

# POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Meccanica, Aerospaziale, dell'Autoveicolo e della  
Produzione

**Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Meccanica**

Tesi di Laurea Magistrale

## **Applicazione della tecnica di Design of Experiment per l'ottimizzazione di design di veicoli ibridi**



**Relatore**  
prof. Daniela Misul

**Candidato**  
Rossella Clarissa Scala

Aprile 2019



A Malaga,  
quando un'esperienza ti cambia i punti di vista.



# INDICE

Introduzione .....	1
1. Una sfida globale .....	2
1.1. Normative Euro .....	4
1.2. Emissioni di biossido di carbonio (CO <sub>2</sub> ) .....	10
1.3. Veicoli ibridi .....	11
1.3.1. Configurazione veicoli ibridi .....	12
2. Design of Experiment .....	18
2.1. Breve storia della tecnica DOE .....	18
2.2. Principi base .....	18
2.3. Tecniche di pianificazione DoE .....	21
2.3.1. Classical Designs .....	21
2.3.2. Optimal designs .....	25
2.3.2.1. Criteri di ottimalità .....	27
2.3.3. Space Filling .....	28
2.4. Concetto del modello .....	32
2.4.1. Processo Gaussiano .....	33
2.4.2. Parametri di valutazione dei modelli di regressione .....	34
2.5. Model-Based Calibration Toolbox .....	36
3. Modello veicolo .....	37
3.1. Motore termico .....	38
3.2. Macchina elettrica .....	39
3.3. Batteria .....	40
3.4. Torque coupling device .....	44
3.5. Trasmissione .....	45
3.6. Modello dinamico .....	46
3.7. Modalità di funzionamento ed equazioni .....	48
3.8. Ciclo guida utilizzato .....	49
3.9. Dynamic Programming .....	50
3.9.1. Sistema dinamico a tempo discreto .....	50
3.9.2. Funzione obiettivo .....	51
3.9.3. Algoritmo della Dynamic Programming .....	52
4. Ottimizzazione di design .....	53

4.1. Procedura di ottimizzazione parte I .....	55
4.2. Procedura ottimizzazione parte II .....	66
4.3. Strategia alternativa .....	70
Conclusione .....	95

# Introduzione

La mobilità sta cambiando per esigenze sia ambientali che climatiche e il settore dell'automotive è chiamato a fronteggiare i problemi di emissione inquinanti e di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>). Nella seguente tesi si attenzionerà il problema delle emissioni di CO<sub>2</sub> e si focalizzerà l'attenzione sulla progettazione di design di un veicolo ibrido, concentrandosi in particolare sull'ottimizzazione di design di un veicolo pesante. Al fine di raggiungere l'obiettivo si utilizzerà il metodo statistico di progettazione: Design of Experiment.

Il lavoro sarà implementato in ambiente Matlab e si affiancherà alla ricerca il tool Model-Based Calibration.

La tesi è articolata su quattro capitoli. Nel primo capitolo si affronteranno i problemi delle emissioni, si discuterà della fase di transizione che sta vivendo l'ambito automotive, della posizione dell'Unione Europea riguardo ai problemi climatici e su come intenda fronteggiarli. Inoltre si illustreranno varie tipologie di architetture ibride. Nel secondo capitolo si descriverà nel dettaglio la tecnica di progettazione utilizzata, spiegando la base teorica, e si andranno ad analizzare le varie tecniche applicabili con i relativi piani sperimentali e i vari modelli. Il terzo capitolo illustrerà il modello del veicolo che si intende ottimizzare, analizzando ogni singolo componente e introducendo il metodo Dynamic Programming che sarà indispensabile per lo studio, in quanto analizzerà la fattibilità di ogni singola architettura e fornirà i valori esatti della CO<sub>2</sub>. Il quarto capitolo illustrerà nel dettaglio la procedura effettuata per la ricerca dell'ottimo design e si andranno ad eseguire diverse prove, confronti, al fine di individuare non solo l'architettura ottimale ma anche di individuarla nel minor tempo possibile.

Infine nell'ultimo capitolo si mostreranno i risultati della procedura adottata e si trarranno le conclusioni sull'importanza della tecnica di Design of Experiment, utile ai fini della ricerca ed efficace per l'ottimizzazione dei processi.

# 1. Una sfida globale

A partire dalla rivoluzione industriale la concentrazione dei gas serra immessi nell'ambiente è progressivamente aumentata, causando un innalzamento delle temperature globali.

L'intero pianeta è chiamato a fronteggiare questo problema, prendendo adeguate misure al fine di evitare un aumento delle temperature di circa 3,7-4,8 °C entro fine secolo [1]. La CO<sub>2</sub> è il principale gas serra prodotto dall'uomo, corrispondente a circa 75% delle emissioni mondiali, le principali cause sono dovute alla combustione dei combustibili fossili, necessari per generare elettricità, calore, carburante per mezzi di trasporto. Focalizzando l'attenzione sull'Europa, un quarto delle emissioni dei gas serra sono causati dai mezzi di trasporto, quest'ultimi inoltre immettono in atmosfera sostanze inquinanti dannose per la salute, tanto da essere considerati anche i primi responsabili dell'inquinamento nei centri urbani.

In figura 1.1 si mostra l'innalzamento delle temperature mondiali registrati dalla Nasa allo scopo di fornire una visione immediata e globale della situazione attuale. Il 2018 è stato registrato come l'anno più caldo e la regione che ne ha più risentito è la regione artica. Invece in figura 1.2 si riporta un'analisi effettuata da IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) su come gli aumenti della CO<sub>2</sub> influiranno sulle temperature: il grafico arancione fornisce una stima dell'aumento delle temperature se i gas serra rimangono a livelli dell'anno 2000, mentre gli altri grafici si riferiscono all'incremento dell'utilizzo dei combustibili fossili.

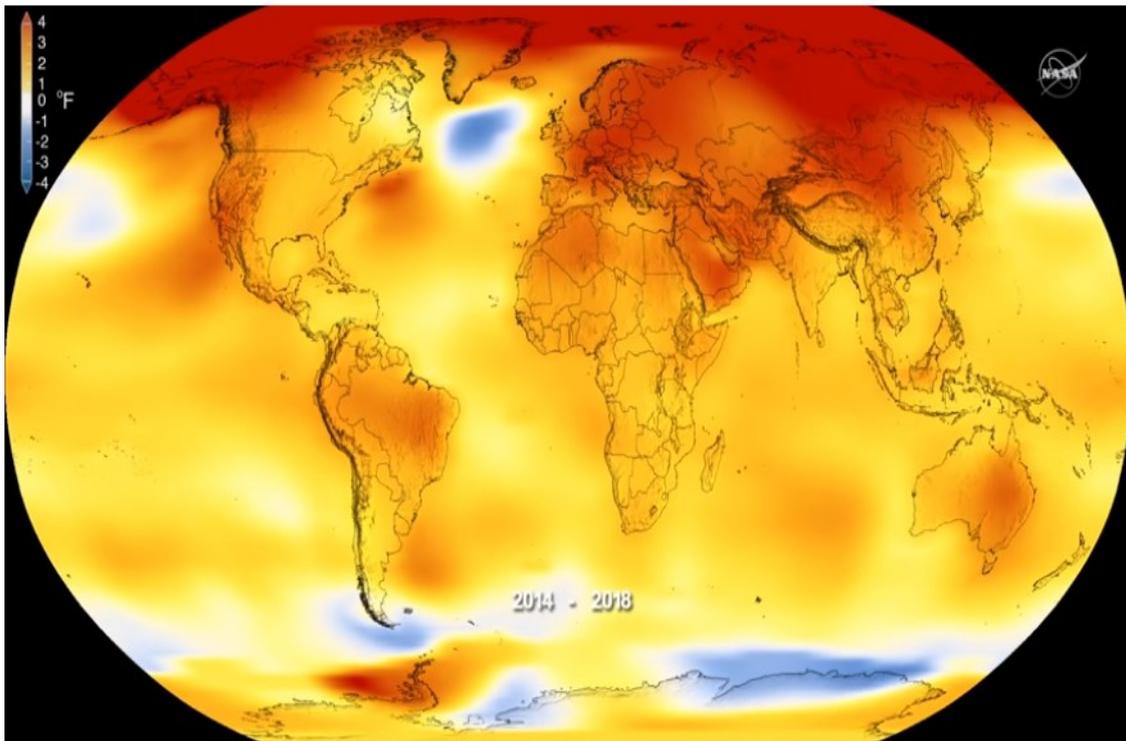


Figure 1.1: Dati globali di temperatura registrati dalla Nasa [3].

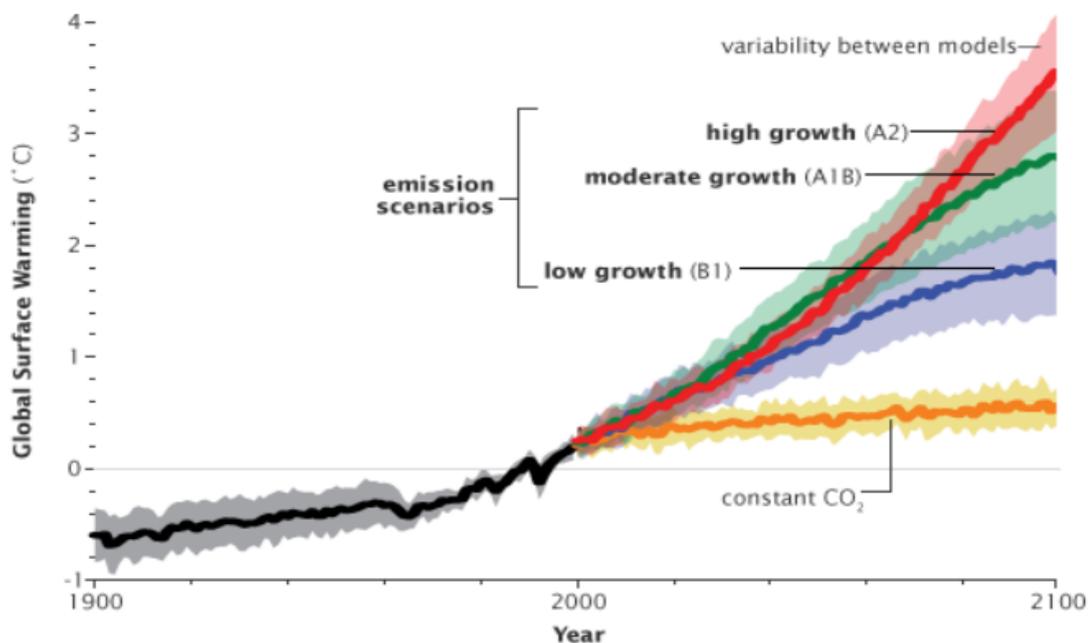


Figure 1.2: Analisi effettuata da IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) [4].

Si ha la consapevolezza che il cambiamento della composizione dell'aria che respiriamo provochi danni sia alla salute che all'ambiente. Per questo motivo dal 1991 inizia la battaglia contro la riduzione degli inquinanti da parte delle Agenzie Mondiali di tutela dell'ambiente e portata avanti dall'EPA (Environmental Protection Agency) e UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) [2]. Nascono le norme Euro emanate dall'Unione Europea per limitare gli inquinanti emessi nell'ambiente (PM, NO<sub>x</sub>, CO e HC) e spronare i costruttori a sviluppare tecnologie sempre più ecosostenibili ed efficienti. Oggi viviamo in un periodo di transizione per la mobilità, i veicoli alimentati esclusivamente dal tradizionale carburante si pensa verranno pian piano rimpiazzati dai veicoli ibridi elettrici, elettrici e ad idrogeno, sebbene gli ultimi due abbiano ancora dei limiti:

- I veicoli elettrici hanno problemi di ingombro, di peso e di scarsa autonomia, tempi di ricarica lunghissimi e una rete di distribuzione non adeguata per fronteggiare elevate richieste di elettricità;
- I veicoli ad idrogeno, se dal punto di vista della ricarica si trovano in una situazione più favorevole, devono fronteggiare la mancanza di infrastrutture, problemi di sicurezza per la distribuzione dell'idrogeno, problemi di stoccaggio a bordo del veicolo.

Dunque al momento la soluzione percorribile per una mobilità ecosostenibile sono i veicoli ibridi, ad oggi diffusi nel mercato globale e in continuo sviluppo.

### Categorie veicoli

Le norme di emissioni adottate e i vari regolamenti non sono uguali per tutti i veicoli, infatti per maggior chiarezza di applicazione i veicoli vengono suddivisi per categorie. Le principali categorie di nostro interesse sono: la categoria **M** che comprende i veicoli a motore progettati e costruiti sia per il trasporto di persone che per i loro bagagli e la categoria **N** che comprende i veicoli a motore progettati e costruiti per il trasporto merci. A loro volte queste due categorie vengono suddivise in sottocategorie:

- M1: veicoli dotati di 1 o al massimo 9 posti a sedere incluso il conducente. Non è previsto lo spazio per passeggeri in piedi;

- M2: veicoli dotati di più di 9 posti a sedere incluso il conducente e la cui massa non supera le 5t. Inoltre può essere presente lo spazio per passeggeri in piedi;
- M3: veicoli dotati di più di 9 posti a sedere incluso il conducente e la loro massa supera le 5t. Inoltre può essere presente lo spazio per i passeggeri in piedi;
- N1: veicoli la cui massa non supera le 3,5 t. Inoltre in base al peso vengono suddivisi in 3 classi, la cui suddivisione è riportata in tabella 1.1;
- N2: veicoli la cui massa è compresa tra 3,5t e 12t;
- N3: veicoli la cui massa è superiore a 12t.

Classe	Massa di riferimento, m	
	Euro 1-2	Euro 3+
<b>I</b>	$m \leq 1250 \text{ kg}$	$m \leq 1305 \text{ kg}$
<b>II</b>	$1250 \text{ kg} < m \leq 1700\text{kg}$	$1305 \text{ kg} < m \leq 1760\text{kg}$
<b>III</b>	$m > 1700 \text{ kg}$	$m > 1760 \text{ kg}$

Tabella 1.1: Sottocategorie dei veicoli N1 [6]

In generale i veicoli si suddividono in light duty e heavy duty. La differenza tra light duty ed heavy duty è la massa di riferimento, calcolata nel seguente modo:

- massa del veicolo in ordine di marcia (liquido di raffreddamento, combustibili, ruota di scorta, attrezzi, lubrificanti, conducente) meno un'ipotetica massa del conducente (pari a 75 kg) più una massa di 100 kg.

Fino al 2008 la massa di riferimento era 3.5 t e i veicoli con massa di riferimento inferiore a 3.5t venivano definiti light duty, mentre quelli con massa superiore heavy duty.

Adesso invece un veicolo è definito:

- light duty: se la sua massa di riferimento è inferiore a 2610 kg (estendibile su richiesta del produttore fino a 2380kg) e rientrano in questa categoria le passenger cars, gli autobus e i light commerciala vehicles (M1,M2,N1,N2 ).
- heavy duty: se la sua massa di riferimento è superiore a 2610 kg (ridotta in determinate condizioni a 2380kg) e rientrano in questa categoria gli heavy trucks (M1, M2, M3, N3) [5].

## 1.1. Normative Euro

Le normative nel corso degli anni sono state sempre più stringenti sia per quanto riguarda le tecnologie da utilizzare che per le emissioni. Tutti i veicoli immatricolati prima che entrassero in vigore le normative EURO vengono classificati con la sigla EURO 0, che comprende i veicoli più inquinanti, a benzina, non possedenti catalizzatore e non ecodiesel [2].

In tabella 1.2 si riporta un quadro generale sulle normative per le passenger cars attuate nel corso degli anni. Per i veicoli light duty trucks, il quadro generale delle normative è riportato in tabella 1.3, ma si considera solo la categoria N1 classe II, tale scelta è del tutto aleatoria per non appesantire la trattazione.

#### LIMITI D'EMISSIONE PER I PASSENGER CARS

PI	CO	HC	HC+NO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	PM	PN
	g/km					n./km
<b>EURO 1</b> <b>07.1992</b>	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	-	-	-
<b>EURO 2</b> <b>01.1996</b>	2.2	-	0.5	-	-	-
<b>EURO 3</b> <b>01.2000</b>	2.30	0.20	-	0.15		
<b>EURO 4</b> <b>01.2005</b>	1.0	0.10	-	0.08		
<b>EURO 5</b> <b>09.2009<sup>B</sup></b>	1.0	0.10 <sup>D</sup>	-	0.06	0.005 <sup>E,F</sup>	
<b>EURO 6</b> <b>09.2014</b>	1.0	0.10 <sup>D</sup>	-	0.06	0.005 <sup>E,F</sup>	6.0*10 <sup>11 E,G</sup>
<b>CI</b>						
<b>EURO 1</b> <b>07.1992</b>	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	-	0.14 (0.18)	-
<b>EURO 2,</b> <b>IDI</b> <b>01.1996</b>	1.0	-	0.7	-	0.08	-
<b>EURO 2</b> <b>DI</b> <b>01.1996<sup>A</sup></b>	1.0	-	0.9	-	0.10	-
<b>EURO 3</b> <b>01.2000</b>	0.64	-	0.56	0.50	0.05	-
<b>EURO 4</b> <b>01.2005</b>	0.50	-	0.30	0.25	0.025	-
<b>EURO 5A</b> <b>09.2009<sup>B</sup></b>	0.50	-	0.23	0.18	0.005 <sup>F</sup>	-
<b>EURO 5B</b> <b>09.2011<sup>C</sup></b>	0.50	-	0.23	0.18	0.005 <sup>F</sup>	6.0*10 <sup>11</sup>
<b>EURO6</b> <b>09.2014</b>	0.50	-	0.17	0.08	0.005 <sup>F</sup>	6.0*10 <sup>11</sup>
Per gli EURO 1-2-3-4: i passenger cars >2500 kg erano omologati come categoria N <sub>1</sub> I valori tra parentesi sono i limiti di conformità della produzione (COP) A. Dopo il 30.09.1999 i motori DI devono rispettare i limiti IDI B. 01.2011 per tutti i modelli C. 01.2013 per tutti i modelli D. E NMHC=0.068g/km E. Applicabile solo a veicoli che usano motori DI F. 0.0045 g/km utilizzando la procedura di misurazione PMP G. 6.0*10 <sup>12</sup> l/km entro i primi tre anni dalle date di validità Euro6						

Tabella 1.2: Norme Euro passenger cars [6]

**LIMITI D'EMISSIONE PER I LIGHT COMMERCIAL  
VEHICLES**

PI	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM	PN
	g/km					n./km
<b>EURO 1</b> 10.1994	5.17	-	1.40	-	-	-
<b>EURO 2</b> 01.1998	4.0	-	0.65	-	-	-
<b>EURO 3</b> 01.2001	4.17	0.25	-	0.18	-	
<b>EURO 4</b> 01.2006	1.81	0.13	-	0.10	-	
<b>EURO 5</b> 09.2010 <sup>C</sup>	1.81	0.13 <sup>H</sup>	-	0.075	0.005 <sup>E,F</sup>	
<b>EURO 6</b> 09.2015	1.81	0.13 <sup>H</sup>	-	0.075	0.005 <sup>E,F</sup>	6.0*10 <sup>11 E,J</sup>
<b>CI</b>						
<b>EURO 1</b> 10.1994	5.17	-	1.40	-	0.19	-
<b>EURO 2,</b> <b>IDI</b> 01.1998	1.25	-	1.0	-	0.12	-
<b>EURO 2</b> <b>DI</b> 01.1998 <sup>A</sup>	1.25	-	1.30	-	0.14	-
<b>EURO 3</b> 01.2001	0.80	-	0.72	0.65	0.07	-
<b>EURO 4</b> 01.2006	0.63	-	0.39	0.33	0.04	-
<b>EURO 5A</b> 09.2010 <sup>C</sup>	0.63	-	0.295	0.235	0.005 <sup>F</sup>	-
<b>EURO 5B</b> 09.2011 <sup>P</sup>	0.63	-	0.295	0.235	0.005 <sup>F</sup>	6.0*10 <sup>11</sup>
<b>EURO6</b> 09.2015	0.63	-	0.195	0.105	0.005 <sup>F</sup>	6.0*10 <sup>11</sup>

Per gli Euro 1-2: la massa di riferimento per la categoria N1 classe II è 1250-1700kg  
A. Dopo il 30.09.1999 i motori DI devono rispettare i limiti IDI  
B. 01.2011 per tutti i modelli  
C. 01.2012 per tutti i modelli  
D. 01.2013 per tutti i modelli  
E. Applicabile solo a veicoli che usano motori DI  
F. 0.0045 g/km utilizzando la procedura di misurazione PMP  
G. e NMHC= 0.068 g/km  
H. e NMHC= 0.090 g/km  
I. e NMHC= 0.108 g/km  
J. 6.0\*10<sup>12</sup> 1/km entro i primi tre anni dalle date di validità Euro6

Tabella 1.3: Norme Euro light duty categoria N1 Classe II [6]

Il consumo di combustibile e la quantità in massa di ciascuna sostanza inquinante si calcola tramite cicli omologativi standardizzati, con l'obiettivo di confrontare le emissioni e i consumi dei vari veicoli. Le prove sono svolte su banchi dinamometrici a rulli, simulando un comportamento reale di guida.

Fino al 2017 si utilizzava il ciclo di omologazione NEDC, successivamente, essendo un ciclo teorico, non fu considerato più attendibile al reale stile di vita quotidiano poiché i valori calcolati tramite esso erano ben lontani dai valori reali di guida.

Dall'1 settembre 2017 entrò in vigore la procedura WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure) e RDE. Il ciclo di marcia del WLTP prende il nome di WLTC ed è stato sviluppato tramite dati di guida reali raccolti in tutto il mondo. Il WLTP comprende diversi

cicli di guida e la scelta su quale ciclo applicare per effettuare l'omologazione dipende da due fattori:

- il rapporto tra la potenza nominale del veicolo sottoposto a prova e la massa in ordine di marcia in W/kg (PMR);
- la velocità massima.

