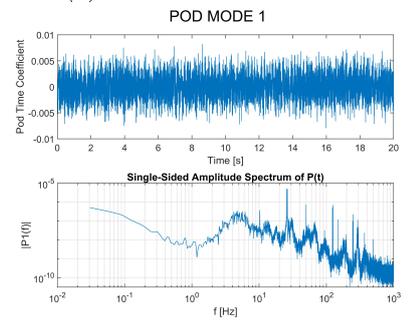
(a) Pod Mode 1 - Unforced



(c) Pod Mode 1 - Time Coefficient - Unforced

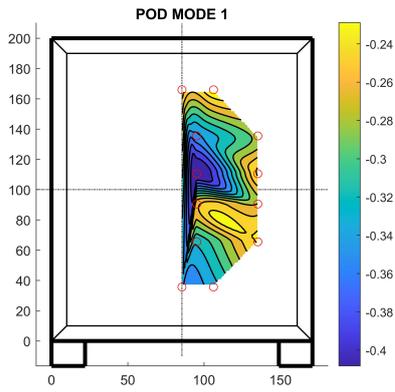


(b) Pod Mode 1 - Forced

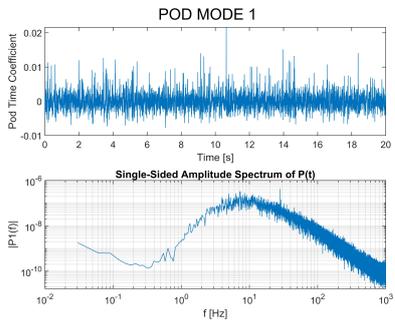


(d) Pod Mode 1 - Time Coefficient - Forced

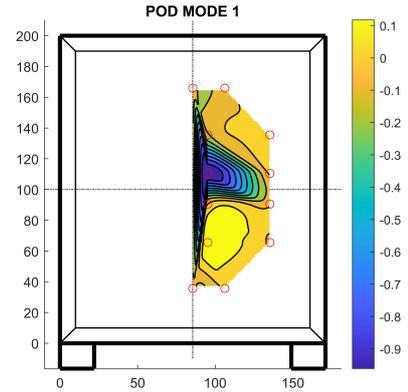
Figura 5.27: POD mode 1 per getto pulsato - Popolazione: 20 individui



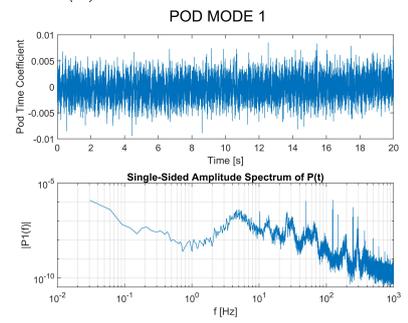
(a) Pod Mode 1 - Unforced



(c) Pod Mode 1 - Time Coefficient - Unforced

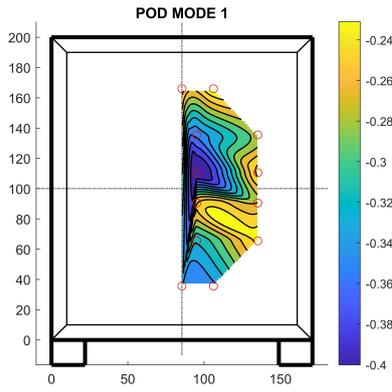


(b) Pod Mode 1 - Forced

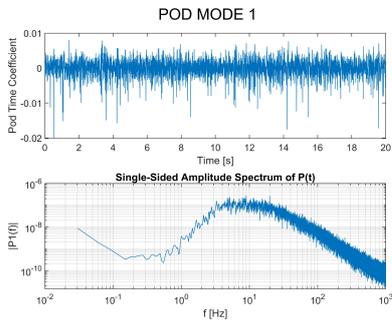


(d) Pod Mode 1 - Time Coefficient - Forced

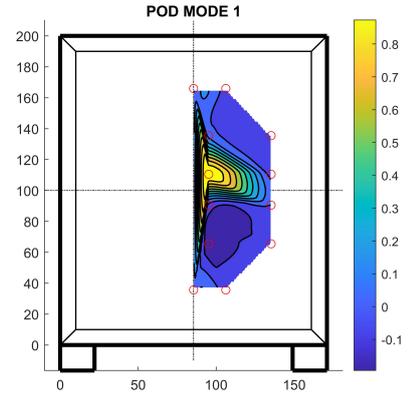
Figura 5.28: POD mode 1 per getto pulsato - Popolazione: 30 individui