Dall'1 settembre 2017 entrò in vigore la procedura WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure) e RDE. Il ciclo di marcia del WLTP prende il nome di WLTC ed è stato sviluppato tramite dati di guida reali raccolti in tutto il mondo. Il WLTP comprende diversi cicli di guida e la scelta su quale ciclo applicare per effettuare l'omologazione dipende da due fattori:

- il rapporto tra la potenza nominale del veicolo sottoposto a prova e la massa in ordine di marcia in W/kg (PMR);
- la velocità massima.

Le tabelle 1.4 e 1.5 mostrano come vengono classificati i veicoli se si considera il nuovo ciclo di omologazione.

CLASSIFICAZIONE DEI VEICOLI

Classe	PMR [W/kg]
1	$\leq 22$
2	$>22$ ma $\leq 34$
3	$> 34$

Tabella 1.4: Classificazione dei veicoli [7]

SOTTOLASSI VEICOLO CLASSE 3

Classe	Velocità massima [km/h]
3 A	$< 120$
3 B	$\geq 120$

Tabella 1.5: Sottoclassificazione della classe 3 [7]

I veicoli HEV rientrano nella categoria di classe 3, si riporta in figura 1.3 il ciclo per la classe 3A. Il ciclo è suddiviso in quattro parti, corrispondenti a quattro velocità medie: low, medium, high e extra high. In ogni parte sono presenti varie fasi di guida: frenata, accelerazione e stop. Il tutto contribuisce al rendere il ciclo molto simile al reale profilo di guida quotidiano.

La procedura RDE invece non ha un ciclo di riferimento e misura le emissioni del veicolo effettuando il test su strada. Il dispositivo PEMS (Portable Emissions Measurement System) misura le emissioni  $\text{NO}_x$  e CO e successivamente calcola le emissioni di particolato. La prova richiede 90-120 minuti e verrà divisa in tre parti uguali, effettuando tre test: uno in città, uno fuori città e uno in autostrada.

### WLTC Classe 3A

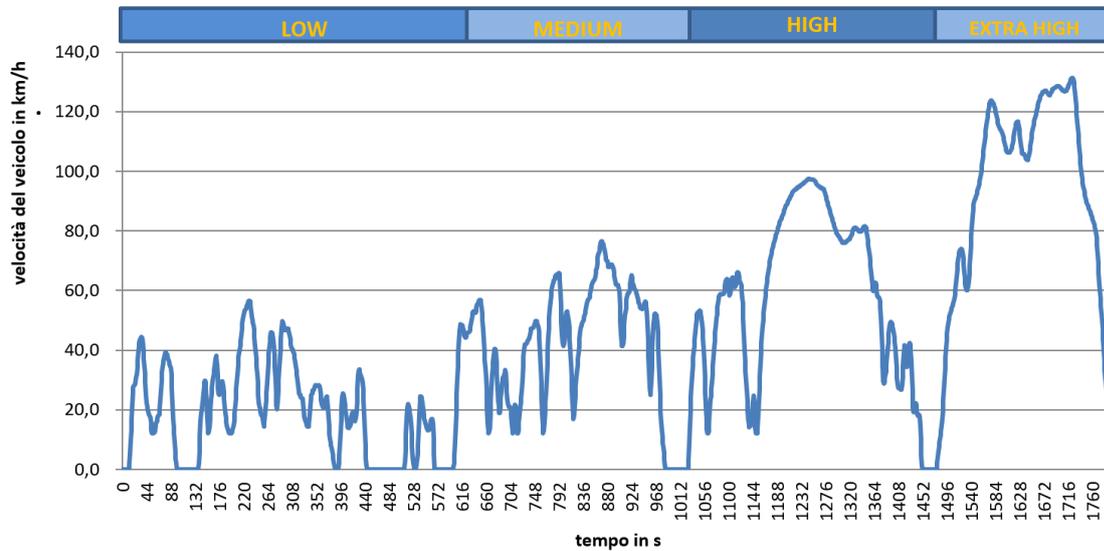


Figura 1.3: Ciclo omologativo WLTC per la classe 3A [7].

Un breve confronto fra il ciclo NEDC e WLTC è riportato in tabella 1.6.

	<b>NEDC</b>	<b>WLTP</b>
<b>CONDIZIONI INIZIALI</b>	freddo	freddo
<b>DURATA [S]</b>	1180	1800
<b>DISTANZA [KM]</b>	11.03	23.27
<b>FASI DI GUIDA</b>	2 fasi: 66% guida urbana e 34% guida extraurbana	4 fasi: 52% urbana e 48% non urbana
<b>VELOCITÀ MASSIMA [KM/H]</b>	120.0	131.3
<b>VELOCITÀ MEDIA [KM/H]</b>	33.6	46.5
<b>TEMPERATURA PROVE</b>	Misurazioni a 20-30 °C	Misurazione a 23 °C, valori CO <sub>2</sub> corretti a 14°C
<b>INFLUENZA DEGLI OPTIONAL</b>	Non si considerano	Sono presi in considerazioni
<b>ANDAMENTI DI GUIDA [%]</b>		
<b>FERMATA</b>	23.7	12.6
<b>GUIDA COSTANTE</b>	40.3	3.7
<b>ACCELERAZIONE</b>	20.9	43.8
<b>DECELERAZIONE</b>	15.1	39.9

Tabella 1.6: Confronto cicli omologativi NEDC e WLTP [8]

Per quanto riguarda gli heavy duty, le normative sono riportati in tabella 1.7 e 1.8. A differenza dei light duty, le prove per il controllo delle emissioni vengono effettuate solo sul motore su banco prova e non sull'intero veicolo mediante banco a rulli, inoltre i valori limite sono espressi in  $g/kWh$ . Esistono due test:

- Steady-State Testing, che viene applicato solo ai motori diesel;
- Transient Testing, che viene applicato sia ai motori diesel che ai motori a gas (accensione comandata PI).

Limiti d'emissioni Steady-State Testing								
	DATE	Test	CO	HC	NOx	PM	PN	fumi
			g/kWh					1/kWh
Euro I	1992( $\leq$ 85kW)	ECE R-49	4.5	1.1	8.0	0.612	-	-
	1992( $>$ 85kW)		4.5	1.1	8.0	0.36	-	-
Euro II	10.1996		4.0	1.1	7.0	0.25	-	-
	10.1998		4.0	1.1	7.0	0.15	-	-
Euro III	Solo EEV (10.1999)	ESC&ELR	1.5	0.25	2.0	0.02	-	0.15
	10.2000		2.1	0.66	5.0	0.10 0.13	-	0.8
Euro IV	10.2005		1.5	0.46	3.5	0.02	-	0.5
Euro V	10.2008		1.5	0.46	2.0	0.02	-	0.5
Euro VI	1.2013	WHSC	1.5	0.13	0.4	0.01	$8.0 \cdot 10^{11}$	-

Tabella 1.7: Normative per gli heavy duty possedenti motori diesel [28].

Limiti d'emissioni Transient Testing								
	DATE	Test	CO	NMHC	CH <sub>4</sub>	NOx	PM	PN
			g/kWh					
Euro III	Solo EEV (10.1999)	ETC	3.0	0.40	0.65	2.0	0.02	-
	10.2000		5.45	0.78	1.6	5.0	0.16	-
Euro IV	10.2005		4.0	0.55	1.1	3.5	0.03	-
Euro V	10.2008		4.	0.55	1.	2.0	003	-
Euro VI	1.2013	WHTC	4.0	0.16 <sup>d</sup>	0.5	0.46	0.01	$6.0 \cdot 10^{11}$

Tabella 1.8: Normative per gli heavy duty con motori diesel e a gas [28].

## 1.2. Emissioni di biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>)

Nel 1995 l'Europa adotta la prima strategia comunitaria per la riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> per le passenger cars. La strategia si basava sul volontario impegno dell'industria automobilistica nel ridurre l'emissioni, fornire maggiori informazioni ai consumatori ed infine tramite misure fiscali promuovere automobili che consumassero meno.

Nel 1998 l'associazione europea dei costruttori di auto decise di imporsi il limite di 140 gCO<sub>2</sub>/km entro il 2008. Tuttavia nel 2006 si era ancora ben lontani dal target auspicato, dunque la Commissione Europea, al fine di raggiungere l'obiettivo di 120 gCO<sub>2</sub>/km previsti per il 2012, adottò misure obbligatorie ed il 23 Aprile 2009 sulla Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea viene pubblicato il Regolamento (CE) N.443/2009 del Parlamento Europeo e del Consiglio. Il target imposto fu di 130 gCO<sub>2</sub>/km tramite miglioramenti apportati ai motori e una riduzione di ulteriori 10 gCO<sub>2</sub>/km utilizzando tecnologie alternative come: indicatori cambio marcia, bio-carburanti, indicatori di pressione gomme, etc.

Questi obblighi inizialmente (Gennaio 2012) sono stati applicati solo al 65% della flotta dei costruttori, aumentando la percentuale ogni anno fino ad applicarli all'intera flotta nel 2015.

Il calcolo dei gCO<sub>2</sub>/km non viene calcolato sul singolo veicolo, ma sulla media aritmetica dei veicoli venduti, infatti è il valore medio che deve rispettare i limiti. Il limite delle emissioni dipende dalla massa del veicolo, dunque si considera una curva di valore limite, in cui i veicoli più pesanti possono emettere emissioni più elevate a differenza dei veicoli più leggeri. In definitiva i costruttori possono produrre veicoli che non rispettino i limiti di emissioni a patto che producano altri veicoli capaci di bilanciare le emissioni dei primi.

Attualmente il nuovo target richiesto per quanto riguarda le passenger cars è 95 gCO<sub>2</sub>/km entro il 2021, quindi un consumo di circa 4.1 l/100 km per i veicoli a benzina e 3.6 l/100 km per i veicoli diesel. Per i veicoli commerciali leggeri il limite è passato da 175 gCO<sub>2</sub>/km entro il 2017 a 147 gCO<sub>2</sub>/km entro il 2020, ovvero un consumo di circa 5,5 l/100km per i veicoli diesel [9]. Per le emissioni dei veicoli heavy duty, invece, non sono stati imposti ancora dei limiti. Al momento le loro emissioni sono responsabili di circa il 6% delle emissioni totali di CO<sub>2</sub> in Europa, se non vengono adottate delle restrizioni, si andrà in contro ad una serie di problematiche [9]:

- un aumento del 9% entro il 2030 delle emissioni dei veicoli pesanti a causa dell'aumento delle attività di trasporto;
- nessun vantaggio in termini di consumi e costi, nonostante vi siano note tecnologie in grado di migliorare i consumi, ma tuttora non diffuse per questa categoria;
- la crescente pressione della concorrenza mondiale che già ha attuato norme per ridurre le emissioni, rischiando di rimanere indietro rispetto al resto del mondo.

Il 17 maggio del 2018 la Commissione Europea ha presentato la prima proposta legislativa per la riduzione delle emissioni dei nuovi heavy duty. Gli obiettivi fissati per le emissioni medie dei nuovi camion sono la riduzione del 15% delle emissioni nel 2025 rispetto al 2019 e una riduzione di almeno il 30% nel 2030 rispetto al 2019, anche se quest'ultimo obiettivo verrà rivisto nel 2022. Al momento si focalizza l'attenzione sulla riduzione delle emissioni per i veicoli pesanti con peso superiore a 7.5t in quanto rappresentano tra il 65% e il 70% delle emissioni totale della categoria, successivamente dopo il 2022 l'obiettivo auspicato è estendere la restrizione all'intera categoria. Le proposte adottate per i nuovi camion riguardano il regolamento sulla certificazione, monitoraggio e comunicazione sia delle emissioni di CO<sub>2</sub> sia del consumo di carburante. Si è stabilito che dall'1 Gennaio 2019 i costruttori di camion di peso superiore a 7,5 t dovranno controllare e comunicare annualmente alla Commissione Europea le emissioni di CO<sub>2</sub> e i consumi di ogni nuovo veicolo, utilizzando il software di simulazione

VECTO (Vehicle Energy Consumption Calculation Tool), sviluppato dalla collaborazione tra la Commissione Europea e gli stakeholders.

### 1.3. Veicoli ibridi

Una possibile soluzione alla riduzione delle emissioni inquinanti, al consumo del combustibile e alla riduzione della CO<sub>2</sub> è senz'altro il veicolo a propulsione ibrida. Come si è accennato all'inizio del capitolo, la tecnologia elettrica ibrida è la più matura e capace di competere con l'attuale mercato automotive. Si definisce veicolo elettrico ibrido un sistema di propulsione la cui potenza è fornita da due fonti di energia: combustibile e batteria.

I veicoli elettrici ibridi (HEVs) sono dotati sia del convenzionale motore termico sia di una o più macchine elettriche. La prima classificazione da fare si basa sul fattore di ibridizzazione ovvero la frazione della potenza del motore elettrico rispetto alla potenza totale installata, equazione 1.1.

$$HF = \frac{P_{EM}}{P_{EM} + P_{ICE}} \quad (1.1)$$

Nel caso di un veicolo elettrico puro il fattore di ibridizzazione è pari ad 1, nel caso di veicolo con solo motore endotermico è pari a zero. In base al fattore di ibridizzazione i veicoli si suddividono in *Micro hybrid*, *Soft hybrid*, *Mild hybrid*, *Full hybrid*, *Range Extender*, *Plug-in hybrid* [22].

#### ***Micro hybrid***

Il veicolo con il più basso fattore di ibridazione è il *Micro hybrid*. È dotato del sistema Start&Stop introdotto per la prima volta negli anni '90. Il sistema consente di spegnere il motore endotermico quando il veicolo è fermo, ad esempio nel caso in cui si è fermi al semaforo, consentendo successivamente un'accensione immediata. Questa tecnologia applicata alla guida urbana, permette di risparmiare fino al 15% della quota di carburante. Il motore elettrico ha una taglia di circa 2.5kW e la sua funzione è molto simile ad un semplice motorino di avviamento, inoltre non è in grado di recuperare energia in frenata.

#### ***Soft hybrid***

Il *Soft hybrid*, a differenza del *Micro hybrid*, permette due modalità di funzionamento: il recuperare di energia in frenata e ripartenza in modalità elettrica. La potenza della macchina elettrica e della batteria è di circa 5-7kW e questa tecnologia permette un risparmio di carburante quasi il doppio rispetto alla precedente.

#### ***Mild hybrid***

Il *Mild hybrid*, a differenza del *Soft hybrid* e del *Micro hybrid*, ha una architettura del veicolo totalmente diversa in quanto presenta un powertrain elettrico. Esso consente al veicolo di procedere per circa 10-20 km/h prima che il motore termico si avvii, permette l'utilizzo di una potenza nominale inferiore in fase di accelerazione in quanto è capace di assistere al motore termico. La macchina elettrica possiede una potenza di circa 15-20kW.

### ***Full hybrid***

I *veicoli full hybrid* hanno la capacità di utilizzare sia una propulsione termica che elettrica, l'unico limite è la dimensione ridotta della batteria che limita i chilometri di percorrenza consentiti dal solo utilizzo del powertrain elettrico. La batteria possiede una carica intermedia in modo da poter recuperare energia in frenata e fornire energia in caso si richiedano picchi di potenza.

### ***Range Extender***

I veicoli viaggiano in modalità elettrica e il motore termico ha il compito di ricaricare la batteria nel caso in cui la potenza diventasse insufficiente.

### ***Plug-in hybrid***

A differenza dei *Full hybrid* il powertrain elettrico ha maggiore autonomia grazie alla maggiore capacità di stoccaggio della batteria. Le batterie che si utilizzano di solito sono agli ioni di litio e la loro dimensione è inferiore rispetto alle batterie dei veicoli elettrici. I *plug-in hybrid* hanno la possibilità di ricaricare la batteria direttamente dalla rete elettrica, ma al momento gli svantaggi sono molteplici: tempi di ricarica della batteria superiori ai tempi di rifornimento del carburante, mancanza e difficoltà di creare infrastrutture per la ricarica elettrica distribuite in tutto il territorio ed elevati costi rispetto ad altre categorie di veicoli.

## **1.3.1. Configurazione veicoli ibridi**

Sono presenti diverse classificazioni per i veicoli elettrici ibridi (HEVs), la prima riguarda il posizionamento della macchina elettrica rispetto al motore termico, in quanto influisce sulle prestazioni. Si distinguono cinque posizionamenti della macchina elettrica, indicati con la sigla "P":

- P1f: il generatore elettrico è situato sul giro-cinghia del motore termico, la dimensione della macchina elettrica è limitata a causa dello spazio, limitando così anche la potenza massima e la coppia. Si hanno vantaggi per i consumi ma frenata rigenerativa poco efficiente.
- P1r: la macchina elettrica è montata all'uscita dell'albero motore, la dimensione assiale è ridotta e possiede una frenata rigenerativa più efficiente;
- P2: la macchina elettrica è posizionata all'ingresso del cambio, subito dopo la frizione, permettendo il disaccoppiamento del motore termico e consentendo una modalità di trazione pura elettrica. La dimensione assiale della macchina è limitata
- P3: il motore elettrico è posizionato all'uscita del cambio, garantendo una maggiore efficienza della frenata rigenerativa in quanto soltanto il differenziale è interposto tra macchina elettrica e ruote.
- P4: il motore elettrico è posizionato sul secondo asse ed è collegato alle ruote mediante un apposito differenziale. L'efficienza della frenata rigenerativa è elevata ed inoltre permette di recuperare l'energia in eccesso durante la fase di trazione, che sarà riutilizzata per ricaricare la batteria.

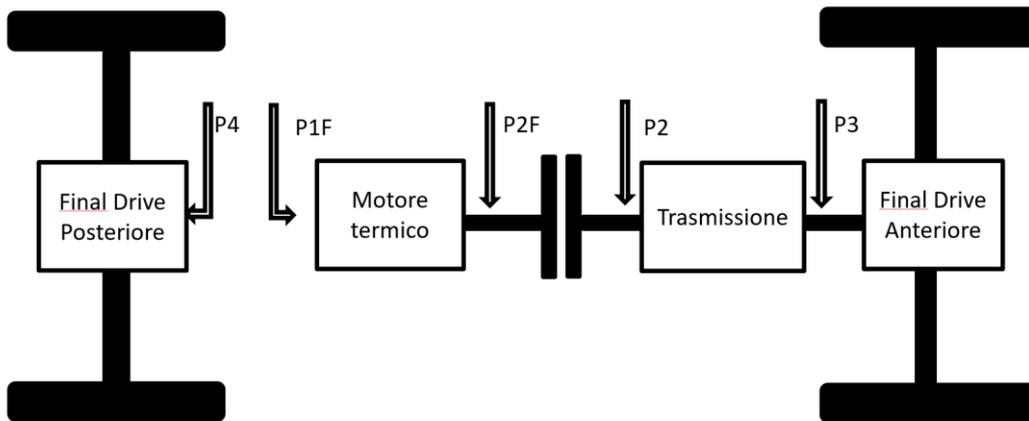


Figura 1.4: Possibili posizionamenti del motore elettrico in un veicolo HEV [11].

Oltre a questa distinzione, l'aspetto principale che distingue le varie architetture è la modalità di accoppiamento dei due powertrain. In generale le architetture si distinguono in: serie, parallelo, serie-parallelo e complesso.

### Architettura ibrido serie

Una schematizzazione dell'architettura ibrido serie è rappresentata in figura 1.5.

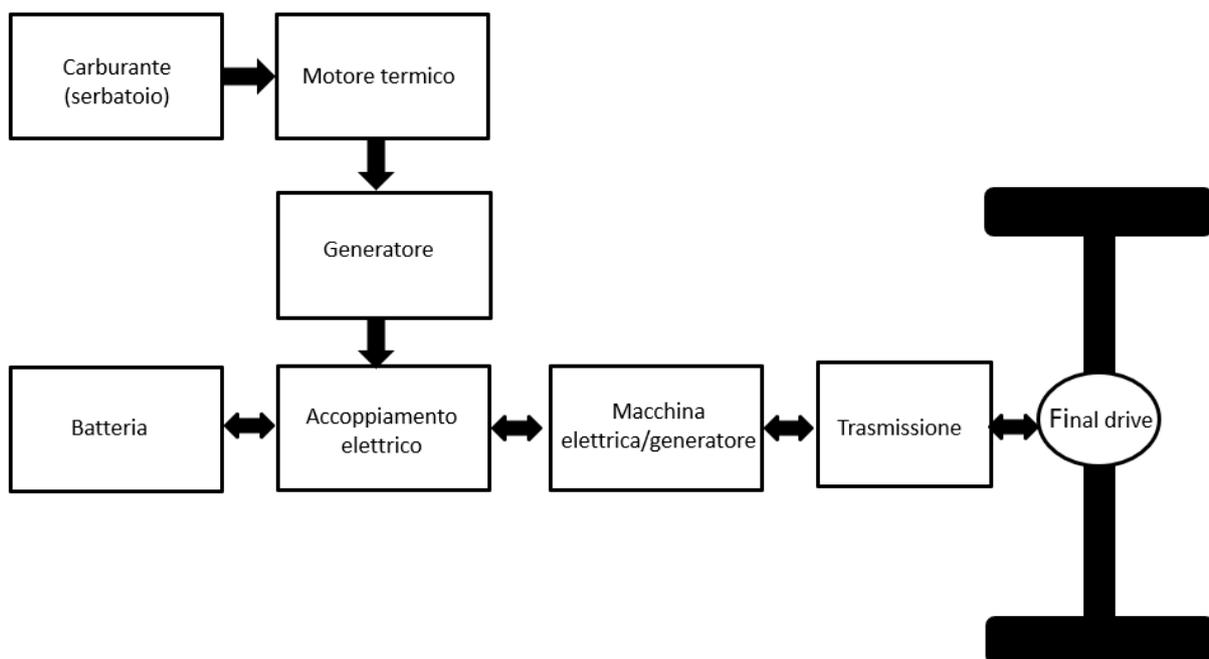


Figura 1.5: Schematizzazione dell'architettura ibrido serie.

La potenza per la propulsione è fornita esclusivamente dal motore elettrico, il motore termico non è collegato alle ruote. Questa architettura è molto simile al veicolo elettrico puro, ma con la differenza che a bordo è possibile effettuare la ricarica, infatti il motore termico ha il compito di azionare un generatore, la cui energia può alimentare direttamente il secondo powertrain (motore elettrico/generatore) o ricaricare la batteria. Nel caso in cui, durante la guida, vi è la necessità di maggiore energia, questa viene attinta sia della batteria che dal motore termico. Inoltre il secondo powertrain è collegato alle ruote per mezzo della trasmissione e durante la frenata è possibile recuperare energia. Per garantire il mutuo flusso di potenza tra la batteria, che opera a corrente continua, e il motore elettrico che opera in corrente alternata trifase, è necessario l'uso di inverter, raddrizzatori e convertitori (rappresentati in figura con il nome di "accoppiamento elettrico"). Il vantaggio di questa architettura è la possibilità di utilizzare trasmissioni semplici, dato che il motore elettrico ha la capacità di operare su ampi regimi di rotazione, ed inoltre il disaccoppiamento del motore termico alle ruote permette di stabilire la velocità del motore termico con cui si vuole lavorare, permettendo di fissare un numero di giri che consenta di lavorare alla massima efficienza. Lo svantaggio è l'utilizzo di due macchine elettriche che comporta un aumento dei costi, peso, ingombro e bassa efficienza del sistema, infatti l'energia meccanica del motore termico viene convertita due volte: nel primo powertrain l'energia meccanica viene convertita in elettrica dal generatore, nel secondo powertrain l'energia elettrica viene convertita in meccanica per la trazione, causando perdite di energia rispetto ad avere una trasmissione diretta.

Le possibili modalità di funzionamento dell'ibrido serie dipendono dall'integrazione dei due powertrain, le principali sono:

- Modalità puro elettrico: nel caso in cui non si abbia una elevata richiesta di potenza e la batteria è sufficientemente carica. In questo caso il motore termico verrà spento e la propulsione verrà effettuata solo dal motore elettrico alimentato dalla batteria. Questa modalità è indicata per i tragitti urbani, dove sono frequenti frenate e fermate.
- Modalità puro termico: l'energia elettrica prodotta dal primo powertrain verrà direttamente trasferita al motore elettrico. Questa modalità è utilizzata nei tragitti extraurbani e autostradali, dove si richiede una potenza continua.
- Modalità ibrida: il motore elettrico è alimentato sia dalla batteria che dal generatore. Questa situazione si verifica in caso di una manovra di sorpasso, dove è richiesta un'elevata potenza.
- Modalità di ricarica batteria: può avvenire sia a veicolo in moto che a veicolo fermo. Nel primo caso la potenza generata dal primo powertrain sarà utilizzata in parte per la propulsione e in parte per la ricarica della batteria. Nel secondo caso o l'intera potenza del motore termico viene utilizzata per carica la batteria oppure se siamo in presenza di un veicolo plug-in è possibile carica la batteria tramite la rete.
- Modalità frenata rigenerativa: il motore elettrico, in fase di frenata, funziona da generatore convertendo l'energia meccanica delle ruote in energia elettrica permettendo la ricarica della batteria.

In definitiva l'architettura ibrido serie è consigliata nei tragitti urbani, dove può fruttare al meglio il motore elettrico e sconsigliata nei tragitti extraurbani, dove un motore termico collegato direttamente alle ruote potrebbe essere più efficiente.

## Architettura ibrido parallelo

Una schematizzazione dell'architettura ibrido parallelo è rappresentata in figura 1.6.

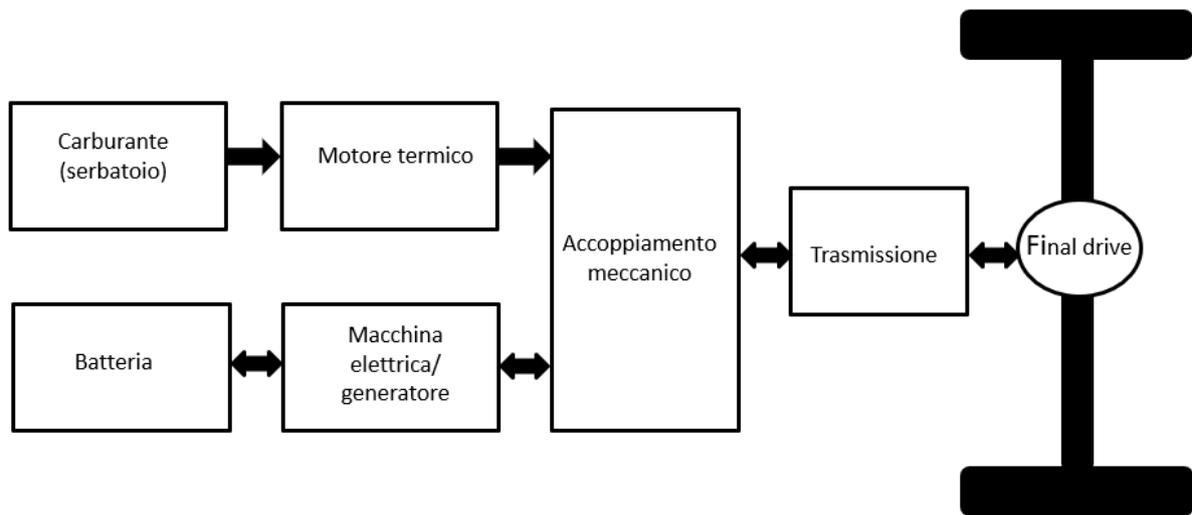


Figura 1.6: Schematizzazione dell'architettura ibrido parallelo

I due powertrain sono posti in parallelo, le potenze erogate dagli alberi del motore termico e del motore elettrico vengono accoppiate mediante dispositivi meccanici per poi essere trasferite alle ruote. Un vantaggio rispetto all'architettura ibrido serie è che la potenza del motore termico non viene convertita due volte, dunque essendo collegato direttamente alle ruote, evita le perdite di efficienza dovute al rendimento, inoltre l'assenza del generatore abbassa i costi del veicolo. Lo svantaggio è l'utilizzo di una trasmissione più complessa e la non possibilità di fissare il numero di giri del motore, in quanto è strettamente collegato alla velocità del veicolo tramite la trasmissione. Quindi l'architettura ibrida parallela è consigliata nel caso di guida in autostrada ed in tratti extraurbani, in modo che il motore termico possa lavorare in condizioni di ottimo rendimento.

Le modalità di funzionamento sono le stesse dei veicoli con architettura ibrida serie, a parte una leggera differenza in modalità ibrida. In questo caso il motore termico, di solito, fornisce maggior potenza per la propulsione mentre il motore elettrico si occupa di gestire i picchi di potenza in fase di partenza, accelerazione e velocità massima.

## Architettura ibrido serie-parallelo

Una schematizzazione dell'architettura ibrido mista è rappresentata in figura 1.7.

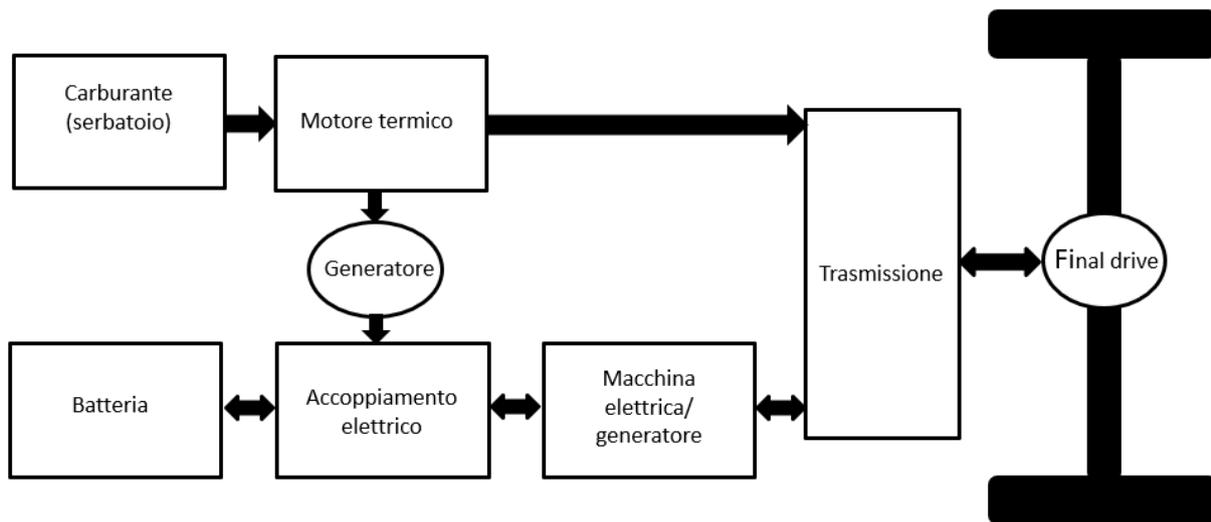


Figura 1.7: Schematizzazione dell'architettura ibrido serie-parallelo

A differenza delle architetture precedenti, l'architettura ibrida serie-parallelo, possiede sia le caratteristiche dell'architettura parallela che dell'architettura serie, permettendo di lavorare in modo ottimale in base alle necessità richieste. Il layout presenta un doppio accoppiamento di potenza, il convertitore di potenza che si occupa della potenza elettrica fornita dalle due macchine elettriche e la trasmissione che si occupa della potenza meccanica, fornita dal motore elettrico e motore termico. Le modalità di funzionamento sono le seguenti:

- Modalità puro elettrico: il motore termico è spento e si utilizza solo l'energia fornita dalla macchina elettrica per permettere la propulsione al veicolo.
- Modalità puro termico: la potenza fornita dal motore termico viene trasmessa, attraverso la trasmissione e il differenziale, direttamente alle ruote.
- Modalità ibrida serie: l'energia del motore termico viene fornita al generatore per caricare la batteria, invece la trazione è garantita solo dal motore elettrico.
- Modalità ibrido parallelo: entrambi i motori, termico ed elettrico, vengono utilizzati per la trazione. L'energia del primo viene fornita sia alla trasmissione per la trazione che al generatore per caricare la batteria, mentre il contributo del secondo si somma al primo nella trasmissione per fornire l'energia necessaria per la trazione.

Anche per l'architettura ibrido serie-parallelo è presente la modalità di frenata rigenerativa, dove le macchine elettriche durante la fase di frenata inverte il suo funzionamento, diventando generatore permettendo la ricarica della batteria.

## Architettura ibrido complesso

Uno schema dell'architettura ibrido complesso è illustrato in figura 1.8.

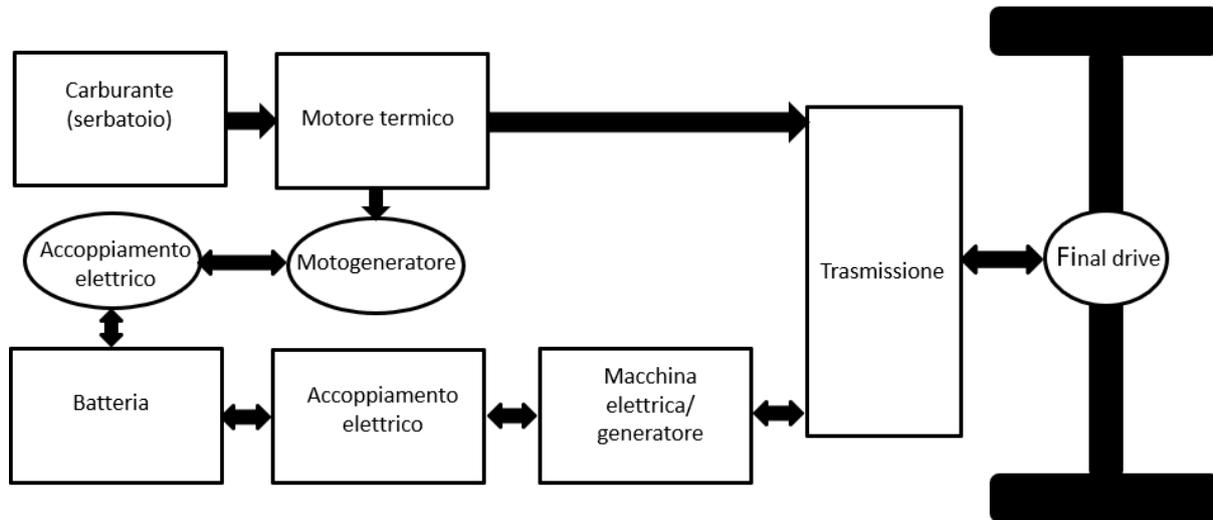


Figura 1.8: Schematizzazione dell'architettura ibrido complesso.

La differenza dell'architettura ibrido complesso rispetto all'ibrido serie-parallelo è la presenza del motogeneratore, anziché del semplice generatore. Il motogeneratore ha la capacità non solo di caricare la batteria e quindi funzionare come un tradizionale generatore, ma può anche contribuire alla trazione fornendo energia. Infatti durante la modalità puro elettrica, l'energia per la propulsione può essere fornita non solo dalla macchina elettrica ma anche dal motogeneratore, le altre modalità di funzionamento sono uguali per l'ibrido serie-parallelo. L'architettura è un po' più complessa e presenta un secondo convertitore per il motogeneratore.

## 2. Design of Experiment

Il lavoro tesi consiste nell'applicazione della tecnica statistica Design of Experiment, al fine di ottimizzare il design di un heavy duty hybrid vehicle con l'obiettivo di minimizzare la CO<sub>2</sub>. Tale approccio è molto utile per le fasi di design, in quanto i tempi di processo vengono ridotti notevolmente. Il Tool utilizzato è MBC model, un tool di Matlab.

### 2.1. Breve storia della tecnica DOE

L'origine della progettazione statistica risale intorno al 1920 a Londra, grazie allo scienziato inglese Sir Ronald A. Fisher, responsabile in quel tempo della statistica e dell'analisi dei dati alla Rothamsted Agricultural Experimental Station. Fisher si accorse che gli errori nell'esecuzioni dell'esperimento, durante la generazione dei dati, compromettevano l'analisi statistica dei dati del sistema. Collaborando con vari studiosi di diversi settori sviluppò l'approccio ed i principi dell'indagine sperimentale programmata: casualizzazione, replicazione ed uso dei blocchi. Inoltre introdusse il concetto di pianificazione fattoriale e analisi della varianza.

Inizialmente la progettazione statistica si diffuse in agronomia e nelle scienze biologiche e durante i primi anni '30 si iniziò ad applicarla in ambito industriale. Successivamente grazie a Box e Wilson si sviluppò la metodologia delle superfici di risposta e nacquero altre tecniche di pianificazione sperimentale che vennero diffuse tra le industrie di processo e chimiche. La progettazione statistica, nonostante tutto, non era ancora ampiamente diffusa in particolare nei processi produttivi e nel settore delle fabbriche, a causa della scarsa preparazione da parte di ingegneri e specialisti di processo, inoltre non vi erano software statistici in grado di supportare tale tecnica. Alla fine degli anni '70, l'ingegnere giapponese Genichi Taguchi si concentrò sull'uso pratico della tecnica, anziché sulla complessa teoria matematica che la caratterizzava, sostenendo la progettazione robusta dei parametri e proponendo l'uso di piani fattoriali frazionati e matrici ortogonali. Le sue strategie sperimentali e i suoi metodi d'analisi vennero messi in discussione da esperti del settore, ma nonostante tutto, grazie a Taguchi e alle polemiche sorte, l'interesse per gli esperimenti programmati si diffuse ancor di più, trovando largo impiego in ambito automobilistico, aerospaziale, e in varia ambiti dell'industria [12].

### 2.2. Principi base

Con il termine Design of experiment (DoE) si intende una serie di esperimenti da eseguire e analizzare. L'obiettivo è ottimizzare un processo o un sistema, traendo conclusioni dal suo comportamento. Si potrebbe paragonare la tecnica DoE alla ricetta di un dolce, è un esempio pratico e immediato che consente di capire quanto sia importante tale tecnica. In una ricetta è fondamentale rispettare le dosi degli ingredienti per la buona riuscita, così la tecnica DoE è lo strumento in grado di trovare in breve tempo le giuste quantità di ogni ingrediente, garantendo la buona riuscita del dolce.

L'applicazione della tecnica richiede l'attenzione di due variabili: i fattori e le risposte. Le risposte sono le informazioni, gli output dell'analisi, che si andranno a studiare. I fattori sono le variabili che determinano e influiscono sulle risposte.

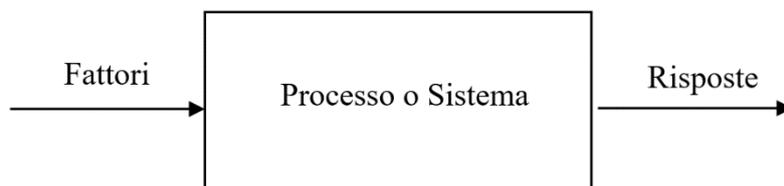


Figura 2.1: Schema del processo o sistema

La tecnica DoE, a differenza dell'approccio intuitivo che basa la ricerca dell'ottimo cambiando sequenzialmente ogni singola variabile, cambia tutti i fattori simultaneamente consentendo di trovare la soluzione ottimale velocemente.

Il concetto base è una distribuzione simmetrica degli esperimenti intorno ad un punto centrale. Si stabilisce un range per ogni fattore, si calcola il punto centrale e si crea la distribuzione simmetrica.

La figura 2.2 mette a confronto il metodo tradizionale COST (Change Only one Separate factor at a Time) e l'approccio DoE.

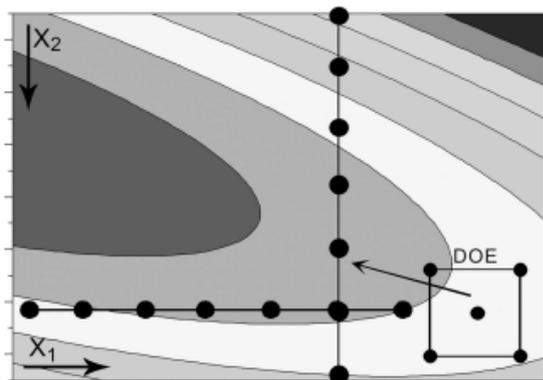


Figura 2.2: Confronto tra il metodo tradizionale e il metodo DoE [13].

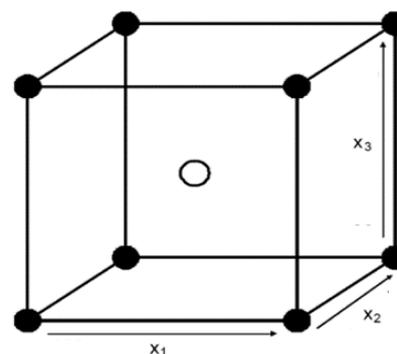


Figura 2.3: Esempio tecnica DoE [13]

Nel metodo tradizionale l'esperimentatore non sa quale valore di  $X_1$  o  $X_2$  cambiare, va a tentativi, cambiando il loro valore uno per volta. DoE invece crea una distribuzione simmetrica di esperimenti intorno al punto centrale, cambiando simultaneamente tutti i fattori, delineando una direzione che consente di ottenere risultati migliori. Come mostrato in figura 2.3, dati i seguenti fattori  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  i cui range sono rispettivamente 300-500, 60-110 e 60-110, la tecnica DoE calcolerà il punto centrale di coordinate (400,85,85) e distribuirà tutti gli esperimenti intorno a quel punto [13].

### Fasi generali della pianificazione degli esperimenti

La pianificazione degli esperimenti si articola in sei fasi:

- 1° Riconoscimento e formulazione del problema.
- 2° Scelta di fattori, livelli ed intervalli.
- 3° Scelta delle variabili di risposta
- 4° Scelta del piano sperimentale.

- 5° Esecuzione dell'esperimento.
- 6° Analisi statistica dei dati.
- 7° Conclusioni

Le prime tre fasi possono essere invertite. Prima di utilizzare l'approccio statistico è fondamentale stabilire l'obiettivo dell'investigazione, capire come raccogliere i dati e come analizzarli. Durante la prima fase è consigliabile che le varie aree del progetto collaborino insieme, in quanto una buona pianificazione è garantita se si ha un'idea chiara del problema e una conoscenza completa dei vari obiettivi da raggiungere. È bene che tutti i componenti del team si confrontino e condividano le rispettive conoscenze.

È importante individuare l'obiettivo generale:

- Screening: utilizzato nelle fasi iniziali di un nuovo processo o sistema dove si vogliono determinare i fattori principali che influiscono sulle risposte;
- Ottimizzazione: utilizzato in un sistema già avviato. Ha il compito di fornire informazioni dettagliate sui fattori e su come essi influenzano le risposte, permettendo di ottimizzarle;
- Esplorazione: utilizzato per studiare l'influenza di nuovi fattori sulle risposte;
- Stabilità: pone l'attenzione su come modificare i fattori in modo che piccole fluttuazioni non modificano le risposte.

La seconda fase riguarda la scelta dei fattori che influenzano il problema, essi si suddividono in due categorie: fattori di progetto e fattori di disturbo.

I primi si suddividono a loro volta in:

- *fattori di progetto*: sono di principale interesse, sono i fattori che effettivamente si è interessati a studiare perché influiscono sulle risposte;
- *fattori tenuti costanti*: potrebbero causare qualche variazione della risposta ma non sono interessanti per lo studio, quindi si preferisce tenerli costanti;
- *fattori lasciati variare*: sono le unità sperimentali e le "materie prime" in quanto le diverse combinazioni non sono omogenee, di solito questi fattori sono scelti in modo casuale.

I fattori di disturbo invece si suddividono in:

- *fattori controllabili*: quando l'esperimentatore può decidere i livelli, per esempio può decidere i giorni della settimana quando eseguire le prove;
- *fattori non controllabili*: quando l'esperimentatore non può controllarli, ma solo misurarli. In tal caso si può eseguire un'analisi della covarianza per compensare i loro effetti;
- *fattori di rumore*: quando l'esperimentatore non può controllarli nel processo, ma solo durante la fase sperimentale. In tal caso esso proverà una combinazione di fattori controllabili che siano in grado di minimizzare il più possibile l'influenza dei fattori di rumore (metodo della progettazione robusta).

Scelti i fattori si sceglieranno i range entro cui verranno fatti variare e i vari livelli.

La terza fase riguarda la scelta della variabile di risposta, che dovrà essere in grado di fornire informazioni utili allo studio.

Queste prime fasi riguardano la pianificazione pre-sperimentale e, se ben condotte, le fasi successive saranno semplici da svolgere e daranno buoni risultati.