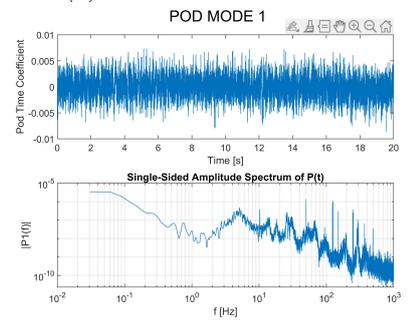
(a) Pod Mode 1 - Unforced



(c) Pod Mode 1 - Time Coefficient - Unforced



(b) Pod Mode 1 - Forced



(d) Pod Mode 1 - Time Coefficient - Forced

Figura 5.29: POD mode 1 per getto pulsato - Popolazione: 50 individui

## 5.5 Confronto

Nei capitoli precedenti si sono analizzati i risultati ottenuti utilizzando la stessa velocità della corrente a monte pari a  $Re_\infty \sim 0.9 \cdot 10^5$ .

Pur considerando che la funzione da minimizzare sia sempre la stessa, si è visto che le condizioni di forcing sono sempre diverse. Nelle tabelle seguenti sono riportati nuovamente i vari valori di forcing che implicano la massima riduzione percentuale di resistenza aerodinamica nei casi considerati, a cui vengono aggiunti i valori di velocità del getto. Nonostante la condizione di simmetria per i getti pulsati, non riscontriamo comunque la stessa simmetria per la velocità.

$E_{up}$ [V]	$E_{bottom}$ [V]	$E_{lateral}$ [V]
9.3577	9.3577	9.3577
Jet speed up [m/s]	Jet speed bottom [m/s]	Jet speed lateral [m/s]
34.2766	31.6005	13.9943

Tabella 5.10: Tabella riepilogativa forcing con segnale continuo - attuazione simmetrica

$E_{up}$ [V]	$E_{bottom}$ [V]	$E_{lateral}$ [V]
7.0232	7.3173	9.008
Jet speed up [m/s]	Jet speed bottom [m/s]	Jet speed lateral [m/s]
13.0394	14.647	12.6809

Tabella 5.11: Tabella riepilogativa forcing con segnale continuo - attuazione asimmetrica

$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$E_{max1}$ [V]	$E_{min1}$ [V]	$E_{max2}$ [V]	$E_{min2}$ [V]
12.262	13.62	5.3049	3.9925	4.9938	3.8604
Jet speed up [m/s]	Jet speed bottom [m/s]	Jet speed lateral [m/s]			
31.7133	29.2592	12.9360			

Tabella 5.12: Tabella riepilogativa forcing con segnale pulsato - Popolazione: 20 individui

$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$E_{max1}$ [V]	$E_{min1}$ [V]	$E_{max2}$ [V]	$E_{min2}$ [V]
28.266	5.172	5.875	3.4286	5.3491	3.2132
Jet speed up [m/s]		Jet speed bottom [m/s]		Jet speed lateral [m/s]	
30.4151		28.0735		12.4	

Tabella 5.13: Tabella riepilogativa forcing con segnale pulsato - Popolazione: 30 individui

$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$E_{max1}$ [V]	$E_{min1}$ [V]	$E_{max2}$ [V]	$E_{min2}$ [V]
19.781	12.43	5.6243	3.8054	5.2088	3.4278
Jet speed up [m/s]		Jet speed bottom [m/s]		Jet speed lateral [m/s]	
31.3263		28.9857		12.7762	

Tabella 5.14: Tabella riepilogativa forcing con segnale pulsato - Popolazione: 50 individui

Le tabelle mostrano chiaramente come le condizioni di forcing siano molto diverse.