La scelta del piano sperimentale, quarta fase, dipende dal numero di repliche che si vogliono eseguire, dall'ordine delle prove, dalla presenza o meno di restrizioni per la casualizzazione o dalla scelta o meno di lavorare a blocchi.

Per quanto riguarda l'esecuzione dell'esperimento è bene condurre delle prove prima dell'esperimento principale, in modo da assicurarsi che tutto sia sotto controllo, in caso contrario si ricontrollano le prime quattro fasi.

La sesta fase riguarda l'analisi dei dati in cui vengano utilizzati metodi statistici per analizzare in modo oggettivo il sistema. A volte bastano semplicemente metodi grafici per interpretare i dati, altre volte è preferibile utilizzare modelli empirici, ovvero ricavare un'equazione dai dati che metta in relazione le risposte con i fattori più influenti. Altre due tecniche molto diffuse sono: l'analisi dei residui e il controllo sull'adeguatezza del modello.

È bene ricordare che i metodi statistici non dimostrano se diversi fattori o un fattore in particolare influisce sulla risposta, essi permettono solamente di calcolare l'errore nel risultato finale e dare un grado di fiducia riguardo la conclusione presa.

Infine dopo aver analizzato i dati lo sperimentatore deve stabilire come procedere ed eseguire delle prove per controllare e confermare le sue conclusioni [12].

### 2.3. Tecniche di pianificazione DoE

Le principali tecniche usate sono raggruppate in tre stili di progettazione: *Classical*, *Optimal*, *Space-filling*. Prima di analizzare i vari stili è bene soffermarci sui principi base che caratterizzano la tecnica DoE: replicazione, casualizzazione ed esecuzione a blocchi. Questi tre principi permettono di avere una attendibilità statistica.

Per replicazione si intende la possibilità: di ripetere l'esperimento utilizzando gli stessi input affinché si ottenga un risultato più accurato e di stimare l'errore sperimentale. La casualizzazione permette di eseguire gli esperimenti in ordine casuale, ogni prova è indipendente dal precedente e dal successivo, evitando gli errori sistematici. Infine l'esecuzione a blocchi migliora la precisione, raggruppando gli esperimenti per fattori simili, riducendo le sorgenti di variabilità.

#### 2.3.1. Classical Designs

Questo stile di progettazione è molto diffuso e affidabile nel caso in cui le regioni sperimentali da studiare siano regolari e facili da gestire, come ipercubi e sfere. I piani sperimentali più diffusi sono: *Full Factorial*, *Fractional Factorial*, *Central Composite*, *Box-Behnken*, *Plackett-Burman*.

##### **Piano Full factorial**

È il piano più diffuso e intuitivo. È chiamato "*Full*" perché nell'investigazione include l'intero cubo, compresi tutti gli angoli. Una caratteristica molto importante di questo metodo è l'efficienza nell'utilizzo dei dati sperimentali e l'elevata capacità di analizzare due o più fattori. Si parlerà di famiglia di piani fattoriali quando l'indagine dei fattori è svolta con lo stesso numero di livelli, se  $L$  indicano i livelli e  $k$  i fattori,  $L^k$  sarà il numero di prove necessaria per caratterizzare il problema in modo completo.

In figura 2.4 sono riportati alcuni esempi della struttura di piano full factorial.

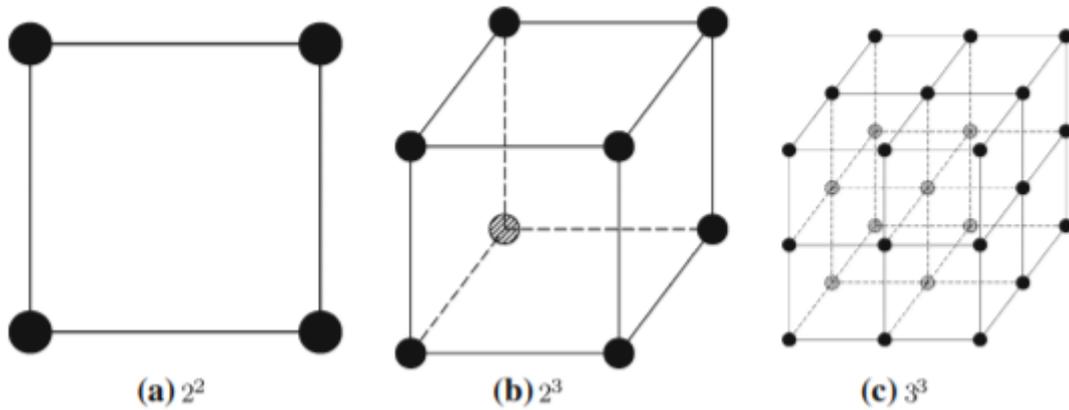


Figura 2.4: Esempi di piano fattoriale full designs [14]

La figura (a) rappresenta la struttura di piano fattoriale avente 2 livelli e 2 fattori, la figura (b) rappresenta il piano avente 2 livelli e 3 fattori, infine la figura (c) rappresenta un piano avente 3 livelli e 3 fattori. Il piano verrà rappresentato:

- Per  $k=2$  come un quadrato,
- Per  $k=3$  come un cubo,
- Per  $k>3$  come un ipercubo in uno spazio  $k$ -dimensionale.

### Piano Fractional Factorial

Aumentando il numero dei fattori, le prove necessarie per l'analisi potrebbero diventare eccessive da sostenere, quindi qualora l'esperimentatore si renda conto che qualche fattore di ordine superiore possa essere trascurato, si può optare per l'utilizzo del piano *Fractional Factorial* che considera un sottoinsieme (subset) degli esperimenti del *full fractional*. Il subset può essere metà, un quarto, e così via, delle prove previste per il *full fractional*. Questi piani sono di largo impiego sia nell'ambito della progettazione che nel miglioramento dei processi.

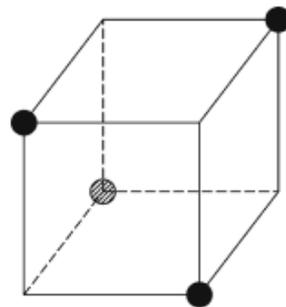


Figura 2.5: Esempio di piano Fractional Factorial [14]

Un esempio del piano *Fractional factorial* è riportato in figura 2.5, in questo caso siamo in presenza di un piano fattoriale avente due livelli e tre fattori, ma solo quattro dei possibili otto punti sono investigati.

### Piano Central Composite

Il piano Central Composite è un  $2^k$  *full factorial* al quale si aggiunge il punto centrale e gli star points. Gli star points sono dei punti di campionamento, i quali sono settati al loro livello medio tranne uno. Quest'ultimo è settato dalla distanza dal punto centrale. Se la distanza tra ogni punto del full factorial e il punto centrale è normalizzata ad 1, si può scegliere la distanza degli star points dal punto centrale in differenti modi ed in base a dove si collocano, cambia la tipologia del piano Central Composite:

#### *Central composite circumscribed (CCC)*

La distanza degli star points è uguale ad 1, ovvero stanno alla stessa distanza del punto centrale rispetto ai punti del full factorial, tutti i punti di campionamento sono posizionati su una ipersfera con centro nel punto centrale. Il piano richiede per ogni fattore cinque livelli.

#### *Central Composite Faced (CCF)*

La distanza degli star points è impostata  $\frac{\sqrt{k}}{k}$ , essi saranno posizionati sulla faccia del quadrato, cubo o ipercubo del full factorial. Richiede per ogni fattore tre livelli.

#### *Central Composite Inscribed (CCI)*

Si ha un campionamento come il piano CCC ma senza violare i limiti dei livelli, il piano CCC verrà ridimensionato in modo che tutti i punti di campionamento siano distanti  $\frac{\sqrt{k}}{k}$  dal punto centrale. Richiede cinque livelli per ogni fattore.

#### *Central Composite Scaled (CCS)*

Se si stabilisce che gli star points siano all'interno dell'ipersfera, fuori dall'ipersfera o dentro la regione di progettazione. Il piano richiede cinque livelli per ogni fattore.

In definitiva per quanto riguarda i piani Central Composite, con  $k$  parametri, il dimensionamento dei campioni sarà dato dalla somma  $2^k + 2k + 1$ , dove  $2^k$  indica il piano full factorial,  $2k$  indicano gli star points e 1 il un punto centrale.

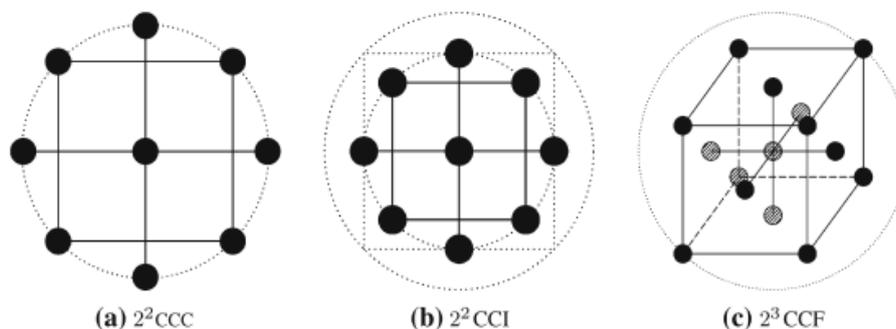


Figura 2.6: Esempio di differenti piani Central Composite [14]

### Box-Behnken

Box-Behnken è la combinazione di fattoriali  $2^k$  con piani a blocchi incompleti. Vengono usati per limitare la dimensione dei campioni che aumenterebbe all'aumentare del numero dei parametri [14]. La dimensione di campionamento è sufficiente per stimare i coefficienti di secondo grado dei minimi quadrati del polinomio. Box-Behnken ripete un blocco di campioni di due livelli fattoriali su diversi gruppi di parametri e i parametri non inclusi nella progettazione fattoriale rimangono al loro livello principale, quest'ultimi verranno indicati con il valore 0. Sia la dimensione dei campioni che il numero dei blocchi dipendono dal numero di parametri scelto in modo da rispettare il criterio di ruotabilità. Un piano sperimentale è ruotabile se la varianza delle risposte in ogni punto  $x$ , dipende solo dalla distanza del punto  $x$  al punto centrale. Un esempio di Box-Behnken a tre variabili è mostrato in tabella 2.1 e la sua rappresentazione in figura 2.7.

Prova	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

Tabella 2.1: Esempio di Box-Behnken [12]

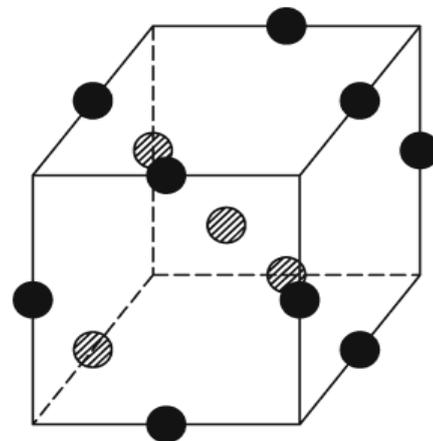


Figura 2.7: Piano Box-Behnken[14]

Il piano Box-Behnken è un piano sferico di raggio  $\sqrt{2}$ . Si nota che il piano non possiede nessun punto sugli angoli e i campioni si trovano sul punto medio dei bordi dello spazio e nel centro. Ciò è un vantaggio nel caso in cui i vertici del cubo rappresentassero combinazioni impossibili da realizzare dovuti a limiti fisici o costose combinazioni dei livelli dei fattori.

### Plackett-Burman

Questo piano è molto economico in quanto le prove effettuate sono poche. È un piano fattoriale frazionario a due livelli e per utilizzarlo la dimensione del campione deve essere un multiplo di 4 fino a 36, consente di studiare  $k=N-1$  variabili. A volte questo tipo di piani vengono denominati "non geometrici" perché non sono rappresentabili tramite cubi.

Riportiamo in tabella 2.2 i segni usati per la costruzione dei piani Plackett-Burmann con  $N=12,20,24,36$ .

k	N	Plackett-Burman pattern
11	12	+ + - + + + - - - + -
19	20	+ + - - + + + + - + - + - - - - + + -
23	24	+ + + + + - + - + + - - + + - - + - + - - - -
35	36	- + - + + + - - - + + + + + - + + + - - + - - - - + - + - + + - - + -

Tabella 2.2: Segni utilizzati per i piani Plackett-Burman [12]

In tabella 2.3 si riporta un esempio per ottenere i piani Plackett-Burman, in questo caso N=12 e k=11.

In colonna si scrive la riga dei segni corrispondenti a N=12 e k=11, successivamente la seconda colonna è ottenuta dalla prima spostandosi di una posizione, in modo tale che l'ultimo elemento della prima colonna diventi il primo della seconda colonna e il primo elemento della prima colonna diventi il secondo della seconda colonna, e così via per le seguenti k colonne.

Infine per completare il piano si pone un segno meno nell'ultima riga.

Prova	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	+
2	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-
3	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+
4	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+
5	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+
6	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-
7	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-
8	-	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-
9	-	-	-	+	+	+	-	+	+	-	+
10	+	-	-	-	+	+	+	-	+	+	-
11	-	+	-	-	-	+	+	+	-	+	+
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabella 2.3: Esempio per ottenere un piano Plackett-Burman [12]

Questi piani sono consigliati per progetti di screening, dove si vuole investigare sugli effetti principali.

### 2.3.2. Optimal designs

Questa tecnica è tra le migliori nel caso in cui si abbia una profonda conoscenza del sistema ed i vincoli siano ben compresi, a differenza delle altre tecniche che in presenza di vincoli potrebbero fallire. Inoltre si usa quando:

- si è in presenza di una regione sperimentale irregolare;

- il modello scelto dall'espérimentatore non è un modello standard;
- si vuole ridurre il numero di prove.

Diversi programmi per calcolatore sono in grado di costruire questi piani.

Come esempio in figura 2.8 si riporta una regione sperimentale irregolare e si ipotizzi che sia la regione da studiare. Si potrebbe procedere in due modi: restringendo l'area fino ad ottenere una forma quadratica, ma questo potrebbe alternare l'indagine, oppure si potrebbe utilizzare la tecnica *Optimal Design* utilizzando un calcolatore.

Se si procede con il secondo approccio, l'algoritmo sceglierà due punti sul bordo dei vincoli aumentando il numero di prove, ma sarà una procedura necessaria per studiare la regione ristretta.

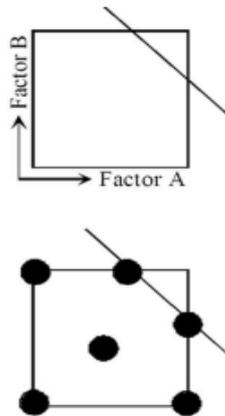


Figure 2.8: Esempio su come gestire una regione sperimentale irregolare [13]

In generale i passi per la costruzione del piano sono i seguenti:

- Definire il modello;
- Stabilire la regione di interesse;
- Scegliere il numero di prove da eseguire;
- Specificare quale criterio d'ottimalità utilizzare;
- Scegliere da un insieme di punti candidati, i punti del piano che si potrebbero utilizzare.

In generale questo metodo è iterativo e potrebbe eseguire calcoli onerosi che richiederebbero tempo per completare le operazioni. Ad esempio se abbiamo  $k$  parametri e per ogni parametro si hanno  $L$  livelli, il numero di possibili combinazioni sarà:  $\frac{L^k N}{N!}$ . Per questo motivo vengono utilizzati degli algoritmi per ottimizzare la ricerca, infatti l'algoritmo dopo un certo numero di iterazioni interromperà la procedura: quando si supera il numero massimo di iterazioni o quando per un certo numero di iterazioni non si è verificato un cambiamento apprezzabile del valore ottimale.

All'aumentare del numero dei fattori è preferibile utilizzare i piani *Optimal* rispetto ai piani *Full Factorial* e *Fractional Factorial*, in quanto le prove necessarie sono inferiori, si riporta qualche esempio in tabella 2.4.

N° Factor	Full Factorial	Fractional Factorial	Optimal
5	32	16	16
6	64	32	28
7	128	64	35
8	256	64	43
9	512	128	52

Tabella 2.4: Esempio di prove richieste per i rispettivi piani [13].

### 2.3.2.1. Criteri di ottimalità

#### D-Optimality

È il criterio più usato, il suo scopo è minimizzare  $|(X'X)^{-1}|$ . Tale piano minimizza il volume della regione di confidenza congiunta per il vettore dei coefficienti di regressione.

Secondo il criterio  $D$  potremmo mettere a confronto due piani e calcolare l'efficienza relativa di un piano rispetto ad un altro [13].

$$D_e = \left( \frac{|(X_2'X_2)^{-1}|}{|(X_1'X_1)^{-1}|} \right)^{1/p} \quad (2.1)$$

$X_1$  e  $X_2$  indicano le matrici  $X$  dei due piani, mentre  $p$  indica il numero di parametri del modello.

#### A-Optimality

È un criterio raramente usato per la difficoltà computazionale nell'aggiornare il processo. Lo scopo di tale criterio è minimizzare la traccia della matrice di dispersione  $(X'X)^{-1}$ , minimizza la somma delle varianze dei coefficienti di regressione [13].

$$A_e = \text{trace}((X'X)^{-1}) \quad (2.2)$$

#### G-optimality

Ha lo scopo di minimizzare la massima varianza di previsione nella regione del piano. Ovvero se con  $N$  si indicano i punti del piano, il massimo valore di  $NV[\hat{y}(x)]/\sigma^2$  è un minimo nella regione del piano [13].

La G-efficienza di un piano è calcolata nel seguente modo:

$$G_e = \frac{p}{\max \frac{NV[\hat{y}(x)]}{\sigma^2}} \quad (2.3)$$

Indicando con  $p$  i parametri.

#### V-optimality

V-optimality minimizza la varianza media di previsione in un insieme di punti scelti nella regione del piano, che possono essere:

- i punti candidati utilizzati per scegliere il piano;
- punti di importanza per l'esperimentatore.

È calcolata nel seguente modo:

$$V = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i' * (X_c' X_c)^{-1} * x_i \quad (2.4)$$

Indicando con  $n$  il numero dei punti candidati, con  $X_c$  la matrice di regressione dei punti, e con  $x_i$  il vettore che descrive il singolo esperimento, la riga della matrice di regressione.

### 2.3.3. Space Filling

La tecnica *Space Filling* si utilizza quando:

- si ha una scarsa conoscenza del sistema, ovvero non si conoscono gli effetti dei fattori sulle risposte;
- i vincoli sono incerti;
- non si conosce la forma del modello e si pensa che informazioni utili si potrebbero ricavare in differenti regioni del piano sperimentale.

La tecnica distribuisce i punti di progettazione in modo uniforme in tutta la regione di studio  $n$ -dimensionale, permettendo di massimizzare velocemente il range dei fattori. I punti di progettazione non dipendono dal numero dei fattori. Tale tecnica è appropriata per i modelli informatici deterministici ed anche una singola prova è in grado di fornire informazioni utili [16]. I piani sperimentali relativi a tale tecnica sono descritti in seguito.

#### Latin Hypercube Sampling (LHS)

È il primo piano di Space filling proposto da McKay, Conover e Beckman nel 1979. Per  $n$  run e  $k$  fattori, si crea una matrice  $n \times k$  dove ogni colonna è una permutazione casuale degli  $n$  livelli. In figura 2.9 si riporta un esempio di piano LHS.

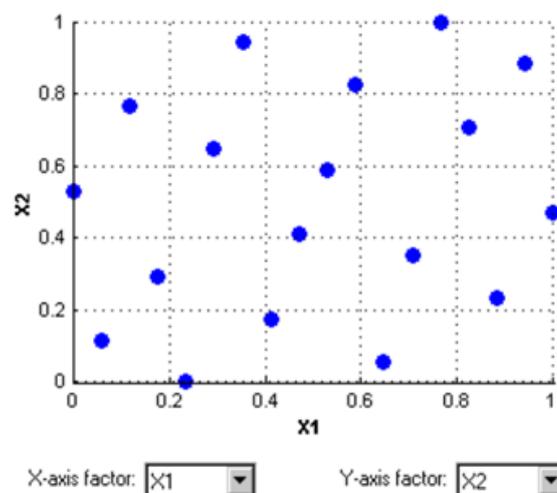


Figura 2.9: Esempio di un piano LHS [18].

## Lattice

Il piano sperimentale Lattice fornisce N punti per ogni N livelli dei fattori, inoltre i punti non sono generati casualmente ma si utilizzerà un algoritmo che sceglierà un numero primo per ogni fattore. Una buona scelta dei numeri primi è fondamentale, perché permette di distribuire i punti in modo uniforme all'interno dello spazio di progettazione, in caso contrario nella proiezione del progetto si vedranno linee o piani. Nel caso di poche prove e pochi punti, in relazione al numero dei fattori, si preferisce usare i modelli LHS, per evitare di creare piani o linee. In figura 2.10 si riporta un esempio per chiarire l'importanza della scelta dei numeri primi, pur considerando lo stesso numero di punti campione. Nel piano di sinistra è stata effettuata un'ottima scelta di numeri primi, infatti i punti sono ben distribuiti nello spazio, mentre nel piano di destra no.

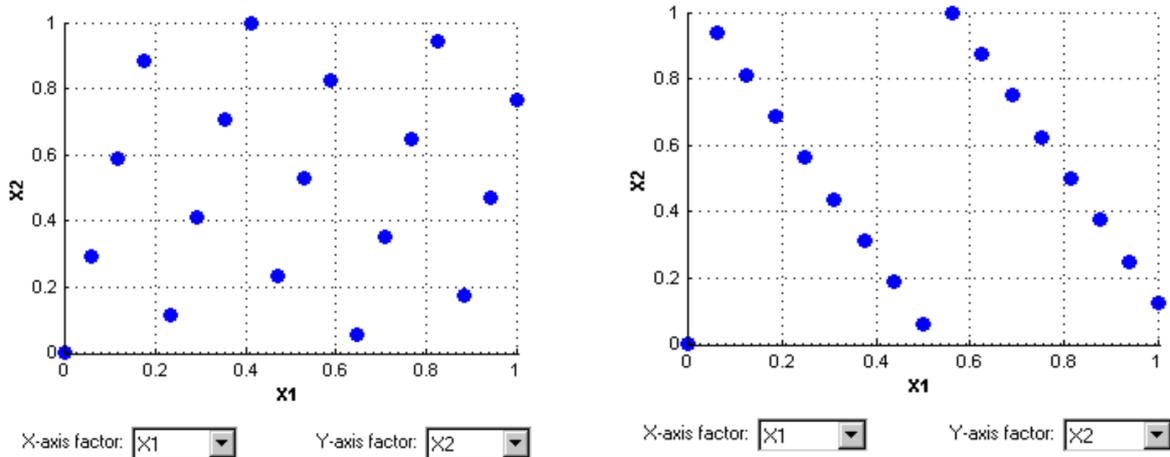


Figura 2.10: Confronto tra due piani Lattice, per mostrare l'importanza della scelta dei numeri primi [18]

## Stratified Latin Hypercube

Il piano Stratified Latin Hypercube divide l'ipercubo in N differenti livelli in base ai fattori stabiliti dall'esperimentatore. È utile quando:

- il numero dei livelli dei fattori è noto;
- alcuni fattori devono essere eseguiti solo a determinati livelli;
- si vuole modellare il comportamento di qualche fattore.

## Halton sequence e Sobol sequence

Entrambi i piani si basano sulla generazione di numeri pseudo-casuali. Sono caratterizzati da bassa discrepanza, ovvero più i punti sono distribuiti nello spazio uniformemente e più il valore della discrepanza diminuisce, il loro limite superiore di errore è dell'ordine di  $\frac{(\log M)^s}{M}$ , dove M è il numero delle simulazioni ed s il numero delle dimensioni, generando sull'intervallo (0,1) numeri uniformemente distribuiti [16]. Si utilizza la sequenza monodimensionale Van de Corput, il cui intervallo di interesse è [0,1) → [0,1).

Si ipotizza di voler ottenere l'elemento n-esimo della sequenza Van de Corput di base b, gli steps da eseguire sono i seguenti:

1) Il numero  $n$  in base decimale è espresso in base  $b$  nel seguente modo:

$$n = \sum_{i=0}^I a_i(n) b^i \quad (2.5)$$

$I$  è l'intero più piccolo tale che  $a_i(n) = 0$  per  $\forall i > I$

$$I = \text{parte intera} \left( \frac{\ln(n)}{\ln(b)} \right) \quad (2.6)$$

2) Il numero che si vuole ottenere è:

$$x_n = \phi_b(n) = \sum_{i=0}^I \frac{a_i(n)}{b^{i+1}} \quad (2.7)$$

Per maggiore comprensione, si pone un esempio: per  $n=3$  in base 2 è 11, quindi:

$$3 = 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 \quad (2.8)$$

Dove  $b=2$ ,  $a_0=1$ ,  $a_1=1$ , quindi  $x_3$  sarà:

$$x_3 = \phi_2(3) = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} = \frac{3}{4} \quad (2.9)$$

Le sequenze possono essere costruite con basi differenti, l'importante è utilizzare per base numeri primi.

Halton e Sobol Sequence sono sequenze multidimensionali a bassa discrepanza, basate sulla sequenza monodimensionale di Van der Corput. La tecnica consiste nel suddividere l'ipercubo unitario in sottovolumi costanti con facce parallele all'ipercubo ed inserire in ogni sottovolume un numero e successivamente passare ad una griglia più fine.

Halton sequence usa per la prima dimensione la sequenza in base due di Van der Corput e per le dimensioni a seguire usa la sequenza di Van der Corput con base  $i$  rispettivi successivi numeri primi. Ad esempio per la seconda e terza dimensione usa rispettivamente la sequenza in base tre e cinque di Van der Corput. All'aumentare della dimensione aumenta il tempo necessario per il calcolo.

La sequenza Sobol usa la base due per tutte le dimensioni e per ognuna riordina gli elementi vettoriali. Il tempo richiesto per il calcolo è ridotto. Il riordinamento dei vettori è complesso e si basa su un insieme di "numeri direzionali"  $v_{ij}$ :

$$v_{ij} = \frac{m_{ij}}{2^i} \quad (2.10)$$

$m_{ij}$  sono i numeri dispari interi positivi minore di  $2^i$ .

La sequenza di Sobol è calcolata tramite un polinomio primitivo di grado  $q$ , i cui coefficienti sono compresi tra 0 e 1:

$$P_q = x^q + a_1x^{q-1} + a_2x^{q-2} + \dots + a_{q-1}x + x^0 \quad (2.11)$$

Successivamente si calcola ricorsivamente  $m_{ij}$  tramite i coefficienti  $a_{i,j}$ :

$$m_{ij} = 2a_{1,j}m_{i-1,j} \oplus 2^2a_{2,j}m_{i-2,j} \oplus \dots \oplus 2^{q-1}a_{q-1,j}m_{i-q+1,j} \oplus 2^q m_{i-q,j} \oplus m_{i-q,j} \quad (2.12)$$

Con  $0 < m_{ij} < 2^i$ .

L'operatore  $\oplus$  è un operatore di esclusione:

$$\begin{array}{cccc} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 1 \end{array}$$

Nel seguente lavoro tesi si analizza le versione di Antonov e Saleev per generare la sequenza di Sobol [16,17]. Questa versione utilizza un codice Gray, che permette di generare la sequenza da qualunque punto e riduce i tempi di calcolo. Inoltre permette di cambiare solo un bit per ogni passo, consentendo di avere sempre una sequenza unica, diversa dalle altre ed evitando valori ambigui.

Il codice Gray è definito nel seguente modo:

$$G_c(i) = i \oplus \left\lfloor \frac{i}{2} \right\rfloor \quad (2.13)$$

Dove  $\left\lfloor \frac{i}{2} \right\rfloor$  è la parte intera di un numero reale.

La sequenza corrispondente è:

$$x^{n,j} = i_1v_{1,j} \oplus i_2v_{2,j} \oplus \dots \quad (2.14)$$

Indicando con  $i$  il corrisponde numero binario del codice Gray.

La proprietà che caratterizza la sequenza è che la differenza tra due codice Gray vicini, ovvero  $G_c(i-1)$  e  $G_c(i)$ , è solo una cifra. La differenza  $l$  è definita nel seguente modo:

$$l = 1 - (G_c(i-1) \oplus G_c(i))_2 \quad (2.15)$$

Dunque la sequenza è generata nel seguente modo:

$$x_{i,j} = x_{i-1,j} \oplus v_n \quad (2.16)$$

Dove  $v_n$  rappresenta la direzione.

## 2.4. Concetto del modello

La tecnica DoE utilizza modelli matematici per approssimare la realtà. Il modello che crea non è corretto al 100%, ma consente di studiare realtà complesse con semplici equazioni. Il modello matematico permette di studiare le leggi che governano il sistema e di effettuare simulazioni al fine di prevedere le condizioni richieste di funzionamento. I più utilizzati sono i modelli di regressione lineari che mettono in relazione la risposta  $y$  con un numero  $n$  di fattori  $x_1, x_2, \dots, x_n$ :

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (2.17)$$

La funzione matematica esprime in modo oggettivo la relazione causa-effetto tra la risposta e i fattori. Il termine  $\varepsilon$  indica la variabile di errore in quanto non si può affermare di ottenere un legame deterministico.

I modelli più semplici utilizzati sono: modelli lineari, modelli di interazione e modelli quadratici.

### Esempio modelli lineari

L'equazione 2.18 è un esempio di modello lineare a tre fattori. I termini lineari sono una combinazione del coefficiente  $\beta_i$ , che corrisponde al parametro che deve essere determinato, e il fattore  $x_i$ .

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \varepsilon \quad (2.18)$$

### Esempio modello di interazione

L'equazione 2.19 è un esempio di modello di interazione a tre fattori, ha gli stessi termini del modello lineare più i termini di interazione, ovvero la combinazione dei fattori  $x_i$  e  $x_j$  con il coefficiente  $\beta_{ij}$ .

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \varepsilon \quad (2.19)$$

### Esempio modello quadratico

L'equazione 2.20 è un esempio di modello quadratico, ovvero è il modello di interazione espresso precedentemente con l'aggiunta dei termini quadratici di ogni fattore  $x_i$  con i rispettivi coefficienti  $\beta_{ii}$ . Di solito questi modelli vengono utilizzati per ottimizzare i processi.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \varepsilon \quad (2.20)$$

Nel caso di modelli di regressioni non lineari, una tecnica diffusa per la modellizzazione è il processo gaussiano.

### 2.4.1. Processo Gaussiano

Questa tecnica si preferisce rispetto alla regressione polinomiale nel caso in cui non si abbia una buona conoscenza del sistema, quindi si opta per lavorare con un numero infinito di funzioni base [19]. La regressione polinomiale richiede di stabilire le funzioni base prima di analizzare il processo ed è difficile farlo se non si ha una buona conoscenza del sistema, inoltre sono presenti altre limitazioni, tra cui:

- la necessità di avere un parametro per ogni termine da stimare, mentre i processi gaussiani hanno un numero di parametri pari al numero dei fattori, questo facilita lo studio dei sistemi più complessi;
- Se i polinomi non sono costanti all'interno dello spazio di input tendono a stimare valori fuori dalla regione dei dati di misurazione, invece i processi gaussiani calcolano una media dei dati se le misure sono lontane dai valori stimati.
- L'affidabilità del modello può essere verificata calcolando l'errore di predizione, ma si basa sulla precisione del modello polinomiale che non è sempre ottima. I processi gaussiani invece permettono di capire in modo semplice se un modello è affidabile o meno, tramite un incremento del valore della varianza.

#### Formulazione del modello di regressione GP

Si definisce un processo gaussiano, una collezione di variabili casuali, di cui qualsiasi numero finito ha una congiunta distribuzione gaussiana. Il processo gaussiano è determinato dalla funzione media e dalla funzione covarianza [20].

Si definisce la funzione media  $m(x)$  e la funzione covarianza  $\kappa(x, x')$  nel seguente modo:

$$m(x) = \mathbb{E}[f(x)] \quad (2.21)$$

$$\kappa(x, x') = \mathbb{E}[(f(x) - m(x))(f(x') - m(x')))] \quad (2.22)$$

Il processo Gaussiano  $f(x)$  può essere scritto come:

$$f(x) \sim \mathcal{GP}((m(x), \kappa(x, x'))) \quad (2.23)$$

Tenendo conto della variabile di errore:

$$y = f(\mathbf{x}) + \varepsilon \quad (2.24)$$

Supponendo che la distribuzione dell'errore sia distribuita equamente con varianza  $\sigma_n^2$ , segue che la distribuzione congiunta dei valori osservati  $y$  e la predizione  $f^*$  è:

$$\begin{bmatrix} y \\ f_* \end{bmatrix} \sim \mathcal{N} \left( 0, \begin{bmatrix} K(X, X) + \sigma_n^2 I & K(X, X_*) \\ K(X_*, X) & K(X_*, X_*) \end{bmatrix} \right) \quad (2.25)$$

Dove  $K$  è la matrice di covarianza calcolata dal kernel function  $\kappa(x, x')$ .

Esistono differenti funzioni di covarianza, la più comune è Squared Exponential, che permette di dedurre le caratteristiche di input importanti senza introdurre ulteriori regolazioni. Al fine di selezionare automaticamente il modello conviene usare il kernel ARD squared exponential:

$$\kappa(x, x') = \sigma_f^2 \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{d=1}^D \frac{1}{l_d^2} (x_d - x'_d)^2 \right\} \quad (2.26)$$

Dove  $\sigma_f^2$  è il segnale di varianza e  $l_d^2$  è la lunghezza di scala della covarianza. Dato che il processo di regressione gaussiana è una forma di modellazione non parametrica, si definiscono gli iperparametri  $\theta = \{ \{l_d^2\}, \sigma_f^2, \sigma_n^2 \}$ .

I valori di tutti gli iperparametri si stimano dai dati di training e da differenti input si possono ottenere differenti valori per la lunghezza di scala dei parametri. Inoltre Squared exponential kernel permette di capire le variabili di input che hanno più o meno effetti sul modello.

Un noto metodo di selezione del modello è la tecnica di Marginal Likelihood, che permette di determinare automaticamente gli iperparametri del kernel ARD e consiste nel calcolare il logaritmo negativo marginal likelihood:

$$L(\theta) = -\log p(y|X, \theta) \quad (2.27)$$

e successivamente calcola la derivata parziale di  $L(\theta)$  rispetto a  $\theta$ .

## 2.4.2. Parametri di valutazione dei modelli di regressione

Per ogni modello di regressione si considera un modello di ordine zero, detto somma totale dei quadrati ( $SS_T$ ), che si riferisce al valor medio della risposta.

$$SS_T = \sum_i (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.28)$$

$$SS_T = SS_R + SS_E \quad (2.29)$$

$SS_R$  indica la somma dei quadrati del modello definita nel seguente modo:

$$SS_R = \sum_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (2.30)$$

ed  $SS_E$  indica la somma dei quadrati dovuta all'errore:

$$SS_E = \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2.31)$$

Il modello di regressione è tanto migliore quanto più piccolo è il valore di  $SS_E$  e quanto più grande è il valore di  $SS_R$ .

Per valutare la qualità di un modello, ovvero se si adatta bene ai dati sperimentali, si utilizzano delle grandezze statistiche. Di solito la grandezza che si utilizza è il **coefficiente di correlazione multipla  $R^2$** :

$$R^2 = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} = \frac{SS_R}{SS_T} \quad (2.32)$$

Si definisce come il rapporto della varianza spiegata dal modello e la varianza contenuta nei risultati sperimentali. Tale grandezza se si moltiplica per cento rappresenta la percentuale di varianza spiegata dal modello.

Più il valore di  $R^2$  è alto e più il modello spiega bene la variabilità della risposta. L'inconveniente di questo indice è dovuto al fatto che all'aumentare del numero di regressioni del modello il suo valore aumenta. Per ovviare a tale problema si è introdotto il coefficiente di correlazione **multipla aggiustato  $R_{adj}^2$** , che deriva dall'equazione precedente aggiungendo una pesatura sia al numeratore che al denominatore per tenere conto del numero di regressori nel modello [27]. Si utilizza per un modello di regressione multipla con  $k$  regressori ed è definito nel seguente modo:

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{SS_E/(n-p)}{SS_T/(n-1)} \quad (2.33)$$

Indicando con  $n$  il numero delle prove e con  $p$  il numero di parametri presenti nel modello.

## 2.5. Model-Based Calibration Toolbox

Model-Based Calibration (MBC) è un toolbox commerciale implementato in Matlab, sviluppato dalla collaborazione tra Mathworks e Ford Motor Company. MBC permette di utilizzare la tecnica di design of experiments, di effettuare modellazioni statistiche e la calibrazione di sistemi complessi. È principalmente usato per la calibrazione dei motori, ma nel seguente progetto tesi sarà utilizzato per la ricerca dell'ottimo layout di un heavy duty vehicle[18].

È costituito da due interfacce utenti ed entrambe si utilizzeranno nel seguente lavoro tesi:

- **Model Browser:** fornisce gli strumenti per l'applicazione della tecnica DoE e per la modellazione statistica. È una interfaccia grafica potente e intuitiva, permette di costruire e valutare progetti sperimentali e modelli statistici. Il tool fornisce le tecniche: *Optimal*, *Space filling*, *Classical designs*, da poter utilizzare in base alla conoscenza del sistema studiato, inoltre i limiti di progettazione possono essere importati o progettati. Permette anche il confronto tra vari modelli statistici e progetti sperimentali ed è presente una ampia libreria di modelli precostruiti utilizzabili o in alternativa è possibile crearne di nuovi. Infine dopo aver creato il modello è possibile esportarlo in Matlab, Simulink o Cage per ulteriori analisi.
- **CAGE Browser:** fornisce gli strumenti per la calibrazione analitica. È una semplice interfaccia grafica nata con l'obiettivo di calibrare i lookup tables dell'unità controllo elettronica. Tramite metodi analitici permette con facilità di calibrare i lookup tables risparmiando il tempo di investigazione, in quanto affidarsi alla sola intuizione richiederebbe molto tempo. Inoltre sono presenti strumenti di ottimizzazione e test dati. Nel seguente studio si utilizzeranno gli strumenti di ottimizzazione, con l'obiettivo di investigare il modello creato da Model Browser, al fine di provare a trovare l'architettura ottimale che consenta di ottenere il minimo valore di CO<sub>2</sub>.

### 3. Modello veicolo

Il design che si vuole ottimizzare è un veicolo ibrido elettrico plug-in heavy duty, con posizionamento P2 della macchina elettrica. In tabella 3.1 si riportano le caratteristiche del veicolo e in figura 3.1 si schematizza il layout. Nei paragrafi successivi si analizzeranno i vari componenti.

Caratteristiche del veicolo	
Peso in ordine di marcia [kg]	4200
Carico massimo [kg]	3300
Raggio pneumatico [m]	0.377
Numero ruote [-]	6
Inerzia ruota [kgm <sup>2</sup> ]	3
Coefficiente resistenza al rotolamento [N/kg]	0.0879
Coefficiente resistenza aerodinamica [-]	0.703
Area frontale [m <sup>2</sup> ]	6.3

Tabella 3.1: Caratteristiche del veicolo studiato.

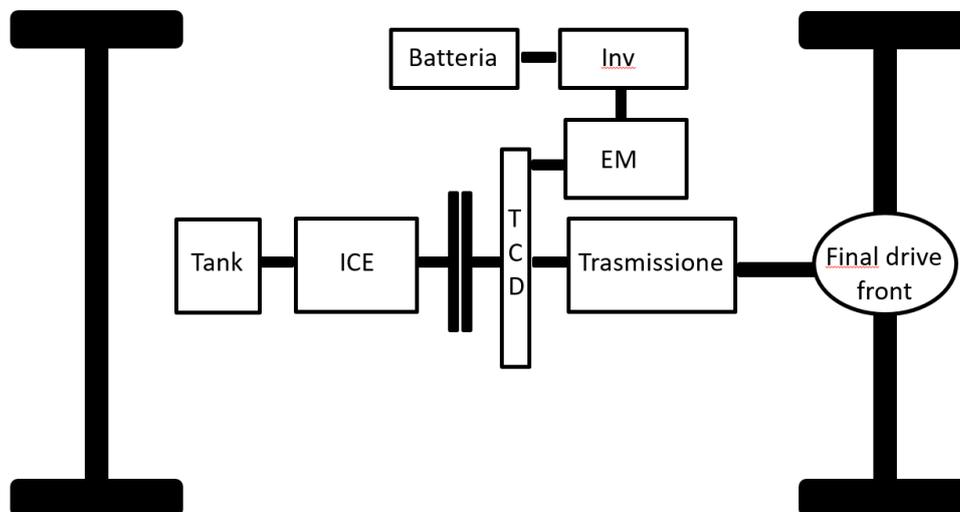


Figura 3.1: Schematizzazione del modello del veicolo.

### 3.1. Motore termico

Si utilizza un motore ad accensione per compressione quattro tempi e si tiene in considerazione una mappa motore di cilindrata pari a 4.485l. Durante l'indagine riguardo la dimensione della cilindrata che ottimizza la CO<sub>2</sub>, la mappa motore di riferimento verrà scalata di conseguenza adattandosi alle esigenze.

Dalla mappa si calcolerà la portata massica di combustibile e da questa si calcolerà l'emissione di CO<sub>2</sub>, il tutto verrà calcolato nel seguente modo:

$$\dot{m}_{fc} = map_{fc} (C_{ice}, \omega_{ice}) \quad (3.1)$$

$$\dot{m}_{CO_2} = 2.65 \cdot \frac{\dot{m}_{fc}}{\rho} \quad (3.2)$$

Indicando con  $\rho$  la densità di combustibile.

Il motore ad accensione per compressione consente di ottenere minori consumi specifici di combustibile e in generale si utilizza per veicoli che non richiedono velocità elevate.

Le caratteristiche operative che lo contraddistinguono sono:

- Presenza soltanto dell'aria nella fase di compressione;
- Rapporto di compressione alto, necessario per l'autoaccensione del combustibile, in quanto permette all'aria di raggiungere valori elevati di pressione e temperatura;
- Rapporto combustibile/aria sempre stechiometrico debole, di conseguenza possono essere trascurate le emissioni di CO in quanto il loro valore è molto basso.

Se da una parte il motore ad accensione per compressione presenta diversi aspetti positivi, dall'altra il principale problema che li caratterizza sono le emissioni inquinanti causati all'accesso d'aria. Si riporta in figura 3.2 la schematizzazione dell'iniezione di combustibile, raffigurando le diverse zone interessate alla formazione degli inquinanti (NO<sub>x</sub>, CO, HC, PM) [21].

Gli **idrocarburi incombusti HC** possono formarsi o nella zona A, nella zona esterna dell'iniezione, dove è presente una concentrazione di combustibile bassa che non consente l'autoaccensione e propagazione della combustione o si possono formare per l'incompleta combustione nella zona centrale del getto (zona D), dove vi è una concentrazione elevata di combustibile. Inoltre se una parte di combustibile raggiunge le pareti della camera di combustione e del pistone, evapora successivamente. Invece se qualche frazione di combustibile non trova ossigeno a sufficienza, non prenderà parte alla combustione ed in particolare se le pareti sono fredde si avrà un ritardo nell'evaporazione. Infine gli idrocarburi possono formarsi quando, dopo la chiusura dello spillo, si aspira del combustibile nel cilindro dalla cavità inferiore dell'iniettore.

Le **emissioni di NO<sub>x</sub>**, invece, dipendono dalle alte temperature, dall'elevate concentrazione di ossigeno e dalla durata della combustione. Si formano durante la fase di combustione di fiamma, nella zona B che rappresenta la zona periferica del getto e nella zona C che riguarda la zona centrale dell'iniezione.

Le **emissioni di particolato PM** riguardano le zone dove il rapporto aria/combustibile è minore del valore stechiometrico. Enormi quantità di particolato si formano nella zona C, zona centrale, dove le dimensioni delle gocce di combustibile sono nettamente più grandi della zona di premiscelazione (zona B). Qui la combustione avviene per diffusione e l'ambiente a pieno

carico potrebbe risultare povero di ossigeno. Inoltre nella zona D, dove si trova l'ultima frazione di combustibile che ancora deve subire il processo di combustione, si formano gocce di grande dimensioni ed essendo circondati da gas ad elevata temperatura, evaporano rapidamente non permettendo una adeguata penetrazione. Quest'ultima fase di combustione porta alla formazione di particelle carboniose. Nella zona di fiamma quando le particelle carboniose sono a contatto con l'ossigeno che non ha partecipato alla combustione si creano fenomeni di ossidazione del particolato che riduce le emissioni di PM allo scarico.