In tutti i casi simmetrici si nota come la velocità di attuazione tra forcing superiore e forcing inferiore sia molto simile, mentre per la velocità del forcing laterale i valori sono completamente diversi e molto più bassi.

Per l'unico caso asimmetrico invece, quello con getti continui, notiamo come la velocità di attuazione tra il forcing superiore, inferiore e laterale sia molto simile, mentre per le tensioni solo il forcing superiore e inferiore è uguale, mentre quello laterale è molto più alto delle altre due. Questo risultato si discosta da quanto trovato in letteratura, in cui si è dimostrato come il getto superiore dovrebbe portarsi nella condizione di non attuazione.

Come abbiamo precedentemente affermato, l'algoritmo riesce a trovare i giusti parametri di attuazione per cui, spendendo energia, il segnale passa da pulsato a continuo. Questo risultato è stato ottenuto considerando una popolazione di 20 individui, come specificato nel paragrafo 5.3.3.

Facciamo riferimento alla tabella 5.10 e alla tabella 5.12. Nei getti simmetrici con segnale continuo il valore di tensione è pari a 9.3577 V, mentre nei getti simmetrici con segnale pulsato, i valori  $\Delta V_1$  e  $\Delta V_2 \sim 0$  e il valore della  $\sum(V_{mean1} + V_{mean2})$  tende ad aumentare ed è pari a 9.1 V. Idealmente, questi valori, cioè quelli di tensione del segnale continuo e pulsato, tendono a coincidere, come si nota anche dalle velocità di attuazione nei due casi. Continuando la simulazione, cioè aumentando il numero delle generazioni, i due valori possono convergere a un'unica soluzione.

Nonostante queste differenze, le analisi POD condotte hanno evidenziato come la struttura fluidodinamica che viene fuori con il forcing è grossomodo uguale, introducendo una simmetrizzazione della naturale condizione di asimmetria.

Per avere una miglior consapevolezza di questo, sarebbe opportuno condurre analisi di maggior dettaglio, come ad esempio un'analisi PIV.

# Conclusioni e sviluppi futuri

In questo lavoro di tesi si è cercato di applicare una delle metodologie degli algoritmi evolutivi, cioè quello dell'algoritmo genetico *GA*, a un problema reale e comune, come quello di riduzione di resistenza di un veicolo da trasporto merci.

Questo algoritmo ha come obiettivo emulare ciò che normalmente avviene in natura, cioè permettere la sopravvivenza della specie. Non a caso infatti, l'algoritmo, creando casualmente una popolazione iniziale, permette solo agli individui migliori di riprodursi e quindi di sopravvivere, col fine ultimo di raggiungere un obiettivo.

Come sempre, ogni metodologia ha bisogno prima di svilupparsi e validarsi. In letteratura sono presenti numeri riferimenti a questo metodo di ottimizzazione; ad esempio nel testo di [Wahde](#) vi sono presenti sia semplici problemi numerici elementari sia problemi di importanza più rilevante, soprattutto problemi reali, come l'ottimizzazione dei sistemi di frenatura dei camion o la determinazione delle orbite di galassie o la previsione della sopravvivenza al cancro. Gli ambiti sono molteplici e variegati, soprattutto se ci occupiamo dell'ambito fluidodinamico.

Considerando le grandi potenzialità di questo metodo, anche semplici linguaggi di programmazione come *Matlab*, hanno sviluppato librerie in grado di poter utilizzare lo stesso, permettendo quindi un semplice e rapido approccio, anche a problemi del tutto sperimentali.