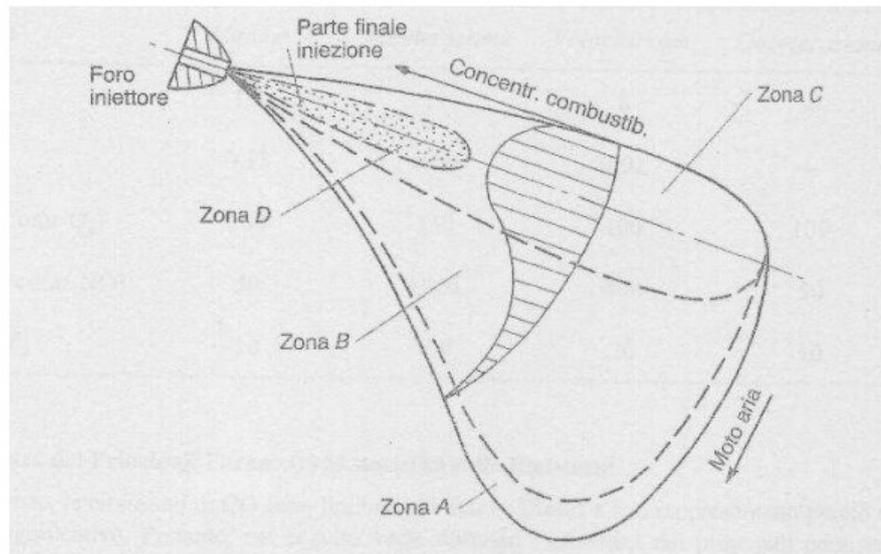


Figure 3.2: Rappresentazione schematica delle zone che riguardano la combustione e la formazione degli inquinanti [21]

### 3.2. Macchina elettrica

Il powertrain elettrico è garantito dalla cooperazione di macchina elettrica, inverter ed elettronica di controllo. Se fino agli anni '60 la trazione elettrica si basava sul motore/generatore a corrente continua collegato direttamente alle batterie, oggi invece, i grandi progressi raggiunti dall'elettronica hanno permesso lo sviluppo degli inverter favorendo così l'interesse per motori a corrente alternata nell'ambito della trazione.

Oggi i veicoli ibridi elettrici sono dotati di macchina trifase, i più diffusi sono il motore asincrono (motore ad induzione) e il motore sincrono a magneti permanenti (Blushless Direct Current). Il primo è un motore elettrico a corrente alternata in cui la velocità angolare del rotore è inferiore alla velocità di rotazione del campo magnetico generato dallo statore, il secondo invece è sempre un motore elettrico a corrente alternata ma stavolta la velocità del campo magnetico rotante è sincrona alla velocità del rotore. In futuro non si esclude la diffusione dei motori a commutazione di riluttanza, in cui nel corso degli anni numerosi studi hanno permesso di superare i due problemi principali che impedivano la loro diffusione: rumorosità e instabilità della coppia. Inoltre a differenza del motore sincrono a magneti permanenti e del motore asincrono, i motori a commutazione di riluttanza sono poco costosi e raggiungono valori di densità di potenza superiori rispetto ai motori ad induzioni [22,25]. Nel seguente studio si utilizzerà un motore sincrono a magneti permanenti, attualmente diffuso nel campo dei veicoli elettrici ed ibridi, i cui aspetti positivi sono:

- Elevato flusso magnetico, quindi elevata densità di coppia e di potenza, con conseguente riduzione di dimensione e massa;

- Elevata efficienza a pieno carico e carico parziale, l'uso di magneti permanenti per generare il flusso di eccitazione non consumano potenza e inoltre sono presenti basse perdite di attrito meccanico dovuto all'assenza di spazzole e commutatore meccanico;
- Semplicità di controllo e raffreddamento, non circola nessuna corrente nel rotore, la manutenzione è ridotta e presenta grande affidabilità.
- Bassa rumorosità.

Di contro l'utilizzo di questo motore è soggetto a diverse critiche tra cui:

- L'utilizzo di materiali molto costosi, appartenenti alla famiglia delle terre rare come il Samario e Neodimio, potrebbero non favorire la piena diffusione della tecnologia;
- Velocità costante limitata;
- Limitato range di potenza costante;

L'architettura scelta consenta alla macchina elettrica di funzionare sia da motore che da generatore. Nel primo caso fornisce potenza per la trazione, nel secondo permette di recuperare energia durante la fase di frenata per poi riutilizzarla per ricaricare la batteria o per ritrasferirla alla trasmissione.

Anche la macchina elettrica sarà uno dei parametri da ottimizzare, si utilizzerà una mappa di efficienza di riferimento che varrà scalata in base alle esigenze.

### 3.3. Batteria

Le batterie sono dispositivi capaci di convertire energia chimica in energia elettrica tramite spontanee reazioni chimiche di ossidoriduzione. Le batterie impiegate in ambito automotive sono: batterie al piombo acido, idrocarburi metallici e ioni di litio. Le batterie al piombo acido, sono le batterie più economiche, utilizzate sui veicoli dove non vi sono richieste elevate di densità di potenza ed energia, generalmente sono utilizzate nei veicoli tradizionali per applicazione Starting-Lighting-Ignition, ovvero per alimentare i dispositivi ausiliari elettrici e il motorino di avviamento del veicolo. Le batterie ad idrocarburi metallici sono utilizzate per veicoli mild e full hybrid, forniscono una maggiore densità di energia e di potenza rispetto alle prime e il prezzo è maggiore. Infine le batterie agli ioni di litio, entrate nel mercato nei primi anni '90, sono le più costose, ma sono in grado di fornire valori elevati di densità di energia e di potenza, circa 3-4 superiori alle batterie al piombo acido. Attualmente sono ampiamente utilizzate nei nuovi veicoli elettrici e ibridi plug-in. In tabella 3.2 si riportano le principali caratteristiche delle tipologie di batterie elencate:

	<b>PIOMBO ACIDO</b>	<b>IDROCARBURI METALLICI</b>	<b>IONI DI LITIO</b>
<b>ENERGIA SPECIFICA (WH/KG)</b>	30-50	60-120	100-265
<b>POTENZA SPECIFICA (W/KG)</b>	75-300	250-1000	250-340
<b>EFFICIENZA ENERGETICA (%)</b>	70-80	60-70	85-98
<b>AUTOSCARICA(%/GIORNO)</b>	0.033	25-3.0	0.1-0.3
<b>EFFICIENZA ENERGETICA</b>	70-80	60-70	85-98
<b>CICLI DI VITA</b>	100-2000	500-1000	500-3000
<b>COSTO PER UNITÀ DI POTENZA(\$/KW)</b>	175-600	150-1500	175-4000
<b>COSTO PER UNITÀ DI ENERGIA (\$/KWH)</b>	150-400	150-1500	500-2500

Tabella 3.2: Caratteristiche principali delle tre categorie di batterie: Piombo Acido, Idrocarburi metallici, Ioni di litio [22].

Nel seguente studio si utilizzerà la batteria ad ioni di litio. Per l'elettrodo negativo si utilizzano materiali al carbonio, per l'elettrodo positivo si utilizza un ossido di metallo litiato, mentre per l'elettrolita si utilizza una soluzione liquida organica o un polimero solido.

Inizialmente si utilizzava come elettrodo negativo il coke ma dopo il 1997 venne sostituito dalla grafite, le cui prestazioni sono migliori e presenta una curva di scarica più piatta, dunque potenziale costante durante la fase di scarica. Le celle sfruttano il meccanismo chimico di intercalazione, che consiste nell'inserire gli ioni di litio tra gli strati della grafite durante la fase di carica, invece nella fase di scarica gli ioni di litio escono dal materiale al carbonio. Gli ioni di litio oscillano attraverso l'elettrolita e il separatore, da un elettrodo all'altro. Durante il processo di scarica gli ioni passano dall'elettrodo negativo al positivo, viceversa per il processo di carica, lasciando la struttura della grafite intatta.

Le principali batterie agli ioni di litio sono: Litio-Cobalto (LCO), che nonostante sia stata utilizzata da alcune case automobilistiche non è considerata sicura per l'ambito automotive, Litio-Ossido di Manganese (LMO), Litio-Nichel-Manganese-Cobalto (NMC), Litio-Nichel-Cobalto-Alluminio (NCA) e Litio-Ferro-Fosfato (LFP), dove l'anodo è in grafite e l'acronimo prende il nome del catodo. Un'altra categoria è il Litio-Titanato (LTO), il cui acronimo deriva dall'anodo in titanato di litio, il catodo invece è la grafite. Brevemente si descrivono le principali caratteristiche di ogni famiglia di batteria:

- **Litio-Cobalto:** Ha una tensione nominale di cella pari a 3.6V e un'energia specifica di 200Wh/kg. Presenta una ridotta auto-scarica e permette di effettuare tra i 500 e 1000 cicli di scarica. Gli svantaggi sono l'elevato costo dovuto al cobalto, la bassa stabilità termica e in presenza di profondi cicli di scarica-carica si ha una perdita della capacità.
- **Litio-Ossido di manganese:** Ha una tensione nominale di cella pari a 3.8V, un'energia specifica di 100-150Wh/kg e permette di avere 300-700 cicli di vita. Inoltre non è un materiale tossico e rispetto al Litio-Cobalto possiede una stabilità termica elevata e costa meno.
- **Litio-Nichel-Manganese-Cobalto:** La combinazione di questi elementi determina più energia specifica e maggiore durata della batteria. Possiede una tensione nominale di 3.6-3.7V, energia specifica 150-220 Wh/kg e 1000-2000 cicli di vita. Inoltre l'uso di una minore concentrazione di cobalto riduce i costi.
- **Litio-Nichel-Cobalto-Alluminio:** Ha caratteristiche simili alla batteria illustrata precedentemente: tensione nominale 3.6V, energia specifica 150-220 Wh/kg ed elevata durata della batteria. Inoltre la presenza dell'alluminio migliora la stabilità termica e le prestazioni elettrochimiche. Gli svantaggi sono il costo elevato e una bassa sicurezza.
- **Litio-Ferro-Fosfato:** ha una tensione nominale di 3.2V, un'energia specifica di 90-120Wh/kg e 1000-2000 cicli di vita. I principali vantaggi sono la stabilità termica alle alte temperature, un'elevata sicurezza e un basso costo. Di contro presenta una maggiore autoscarica.
- **Litio-Titanato:** ha una tensione nominale di 3.6V, un'energia specifica di 70-110Wh/kg e una durata di  $\geq 1000$  cicli di vita. I principali vantaggi sono la sicurezza grazie alla mancanza del carbonio ed elevata stabilità termica, di contro il costo è elevato.

Nel seguente studio si andrà ad ottimizzare la massima potenza della batteria in relazione alla macchina elettrica, il parametro che si occuperà della valutazione è indicato con "PE" (rapporto tra la potenza massima della macchina elettrica e l'energia della batteria).

I parametri della batteria sono:

Parametri batteria	
Tensione nominale della cella ( $V_c$ )	3.6 V
Capacità nominale della cella ( $C_c$ )	2.9 Ah
Numero celle in una unità ( $N_c$ )	6
Tensione nominale batteria ( $V_{nom}$ )	300 V
Numero totale di celle	1680

Tabella 3.3: Parametri della batteria.

Il dimensionamento della batteria avviene nel seguente modo:

$$C_{Bat} = \frac{E_{Bat}}{V_{nom}} \text{ [Ah]} \quad (3.3)$$

$$N_{PU} = \frac{C_{Bat}}{C_U} \quad (3.4)$$

$$V_U = V_c \cdot N_c \text{ [V]} \quad (3.5)$$

$$V_M = V_u \text{ [V]} \quad (3.6)$$

$$N_{MS} = \frac{V_{nom}}{V_m} \quad (3.7)$$

Indicando con  $C_{Bat}$  la capacità della batteria,  $C_U$  la capacità unitaria,  $N_{PU}$  il numero delle unità parallele,  $V_U$  la tensione dell'unità,  $V_M$  la tensione del modulo,  $N_{MS}$  il numero dei moduli in serie.

Dai dati di riferimento della tensione riferiti al circuito aperto  $V_{oc\_rif}(SOC)$  e da dati della resistenza equivalente  $R_{eq\_rif}(SOC)$  si ricavano la tensione di circuito aperto  $V_{oc}(SOC)$  e la resistenza equivalente della batteria, entrambi dipendenti dal SOC:

$$V_{oc}(SOC) = V_{oc\_rif}(SOC) \cdot N_{MS} \cdot N_c \text{ [V]} \quad (3.8)$$

$$R_{eq}(SOC) = R_{eq\_rif}(SOC) \cdot \frac{N_{MS} \cdot N_c}{N_{PU}} \text{ [\Omega]} \quad (3.9)$$

Il termine SOC indica lo stato di carica della batteria.

Mediante il modello di resistenza equivalente, mostrato in figura 3.3, si può valutare lo stato di carica (SOC).

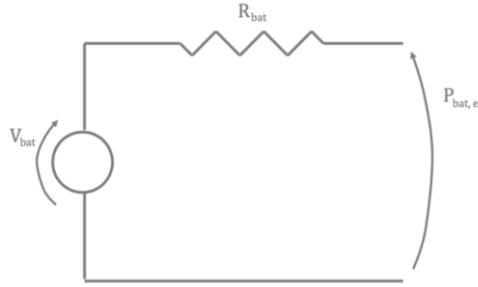


Figure 3.3: modello di resistenza equivalente

Inizialmente si determina la mappa dei limiti di potenza, calcolando:

- la massima potenza elettrica della batteria:

$$P_{MAX}(SOC) = \frac{V_{oc}(SOC)^2}{4 \cdot R_{eq}(SOC)} \quad [W] \quad (3.10)$$

+

- Il valore delle correnti considerando un valore di  $C_{rate}$  pari ad 1. Il  $C_{rate}$  indica il rapporto tra la corrente e la capacità di carica nominale.

$$I_{C_{rate}1} \frac{C_{batt}}{1 h} \quad [A/A] \quad (3.11)$$

- Il massimo valore della corrente:

$$I_{MAX} = I_{C_{rate}1} \cdot C_{rateMAX} \quad [A] \quad (3.12)$$

- La potenza chimica richiesta alla batteria:

$$P_{chimica}(SOC) = V_{oc}(SOC) \cdot I_{MAX} - R_{eq}(SOC) \cdot I_{MAX}^2 \quad [W] \quad (3.13)$$

Successivamente si è in grado di calcolare la mappa dei limiti di potenza:

- Curva limite di potenza in fase di scarica:

$$P_{limite_{sup}}(SOC) = \min[P_{MAX}(SOC), P_{chimica}(SOC)] \quad [W] \quad (3.14)$$

- Curva limite di potenza in fase di carica:

$$P_{limite_{inf}}(SOC) = -(V_{oc}(SOC) \cdot I_{MAX} + R_{eq}(SOC) \cdot I_{MAX}^2) \quad [W] \quad (3.15)$$

Il calcolo del SOC avviene in ogni fase della missione, considerando le curve dei limiti di potenza, la tensione di circuito aperto  $V_{oc}(SOC)$  e la resistenza equivalente della batteria  $R_{eq}(SOC)$ . La corrente della batteria è calcolata nel seguente modo:

$$I_{Bat} = \frac{V_{Bat} - \sqrt{V_{Bat}^2 - 4 \cdot R_{Bat} \cdot P_{Bat,El}}}{2 \cdot R_{Bat}} \quad (3.16)$$

La potenza richiesta della batteria  $P_{Bat,El}$  è calcolata in ogni fase, ed è funzione del SOC e dei limiti di potenza. Si valuta il massimo valore che si può ottenere per ogni livello di SOC tenendo presente le curve limiti di potenza.

Lo stato di carica della batteria (SOC) è calcolato nel seguente modo:

$$SOC = SOC_0 - \int \frac{I_{Bat}}{C_{Bat}} \cdot dt \quad (3.17)$$

### 3.4. Torque coupling device

Il torque coupling device consente di sommare le coppie provenienti da due alberi differenti, uno relativo all'albero del motore termico e all'altro relativo al motore elettrico, trasferendo la coppia risultante all'albero di uscita collegato alla trasmissione [25]. Si mostra in figura 3.4 la schematizzazione del meccanismo impiegato e il relativo diagramma di corpo libero.

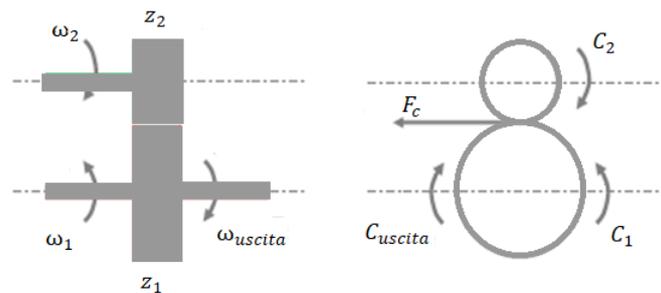


Figura 3.4: Schematizzazione del meccanismo del torque coupling e relativo diagramma di corpo libero.

Prendendo in considerazione le velocità nel punto di contatto dell'ingranaggio, la relazione che lega le varie velocità degli alberi è:

$$\omega_1 z_1 = \omega_2 z_2 = \omega_{uscita} z_1 \quad (3.18)$$

Indicando con  $\omega_1$  e  $\omega_2$ , le velocità dei due alberi, mentre con  $z_1$  e  $z_2$  si indicano il numero di denti dei rispettivi ingranaggi.

Considerando il rapporto di trasmissione  $\tau = \frac{z_1}{z_2} = \frac{R_1}{R_2}$ , l'equazione precedente diventa:

$$\omega_{uscita} = \omega_1 = \frac{\omega_2}{\tau} \quad (3.19)$$

Dallo schema di corpo libero, se si trascurano le perdite, la forza trasmessa nel punto di contatto viene definita nel seguente modo:

$$F_c = \frac{C_2}{R_2} \quad (3.20)$$

Indicando con  $C_2$  la coppia trasmessa dal secondo albero ed  $R_2$  il raggio primitivo della seconda ruota dentata. Se riappliciamo l'equilibrio alla ruota del primo albero, otteniamo la relazione tra le coppie degli alberi:

$$C_{uscita} = C_1 + F_c * R_1 = C_1 + \frac{C_2}{R_2} * R_1 = C_1 + C_2 * \tau \quad (3.21)$$

Quindi in generale si può scrivere:

$$\omega_{uscita} = \frac{\omega_1}{k_1} = \frac{\omega_2}{k_2} \quad (3.22)$$

$$C_{uscita} = k_1 * C_1 + k_2 * C_2 \quad (3.23)$$

Ponendo  $k_1$  pari ad 1 ed indicando con  $k_2$  il rapporto di trasmissione  $\tau$ .

### 3.5. Trasmissione

La trasmissione è costituita da 6 rapporti di velocità e dal final drive, quest'ultimo è considerato come un moltiplicatore di coppia. Si riportano i rapporti della trasmissione e le rispettive efficienze in tabella 3.4, mentre il finaldrive appartiene alla categoria dei fattori da studiare al fine di ottimizzare il layout.

Marcia	1	2	3	4	5	6
Rapporto di trasmissione	6.02	3.32	2.07	1.4	1	0.79
Efficienza	0.9675	0.9673	0.9685	0.971	0.99	0.98

Tabella 3.4: Rapporti di trasmissione e rispettive efficienze.

### 3.6. Modello dinamico

Il modello dinamico del veicolo permetterà di calcolare la potenza richiesta durante il percorso del veicolo su un qualunque ciclo. L'obiettivo è valutare l'emissione di CO<sub>2</sub>. Il modello della dinamica del veicolo è riportato in figura 3.5.

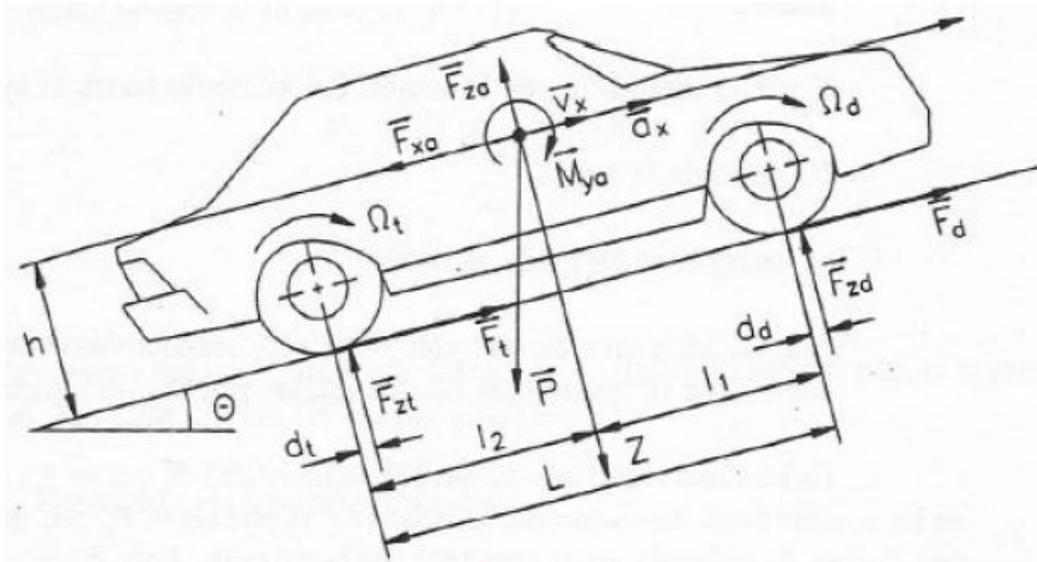


Figura 3.5: modello dinamica del veicolo.

Si ricostruisce la potenza richiesta durante il ciclo partendo dalle forze resistenti, tenendo in considerazione la variabile di input: velocità e pendenza. La potenza richiesta al veicolo è la somma di diversi contributi: resistenza al rotolamento, resistenza alla pendenza, resistenza aerodinamica, inerzia [25].