In effetti l'approccio sperimentale, che elimina il problema della potenza di calcolo computazione, è quello utilizzato in questo lavoro di tesi: la possibilità di controllare la scia di un modello di veicolo da trasporto merci, usando dei getti posti sullo stesso, al fine di ridurre la resistenza aerodinamica. Si è dimostrato infatti come questa possa essere ridotta con valori percentuali del coefficiente di resistenza pari a  $\sim 9\%$  usando per il getto segnali pulsati e  $\sim 15\%$  usando per il getto segnali continui. Questa riduzione è ottima se consideriamo la tipologia del modello, perchè per le condizioni operative la resistenza aerodinamica incide per il 20 – 30% sui costi, incidendo quindi anche dal punto di vista economico e dell'ambiente.

Se da un lato abbiamo un grande vantaggio nel poter utilizzare questa metodologia nell'ambito dell'ottimizzazione, dall'altro ovviamente vi sono presenti numerosi limiti.

Il più importante e significativo riguarda il tempo di calcolo; infatti, come si

evince da questo lavoro, l'esecuzione di una simulazione può durare anche giorni, piuttosto che ore. Se si considera che bisognerebbe raggiungere una convergenza puntuale per ogni caso studiato e soprattutto si dovrebbe svolgere una misura considerando la piena libertà di attuazione da parte dei getti, il tempo tende ad aumentare esponenzialmente. Altre sono le metodologie che permettono di risparmiare tempo e lavoro.

Ancora, bisogna considerare che vi è presente una grande complessità legata allo sviluppo di un modello attrezzato per la misura e non possono essere trascurate tutte le problematiche che nascono nel momento in cui si vuole eseguire una prova, come quella di isteresi da parte degli stessi strumenti.

Se questo lavoro di tesi ha comunque posto attenzione su un problema cruciale della fluidodinamica, rispondendo a numerosi quesiti, gli interrogativi che ha lasciato aperti sono molteplici. Se prendiamo in considerazione il punto di vista dell'algoritmo, sarebbe interessante valutare come si comporta lo stesso quando vengono cambiati dei parametri: per il processo di selezione far riferimento al torneo, piuttosto che alla roulette, oppure ridurre il numero di popolazioni dopo varie generazioni, e così via. Se consideriamo invece le condizioni operative, sarebbe interessante valutare come l'algoritmo si comporta cambiando il valore della velocità della corrente a monte, oppure variare la forma del segnale, considerando quindi un'onda quadra piuttosto che una sinusoidale, oppure aumentare il numero di parametri in gioco, quindi non solo la frequenza e l'ampiezza ma anche il duty cycle, o ancora utilizzare l'algoritmo in condizione di off-design, come la condizione di platooning. Le possibilità sono molteplici.

# Bibliografia

- [1] Commissione Europea. Direttiva ue 2015/719 del parlamento europeo e del consiglio. 2015.
- [2] European Environment Agency. Technical report - monitoring co2 emissions from passenger cars and vans. 2013.
- [3] Wolf-Heinrich Hucho and Gino Sovran. Aerodynamics of road vehicles. Annual Review of Fluid Mechanics, 25, 1993.
- [4] Brandon Schoettle, Michael Sivak, and Michael Tunnell. A survey of fuel economy and fuel usage by heavy-duty truck fleets. American Transportation Research Institute, 2016.
- [5] P. Gehlert, G. Cafiero, and J.C. Vassilicos. Effect of fractal endplates on the wingtip vortex. Proceedings of the 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting, (210059), 2018. doi: 10.2514/6.2018-1796.
- [6] A. Capone and G.P. Romano. Investigation on the effect of horizontal and vertical deflectors on the near-wake of a square-back car model. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 185, 2019. doi: 10.1016/j.jweia.2018.12.011.
- [7] Gregory Pujals, S. Depardon, and Carlo Cossu. Drag reduction of a 3d bluff body using coherent streamwise streaks. Experiments in Fluids, 49:1085–1094, 11 2010. doi: 10.1007/s00348-010-0857-5.
- [8] Jean-François Beaudoin and J.-L. Aider. Drag and lift reduction of a 3d bluff body using flaps. Experiments in Fluids, 44:491–501, 04 2008. doi: 10.1007/s00348-007-0392-1.
- [9] Dongri Kim, Hoon Lee, Wook Yi, and Haecheon Choi. A bio-inspired device for drag reduction on a three-dimensional model vehicle. Bioinspiration & Biomimetics, 11(2):026004, mar 2016. doi: 10.1088/1748-3190/11/2/026004. URL <https://doi.org/10.1088/1748-3190/11/2/026004>.

- 
- [10] G. Iuso. Base pressure control by passive methods. doi: 10.2514/6.1985-1620. URL <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.1985-1620>.
- [11] S.R. Ahmed, G.Ramm, and G.Faltin. Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. SAE-Techn. Paper Series,, 1984.
- [12] G. Minelli, T. Dong, B. R. Noack, and S. Krajnović. Upstream actuation for bluff-body wake control driven by a genetically inspired optimization. Journal of Fluid Mechanics, 893, 2020.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] M. Grandemange, M. Gohlke, and O. Cadot. Reflectional symmetry breaking of the separated flow over three-dimensional bluff bodies. Physical review. E, 83, 2012.
- [16] M. Grandemange, M. Gohlke, and O. Cadot. Bi-stability in the turbulent wake past parallelepiped bodies with various aspect ratios and wall effects. Physics of Fluids, 725, 2013.
- [17] 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.
- [18] Diogo Barros, Jacques Borée, Bernd R. Noack, Andreas Spohn, and Tony Ruiz. Bluff body drag manipulation using pulsed jets and coanda effect. Journal of Fluid Mechanics, 805, 2016.
- [19] Ruiying Li, Diogo Barros, Jacques Borée, Olivier Cadot, Bernd R. Noack, and Laurent Cordier. Feedback control of bimodal wake dynamics. Experiments in Fluids, 57(10), October 2016. ISSN 0723-4864. doi: 10.1007/s00348-016-2245-2. Publisher Copyright: © 2016, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Copyright: Copyright 2017 Elsevier B.V., All rights reserved.
- [20] Diogo Barros, Jacques Borée, Bernd R. Noack, and Andreas Spohn. Resonances in the forced turbulent wake past a 3d blunt body. Physics of Fluids, 2016.
- [21] Juan José Cerutti, Costantino Sardu, Gioacchino Cafiero, and Gaetano Iuso. Active flow control on a square-back road vehicle. Fluids, 2020.

- [22] Charles Darwin. The origin of species by means of natural selection. 1859.
- [23] R. Dawkins. The blind watchmaker. 1986.
- [24] International Human Genome Sequencing Consortium. Finishing the euchromatic sequence of the human genome. *Nature*, 431:931–945, 10 2004. doi: 10.1038/nature03001.
- [25] M. Wahde. Biologically inspired optimization methods - an introduction. 1986.
- [26] B. Lewin. Genes viii. 2004.
- [27] J. H. Holland. Adaptation in natural and artificial systems. *University of Michigan Press*, 1975.
- [28] F. Grey. Pulse code communications. U.S. Patent, 1953.
- [29] M. Paprzycki O. Roeva, S. Fidanova. Influence of the population size on the genetic algorithm performance in case of cultivation process modelling. 2013.
- [30] 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. *SAE Technical Paper 880245*, 1988. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2941229.
- [31] E. Amico. Controllo della scia di corpi tozzi mediante Reinforcement Learning. Tesi Magistrale, 2021.
- [32] 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.
- [33] Robert Englar. Advanced aerodynamic devices to improve the performance, economics, handling, and safety of heavy vehicles. 05 2001. doi: 10.4271/2001-01-2072.
- [34] Guillaume Bonnavion and Olivier Cadot. Unstable wake dynamics of rectangular flat-backed bluff bodies with inclination and ground proximity. *Journal of Fluid Mechanics*, 854:196–232, 2018. doi: 10.1017/jfm.2018.630.
- [35] G Berkooz, P Holmes, and J L Lumley. The proper orthogonal decomposition in the analysis of turbulent flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 25 (1):539–575, 1993. doi: 10.1146/annurev.fl.25.010193.002543. URL <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.25.010193.002543>.