#### Resistenza al rotolamento

La resistenza al rotolamento dei pneumatici è causata dalla loro deformazione a contatto con la durezza del suolo. La deflessione della carcassa durante il moto causa l'isteresi del pneumatico, causando una distribuzione non omogenea delle forze di reazione del suolo. La deformazione riguarda l'orma di contatto del pneumatico che spostando il suo centro di pressione, genera una coppia attorno all'asse di rotazione che si oppone al movimento.

Il contributo della resistenza al rotolamento è espresso nel seguente modo:

$$P_{rot} = (m \cdot r \cdot g \cdot \cos(\alpha_r)) \cdot V \quad (3.24)$$

Si indica con  $m$  la massa del veicolo,  $r$  il coefficiente di resistenza al rotolamento,  $g$  l'accelerazione gravitazionale,  $\alpha_r$  la pendenza stradale e  $V$  la velocità del veicolo. A basse velocità il contributo della resistenza al rotolamento è maggiore.

### Resistenza alla pendenza

La resistenza alla pendenza è la componente del peso del veicolo, posta in direzione parallela al manto stradale. Durante un percorso in salita, la componente di peso si oppone al moto, invece durante un percorso in discesa la componente è concorde al moto. Il contributo della resistenza alla pendenza è:

$$P_{pend} = (m \cdot g \cdot (\sin\alpha_r)) \cdot V \quad (3.25)$$

### Resistenza aerodinamica

La resistenza aerodinamica dipende dalla somma di due contributi:

- *Resistenza di forma*: più la velocità del veicolo è elevata e più esso incontrerà una resistenza da parte dell'aria nella parte anteriore durante il moto, aumentando la pressione agente sul veicolo creando una zona di alta pressione. Nella parte posteriore invece, si creerà una zona di bassa pressione a causa di un non istantaneo riempimento dell'aria durante il moto di avanzamento del veicolo. Le pressioni agenti nelle due zone precedente indicate si opporranno all'avanzamento del veicolo.
- *Resistenza d'attrito*: è causata dalla differenza di velocità tra le molecole di aria che si trovano vicino al veicolo e quelle che si trovano lontane. Infatti le prime si muoveranno quasi alla stessa velocità del mezzo, le seconde rimarranno ferme. L'ampio range di velocità presente tra le due zone causerà attrito.

La somma delle due contributi è espressa nel seguente modo:

$$P_{drag} = \left( \frac{1}{2} \cdot \rho_{aria} \cdot C_x \cdot A \cdot V^2 \right) \cdot V \quad (3.26)$$

Indicando con  $\rho_{aria}$  la densità dell'aria,  $C_x$  la resistenza aerodinamica ed  $A$  l'area frontale del veicolo.

### Inerzia

Il veicolo durante il cambiamento del suo stato cinematico oppone resistenza, tale resistenza è detta forza di inerzia. Il suo contributo in termini di potenza è espresso nel seguente modo:

$$P_{inerzia} = \left( m + \frac{I_{ruota}}{R_{ruota}} \right) \cdot \dot{V} \cdot V \quad (3.27)$$

indicando con  $I_{ruota}$ ,  $R_{ruota}$  rispettivamente l'inerzia e il raggio della ruota.

In conclusione, dopo aver elencato i vari contributi, la potenza richiesta dal veicolo è:

$$P_{TOT} = P_{rot} + P_{pend} + P_{drag} + P_{inerzia} \quad (3.28)$$

Se la potenza è positiva il veicolo lavora in condizione di trazione, altrimenti se negativa lavora in condizione di frenata.

Il final drive nell'architettura in esame è posto sull'asse frontale e la sua potenza è definita nel seguente modo:

$$P_{fd,f} = \begin{cases} P_v & \text{in trazione} \\ (1 - \gamma_{fr}) \cdot P_v & \text{in frenata} \end{cases} \quad (3.29)$$

Indicando con  $\gamma_{fr}$  la frazione di potenza che l'attrito meccanico dei freni dovrà gestire. Per quanto riguarda l'intera potenza richiesta dal powertrain frontale, la formulazione è la seguente:

$$P_{p\_frontale} = (P_{fd,f} + P_{tr,in}) \cdot \eta_{tr}^k + P_{EM,in} + P_{ICE,in} \quad (3.30)$$

Dove

$$P_{tr,in} = I_{tr} \cdot \dot{\omega}_{tr} \cdot \omega_{tr} \quad (3.31)$$

$$P_{EM,in} = I_{EM} \cdot \dot{\omega}_{EM} \cdot \omega_{EM} \quad (3.32)$$

$$P_{ICE,in} = I_{ICE} \cdot \dot{\omega}_{ICE} \cdot \omega_{ICE} \quad (3.33)$$

indicando con  $P_{tr,in}$  la potenza inerziale della trasmissione e con  $\eta_{tr}^k$  la sua efficienza. Inoltre  $P_{EM,in}$  indica la potenza inerziale della macchina elettrica e  $P_{ICE,in}$  la potenza inerziale del motore termico. L'esponente  $k$  ha due possibili valori, -1 e 1, il primo si usa in condizioni di trazione, il secondo in condizioni di frenata.

La velocità angolare del powertrain frontale  $\omega_{p\_frontale}$  è calcolata nel seguente modo:

$$\omega_{p\_frontale} = \tau \cdot \tau_{fd,fr} \frac{V}{R_{ruota}} \quad (3.34)$$

Indicando con  $\tau$  il rapporto di trasmissione, con  $\tau_{fd,fr}$  rapporto di velocità del final drive frontale e  $R_{ruota}$  il raggio della ruota

### 3.7. Modalità di funzionamento ed equazioni

Le modalità di funzionamento del veicolo che si vuole ottimizzare sono cinque: modalità di puro termico, modalità puro elettrico, modalità ibrida (powersplit), modalità di ricarica batteria (battery charging) e frenata rigenerativa.

In generale le varie potenze possono essere espresse in funzione di  $\alpha$ , ovvero in funzione della variabile di controllo che indica la ripartizione della potenza fornita.

Indicando con  $P_{fr}$  la potenza del powertrain frontale, si definisce la potenza della macchina elettrica e del motore termico nel seguente modo:

$$P_{EM} = \alpha \cdot P_{fr} \quad (3.35)$$

$$P_{ICE} = (1 - \alpha) \cdot P_{fr} \quad (3.36)$$

Le rispettive velocità sono espressa dalla seguente formulazione:

$$\omega_{EM} = \tau \cdot \omega_{fr} \quad (3.37)$$

$$\omega_{ICE} = \omega_{fr} \quad (3.38)$$

Al fine di ottenere la potenza e la velocità richiesta per ogni modalità di funzionamento, si riportano in tabella 3.5 i valori da sostituire nelle equazioni generali precedentemente elencate.

POWER FLOW	MODALITÀ DI FUNZIONAMENTO				
	Puro termico	Puro elettrico	Power split	Battery Charging	Frenata rigenerativa
$P_{EM}$	0	$P_{fr}$	$P_{EM}$	$P_{EM}$	$P_{fr}$
$P_{ICE}$	$P_{fr}$	$\omega_{EM}$	$P_{ICE}$	$P_{ICE}$	0
$\alpha$	0	1	0.5	-0.5	0
$\omega_{EM}$	0	$\omega_{EM}$	$\omega_{EM}$	$\omega_{EM}$	$\omega_{EM}$
$\omega_{ICE}$	$\omega_{ICE}$	0	$\omega_{ICE}$	$\omega_{ICE}$	0

Tabella 2.5: Valori per ogni differente modalità di funzionamento.

### 3.8. Ciclo guida utilizzato

Il ciclo guida utilizzato è il WHVC ed è riportato in figura 3.6.

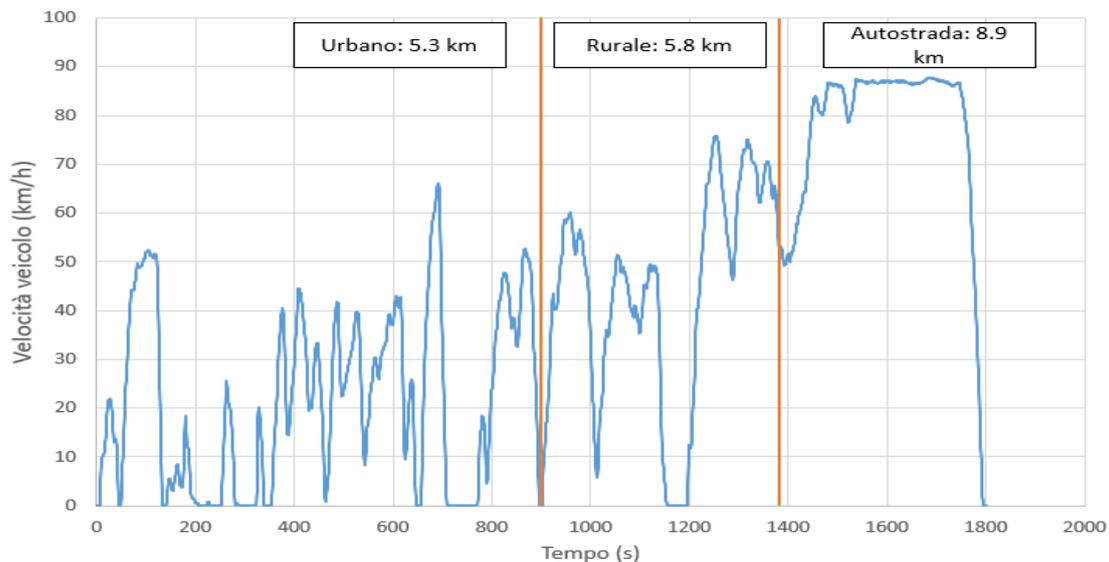


Figura 3.6: Ciclo guida WHVC.

Il ciclo WHVC nasce dalla raccolta di informazioni riguardo al modello di guida reale dei veicoli heavy duty. Di solito è utilizzato per obiettivi di ricerca al fine di confrontare le emissioni dei veicoli testati su un banco dinamometrico, da tale ciclo nasce successivamente il ciclo WHTC, con l'obiettivo di effettuare test sui motori [29].

L'intero ciclo WHVC ha una durata di 1800 secondi e considera tre differenti condizioni di guida: urbana, rurale ed autostrada. Ogni tratto stradale ha le proprie caratteristiche:

- Il tratto di guida urbano, dura 900 secondi, con una velocità media di 21,3 km/h e una velocità massima di 66.2 km/h. Il percorso tiene conto di: fermate, partenze e velocità di minimo regime;
- Il tratto di guida rurale ha una durata di 481 secondi con velocità media di 43.6 km/h e velocità massima di 75.9 km/h;
- Il tratto di guida in autostrada ha una durata di 419 secondi, con velocità media di 76.7 km/h e velocità massima di 87.8 km/h.

### 3.9. Dynamic Programming

Per ottimizzare sia il design del veicolo che la strategia operativa si utilizza l'algoritmo della dynamic programming (DP). In presenza di un problema discretizzato su N stadi, dove le fasi decisionali sono molte, l'algoritmo della Dynamic Programming è un metodo valido che permette di trovare una politica ottimale assoluta del sistema. Il sistema è caratterizzato da uno *stato*, da *decisioni* e da un obiettivo. In ogni stadio si stabilisce quale decisioni effettuare e questo influirà sulla *stato* del sistema, che evolverà nel tempo. L'obiettivo che si vuole raggiungere è la minimizzazione della *funzione di costo*, ovvero la risposta del sistema. Il compito della DP è di fornire una regola ottimale per ogni stadio k: stabilita la funzione obiettivo la DP ha il compito di decidere quale *decisione* o *controllo* attuare per raggiungere l'obiettivo prefissato, per qualunque stato del sistema. Può risolvere sia problemi deterministici che stocastici e si basa sul principio di ottimalità, formulato da R.Bellman [26]:

***“An optimal policy has the property that whatever the initial state and initial decision are, the remaining decisions must constitute an optimal policy with regard to the state resulting from the first decision”***

Sono due le principali caratteristiche del modello:

- Un sistema dinamico a tempo discreto;
- Una funzione *cost-to-go* additiva nel tempo.

#### 3.9.1. Sistema dinamico a tempo discreto

Un sistema si definisce dinamico quando il suo *stato* si evolve nel tempo secondo la legge fisica che descrive il funzionamento del sistema. Le variabili coinvolte sono: le variabili di stato, le decisioni e le variabili esterne

##### **Variabili di stato**

Le variabili di stato identificano per ogni istante di tempo  $t_k$  lo stato del sistema e potrebbero avere dei limiti riguardo ai valori da assumere.

In generale si descrive il sistema tramite un vettore delle variabili di stato  $x$   $M$ -dimensionale:

$$\bar{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_M\} \quad (3.39)$$

### Decisioni

Le decisioni rappresentano l'insieme dei possibili controlli da poter applicare al sistema, in un determinato istante  $t_k$ . Ogni decisione comporta un'evoluzione differente dello stato del sistema, determinando così diversi risultati. Anche le decisioni possono avere delle limitazioni ed in generale sono descritte da  $N$  *variabili di controllo*, il cui vettore è definito nel seguente modo:

$$\bar{u} = \{u_1, u_2, \dots, u_N\} \quad (3.40)$$

### Variabili esterne

Le variabili esterne sono variabili che influiscono sul sistema, ma non possono essere controllate. Si definisce il vettore  $w$  che tiene conto delle  $A$  variabili esterne, nel seguente modo:

$$\bar{w} = \{w_1, w_2, \dots, w_A\} \quad (3.41)$$

In definitiva il sistema dinamico a tempo discreto è definito:

$$x_{k+1} = f_k(x_k, u_k, w_k), \quad k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (3.42)$$

Indicando con  $k$  il tempo discreto,  $x_k$  il vettore degli stati del sistema,  $u_k$  il vettore dei controlli scelto,  $w_k$  il vettore delle variabili esterne ed infine si indica con  $f_k$  la legge che governa il sistema e la sua evoluzione nel tempo.

## 3.9.2. Funzione obiettivo

La funzione obiettivo detta anche cost-to-go, rappresenta la funzione da minimizzare sull'intera missione. È una funzione additiva, ovvero il costo viene accumulato nel tempo e può essere presente una sub-funzione inerenti alla fattibilità dei controlli o sui limiti delle variabili di stato. È definita nel modo seguente:

$$J_{tot} = C_N(x_N) + \sum_{k=0}^{N-1} C_k(x_k, u_k, w_k) \quad (3.43)$$

Indicando con  $C_N(x_N)$  il costo finale di fine processo che è funzione solo dello stato e con  $C_k(x_k, u_k, w_k)$  il costo istantaneo di transizione riferito al tempo  $t_k$ .

### 3.9.3. Algoritmo della Dynamic Programming

Il problema di ottimizzazione della funzione obiettivo si risolve attraverso due algoritmi: *backward* e *forward*. Nel primo algoritmo la DP inizia ad operare dall'ultima stadio del sistema, tornando indietro fino a raggiungere lo stadio iniziale. Per esempio, per un determinato stadio  $k$ , si definisce la funzione ottimale di cost-to go  $J_{opt}(x_k)$ , la funzione calcolata seguendo una strategia di controllo ottimale dalla stadio  $k$  allo stadio  $N$ , iniziando ad operare dallo stadio  $x(k)$ . La determinazione della funzione  $J_{opt}(x_k)$  deriva dalla funzione ottimale cost-to-go calcolata per lo stadio  $t_{k+1}$ . Il problema di minimizzazione da risolvere è:

$$J_{opt}(x_k) = \min \left( J_{opt}(x_{k+1}) + C_k(x_k, u_k, w_k) \right), \quad \text{con } k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (3.44)$$

Tale problema dipende solo dal controllo  $u_k$  al tempo  $t_k$ . La risoluzione del problema al tempo  $t_k$  deriva dalla scelta dell'algoritmo riguardo al miglior controllo da attuare per ogni stato iniziale  $x_k$ . Dunque la politica ottimale definisce, per ogni istante di tempo  $t_k$  ( $0 \leq k \leq N-1$ ), la migliore decisione, per ogni possibile stato del sistema che potrebbe verificarsi. Il problema continua in modo iterativo fino a raggiungere lo stadio iniziale, dove è nota la variabile di stato  $x(0)=x_0$ . Dunque alla fine della operazione l'utente saprà per ogni stadio quale decisioni attuare per minimizzare la funzione di costo.

L'algoritmo di forward deriva dall'algoritmo di backward, stavolta il punto di partenza è lo stato iniziale  $x_0$  al tempo  $t_0$ , dove si proseguirà attuando per ogni stadio le politiche calcolate dall'algoritmo precedente. L'algoritmo terminerà una volta giunti all'ultimo stadio del sistema. Il set di controlli  $u = \{u_0, u_1, \dots, u_{N-1}\}$  che minimizzano la funzione di costo è il risultato dell'algoritmo *forward*.

Nel seguente lavoro tesi si definiscono:

- gli input: la velocità e la potenza;
- le variabili di controllo: il rapporto di trasmissione e i powerflow;
- le variabili di stato: lo stato del motore e della batteria.

Infine la funzione di costo che si intende minimizzare è la CO<sub>2</sub> tank-to-wheel, ovvero le emissioni calcolate solo considerando la combustione del carburante nel veicolo.

## 4. Ottimizzazione di design

Per l'ottimizzazione di design si utilizzeranno il tool di simulazione della Dynamic Programming e il tool di Matlab Model-Based Calibration. Affiancheremo nella ricerca un metodo fisico, che calcolerà le reali emissioni di CO<sub>2</sub>, un metodo statistico che genererà le possibili combinazioni di layout che si andranno ad analizzare e infine un ottimizzatore basato su logiche matematiche per un'ulteriore ottimizzazione del nostro obiettivo.

Per avere un'idea generale ed immediata dei passaggi svolti, si schematizza la procedura tramite il flow chart illustrato in figura 4.1.

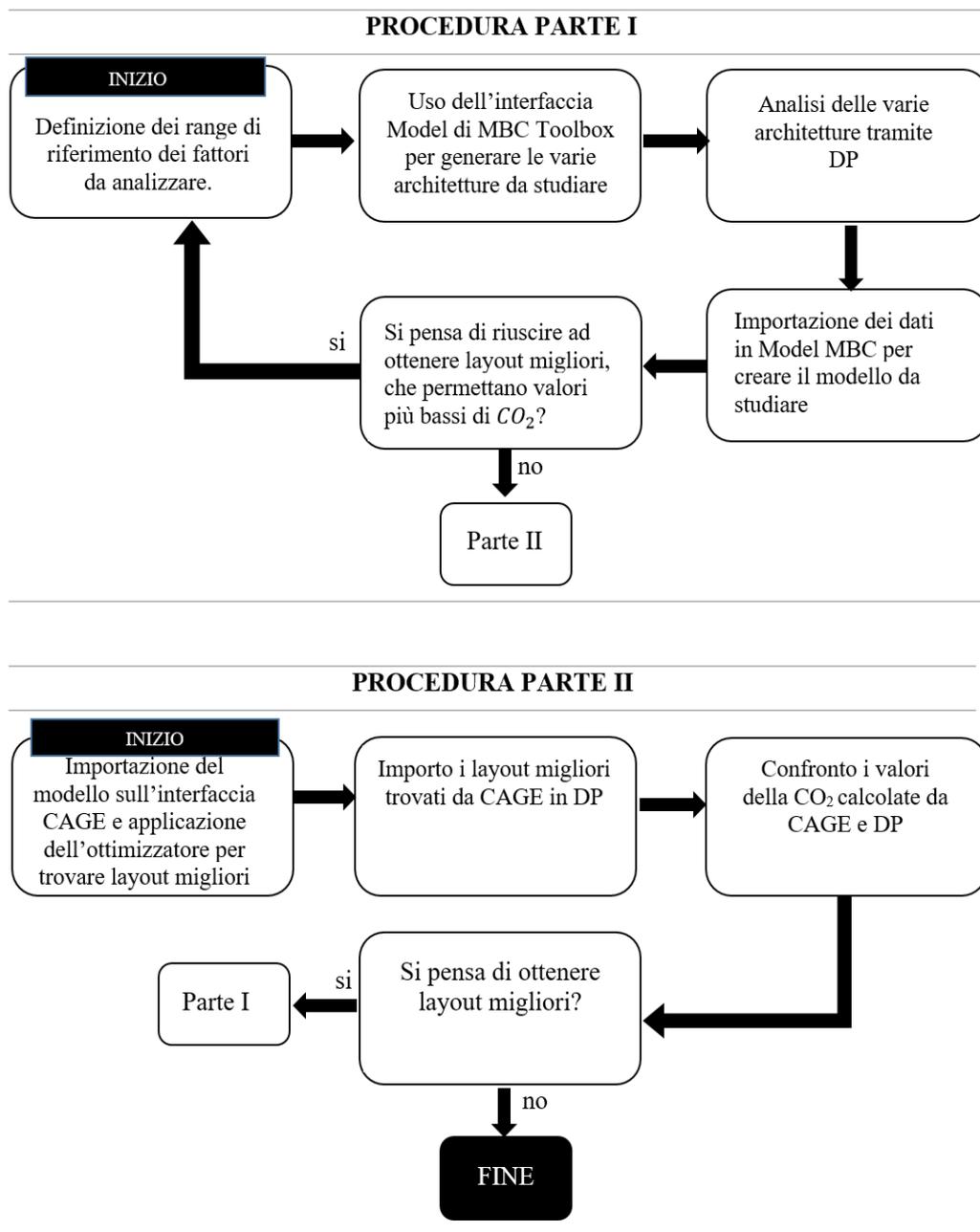


Figure 4.1: Schematizzazione della procedura utilizzata.

I fattori che si analizzeranno sono sei: cilindrata del motore termico, PE, macchina elettrica, torque coupling, final drive e C\_rate. Ogni fattore è stato ampiamente analizzato nel capitolo precedente. Si considerano inizialmente dei range molto ampi in quanto non si conosce bene l'influenza che ogni singolo fattore abbia sulla risposta, ovvero sulla CO<sub>2</sub>.

Si schematizza il sistema da studiare in figura 4.2.

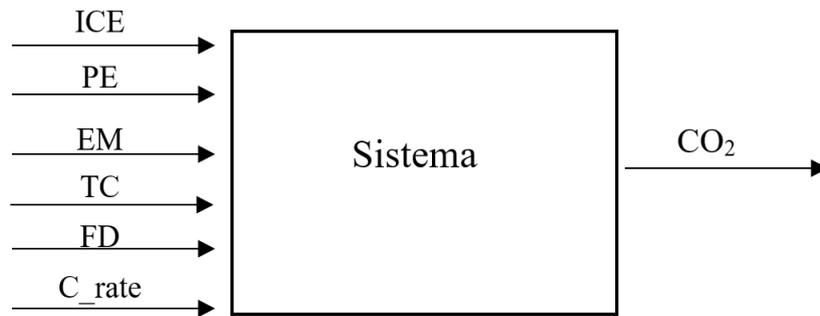


Figura 4.2: Schematizzazione del sistema studiato.

Il range di riferimento iniziale è:

RANGE DI RIFERIMENTO DEI FATTORI

ICE [L]	2.5-5
PE [kW/kWh]	5-30
EM [kW]	35-125
TC [-]	2-8
FD [-]	2-8
C_rate	3-10

Tabella 4.1: Range di riferimento iniziale.

Per l'ottimizzazione di design si utilizzerà il metodo statistico Design of Experiment (DOE), la cui logica è implementata nell'interfaccia Model di Model-Based-Calibration. L'interfaccia Model genererà tutte le possibili combinazioni di design.

Come spiegato nel capitolo 2, il primo passo da effettuare è stabilire la tecnica di progettazione con cui vogliamo generare le varie combinazioni di design. Data la nostra scarsa conoscenza del sistema e dati i numerosi fattori da studiare si è scelto di applicare la tecnica *Space filling*, che si rivela adatta per questo tipo di problemi.

Il passo successivo è la scelta del piano di lavoro e il numero di punti da distribuire nel piano. Si è scelto di utilizzare il piano *Sobol Sequence* e di studiare inizialmente 300 punti, in modo da analizzare pienamente il piano di lavoro e avere un'idea sulla direzione con cui condurre le prove successive. L'interfaccia Model genererà 300 possibili combinazioni di design che si andranno successivamente ad analizzare tramite DP. Le possibili combinazioni di design verranno denominate Variation List (VL). In figura 4.3 si mostra come i punti scelti vengono

distribuiti nel piano di lavoro e in figura 4.4 si riportano le combinazioni di design della prima prova generate dal tool (per motivi di spazio si riportano solo le prime 31 combinazioni).

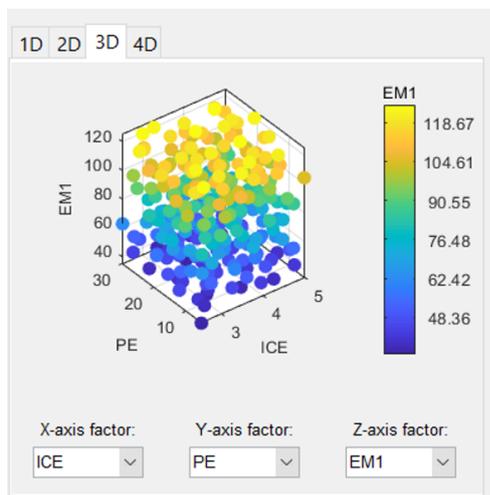
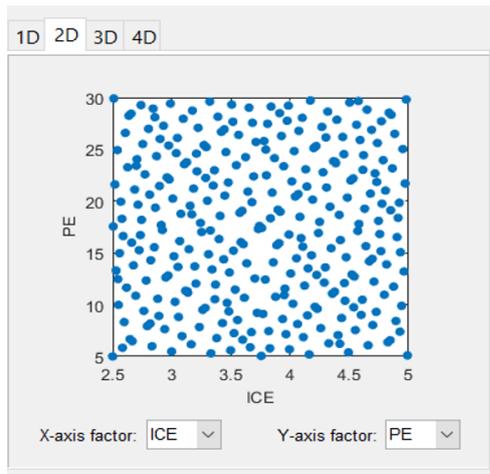


Figura 4.3: Distribuzione dei punti nel piano di lavoro.

Design Table						
	ICE	PE	EM1	TC	FD	Cmax
1	2,5	5	35	2	2	3
2	3,75	17,5	80	5	5	6,5
3	3,125	23,75	57,5	6,5	3,5	8,25
4	4,375	11,25	102,5	3,5	6,5	4,75
5	2,812	20,625	113,75	7,25	5,75	3,875
6	4,062	8,125	68,75	4,25	2,75	7,375
7	3,438	14,375	91,25	2,75	7,25	9,125
8	4,688	26,875	46,25	5,75	4,25	5,625
9	2,656	28,438	96,875	3,875	3,125	3,438
10	3,906	15,938	51,875	6,875	6,125	6,938
11	3,281	9,688	119,375	5,375	4,625	8,688
12	4,531	22,188	74,375	2,375	7,625	5,188
13	2,969	12,812	63,125	6,125	5,375	4,312
14	4,219	25,312	108,125	3,125	2,375	7,812
15	3,594	19,062	40,625	4,625	6,875	9,562
16	4,844	6,562	85,625	7,625	3,875	6,062
17	2,578	18,281	71,562	3,312	4,812	4,969
18	3,828	5,781	116,562	6,312	7,812	8,469
19	3,203	12,031	49,062	7,812	3,312	6,719
20	4,453	24,531	94,062	4,812	6,312	3,219
21	2,891	8,906	82,812	7,062	7,062	5,844
22	4,141	21,406	37,812	4,062	4,062	9,344
23	3,516	27,656	105,312	2,562	5,562	7,594
24	4,766	15,156	60,312	5,562	2,562	4,094
25	2,734	16,719	110,938	4,438	3,688	5,406
26	3,984	29,219	65,938	7,438	6,688	8,906
27	3,359	22,969	88,438	5,938	2,188	7,156
28	4,609	10,469	43,438	2,938	5,188	3,656
29	3,047	26,094	54,688	5,188	7,438	6,281
30	4,297	13,594	99,688	2,188	4,438	9,781
31	3,672	7,344	77,188	3,688	5,938	8,031

Figura 4.4: Generazione della Variation List.

In figura 4.3 è riportata una vista del piano sperimentale per rendere l'idea di come vengono distribuiti i punti.

## 4.1. Procedura di ottimizzazione parte I

La procedura di ottimizzazione parte I è articolata in più prove, l'obiettivo è restringere quanto più possibile il range di riferimento in modo da avere già un'idea della probabile architettura ottimale o comunque individuare un range ottimale di architetture.

### 1° Prova

Si riporta in tabella 4.2 il range di riferimento iniziale che sarà il punto di partenza per l'ottimizzazione. Dopo aver utilizzato l'interfaccia Model e avere generato la prima Variation

List composta da 300 architetture differenti secondo il range di riferimento, le architetture sono state analizzate tramite la Dynamic Programming (DP).

*RANGE DI RIFERIMENTO DEI FATTORI*

ICE [L]	2.5-5
PE [kW/kWh]	5-30
EM [kW]	35-125
TC [-]	2-8
FD [-]	2-8
C_rate	3-10

*Tabella 4.1: Range di riferimento iniziale.*

Tramite DP si è potuto verificare che le architetture fossero in grado di portare al termine il ciclo di guida scelto, ma inoltre si è potuto calcolare l'esatta emissione di CO<sub>2</sub> tank-to-wheel. Si riportano in tabella 4.3 le migliori 16 architetture calcolate tramite DP, classificate in base al valore della funzione obiettivo CO<sub>2</sub>.

*1° PROVA RISULTATI DP*

<i>Classifica</i>	<b>ICE [L]</b>	<b>PE</b>	<b>EM [kW]</b>	<b>TC [-]</b>	<b>FD [-]</b>	<b>Crate</b>	<b>Co<sub>2</sub>tw</b>
1	2,58	5,83	80,18	7,33	2,76	9,36	400,40
2	2,88	10,57	112,70	6,43	2,63	7,57	404,83
3	2,71	19,65	103,20	5,70	2,14	8,63	407,17
4	2,78	12,32	69,80	4,04	2,21	9,48	409,50
5	2,55	9,98	100,74	3,48	3,52	7,95	410,37
6	2,56	14,96	75,08	6,83	3,27	9,07	410,79
7	2,82	14,28	96,52	4,70	3,05	6,31	412,50
8	3,09	6,95	106,72	2,84	2,84	7,05	412,58
9	2,63	23,26	109,18	2,16	3,34	9,92	415,09
10	3,13	11,30	94,24	2,64	2,57	5,64	416,32
11	3,07	16,13	101,80	7,48	2,42	5,02	417,45
12	2,50	5,00	35,00	2,00	2,00	3,00	417,83
13	3,53	7,25	82,46	5,26	2,49	9,59	419,52
14	3,26	9,49	66,64	3,27	2,33	5,35	420,90
15	3,33	5,29	61,37	6,10	3,15	5,76	423,84
16	3,17	28,73	123,24	7,98	2,02	6,20	424,69

*Tabella 4.3: Migliori 16 architetture individuate dalla DP.*

Il passaggio successivo consiste nell'importare tutti risultati ottenuti dalla DP nell'interfaccia Model per creare il modello della nostra analisi. Si è scelto di utilizzare per tutte le prove il modello di processo gaussiano, consigliato nel caso di scarsa conoscenza del sistema. Si riporta una vista del modello in figura 4.5.

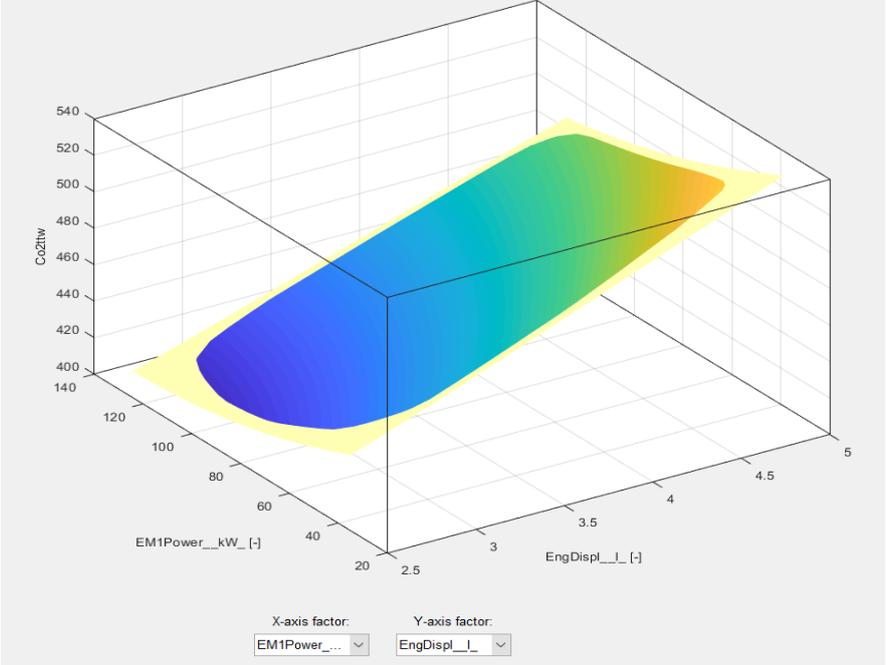


Figura 4.5: Rappresentazione grafica di una vista del modello dalle 1° prova.

Il valore del coefficiente di correlazione multipla  $R^2$  è pari ad 1, quindi significa che il nostro modello si adatta molto bene ai dati sperimentali. Il modello crea una correlazione tra i fattori e la risposta. In figura 4.5 si riporta il grafico che illustra quanto i valori osservati siano in linea con i valori predetti. In generale, più i punti sono distanti dalla linea di previsione, peggiore è la previsione del modello. In questo caso, come si può vedere dal grafico, il modello si adatta molto bene.

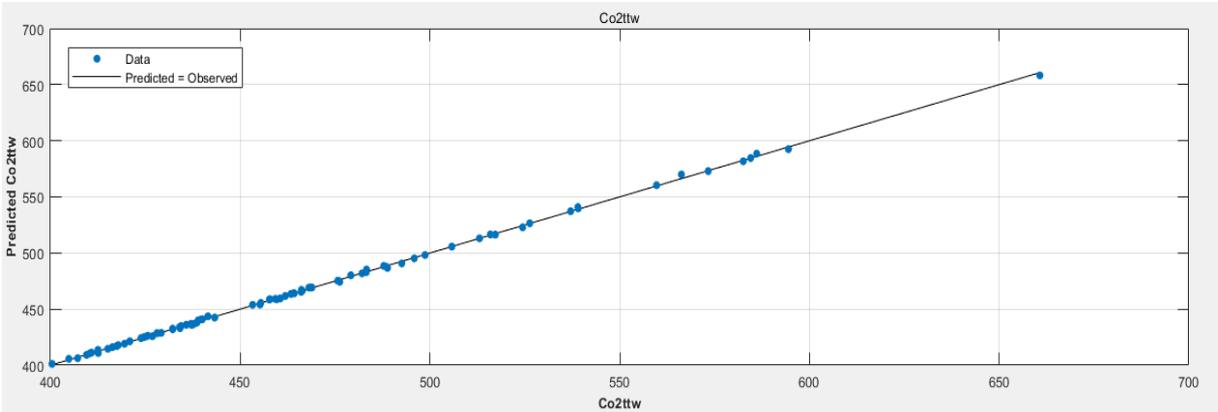


Figura 4.6: Grafico di confronto tra i valori osservati e predetti.

## 2° Prova

Nonostante il modello si adatti molto bene agli input, tuttavia si pensa sia possibile migliorare ulteriormente la CO<sub>2</sub>. Per la definizione nel nuovo range di riferimento, si individuano i valori massimi e minimi di ciascun componente tra le migliori 16 architetture della prova precedente e si stabilisce il nuovo range. In tabella 4.4 si mostrano i nuovi range di riferimento.

### RANGE DI RIFERIMENTO DEI FATTORI

ICE [L]	2.5-3.60
PE [kW/kWh]	5-28.80
EM [kW]	35-123.30
TC [-]	2-8
FD [-]	2-3.60
C_rate	3-9.95

Tabella 4.4: Range di riferimento 2° prova.

La procedura si ripete: si impostano i range all'interno dell'interfaccia Model (utilizzando sempre la stessa tecnica e lo stesso piano di lavoro) e si generano le nuove 300 architetture da studiare. Le architetture si riportano in DP come input e si lancia il tool. Una volta acquisiti i risultati, le architetture si riordinano in ordine crescente di CO<sub>2</sub> e si analizzano le prime 16:

### 2° PROVA RISULTATI DP

Classifica	ICE [L]	PE	EM [kW]	TC [-]	FD [-]	Crate	Co <sub>2ttw</sub>
1	2,54	5,79	79,32	7,33	2,20	9,31	399,55
2	2,54	8,16	117,09	4,11	2,81	6,31	399,76
3	2,51	12,90	104,33	7,65	2,74	5,90	399,90
4	2,50	16,95	115,19	7,14	2,55	7,36	400,29
5	2,67	10,30	111,23	6,43	2,17	7,53	400,61
6	2,52	9,74	99,50	3,48	2,41	7,91	400,93
7	2,63	7,79	93,64	5,89	2,79	6,64	401,13
8	2,57	6,39	122,96	6,57	3,18	4,98	401,75
9	2,55	11,32	88,81	5,47	3,13	7,45	403,79
10	2,53	14,48	74,32	6,83	2,34	9,03	404,22
11	2,84	9,46	117,78	5,38	2,70	8,65	404,45
12	2,59	18,95	101,91	5,70	2,04	8,59	405,37
13	2,76	6,86	105,36	2,84	2,22	7,02	405,62
14	2,64	13,83	95,36	4,70	2,28	6,28	405,85
15	2,65	5,93	70,18	5,05	2,56	3,49	406,16
16	2,79	6,12	97,09	4,53	2,88	4,19	406,39

Tabella 4.5: migliori 16 architetture individuate dalle DP.

Si importano tutti i risultati ottenuti tramite DP nell'interfaccia Model per la creazione del modello. In figura 4.6 si riporta una vista.

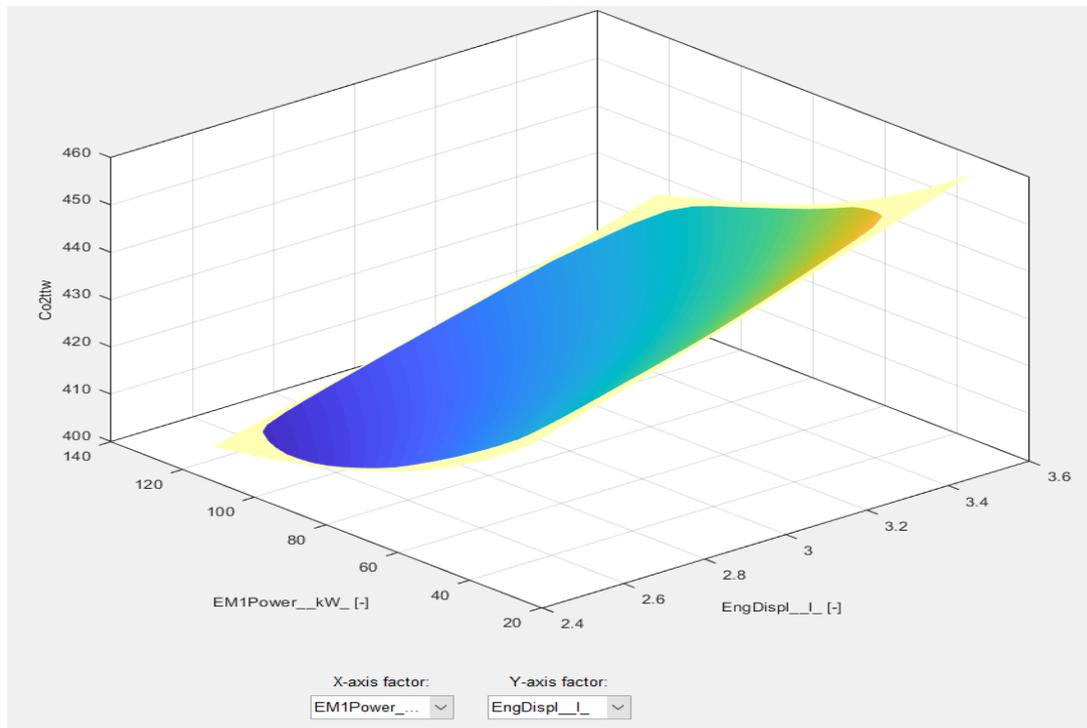


Figura 4.6: Rappresentazione grafica di una vista del modello dalle 2° prova.

Il valore del coefficiente di correlazione multipla  $R^2$  è pari a 0.998, quindi il modello continua ad adattarsi molto bene ai dati di input. In figura 4.7 si riporta il grafico relativo al confronto tra i valori osservati e i valori predetti.

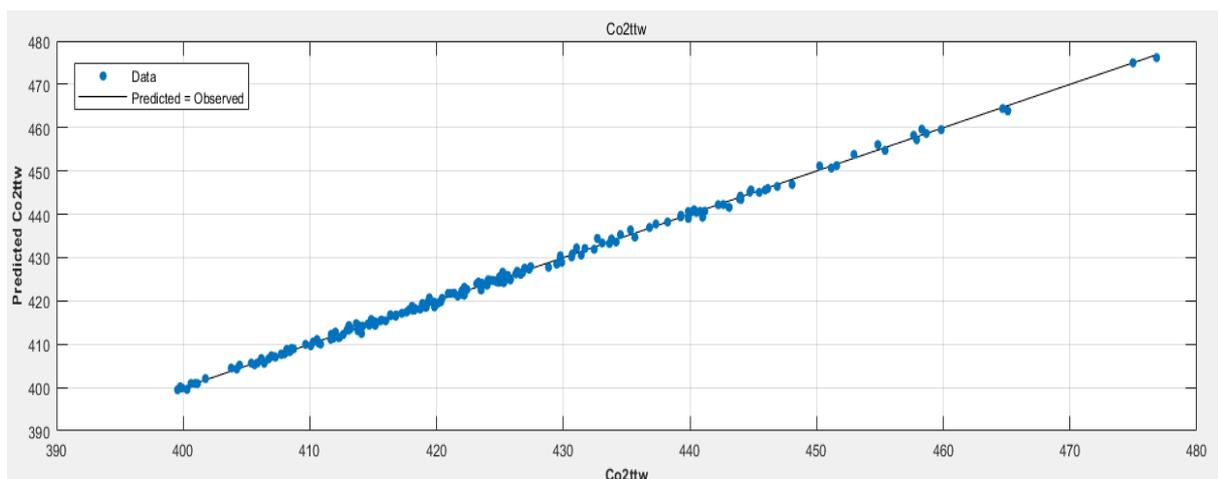


Figura 4.7: Grafico di confronto tra i valori osservati e predetti.

### 3° Prova

Nonostante il modello continui ad approssimare molto bene i dati di input, si è deciso di continuare ulteriormente con la procedura di ottimizzazione. Dalla vista del modello della seconda prova, si può notare che per quanto riguarda la macchina elettrica e la cilindrata del motore, i valori più bassi di CO<sub>2</sub> si hanno per valori intorno a 100-120kW per la macchina elettrica e circa 2.5-2.7 per la cilindrata del motore termico.

Si continua la procedura di ottimizzazione sempre tenendo conto delle 16 migliori architetture della prova precedente, considerando i valori massimi e minimi per ogni componente. I nuovi range di riferimento sono:

RANGE DI RIFERIMENTO DEI FATTORI

ICE [L]	2.5-2.85
PE [kW/kWh]	5.70-19
EM [kW]	70.10-123
TC [-]	2.80-7.65
FD [-]	2-3.20
C_rate	3.40-9.35

Tabella 4.6: Range di riferimento 3° prova.

La procedura è sempre uguale, si genera la Variation List e si analizza tramite DP. Le migliori 16 architetture sono riportate in tabella 4.7.

3° PROVA RISULTATI DP

Classifica	ICE [L]	PE	EM [kW]	TC [-]	FD [-]	Crate	Co <sub>2ttw</sub>
1	2,50	10,12	111,63	7,37	2,56	5,89	397,60
2	2,50	12,38	118,14	6,96	2,41	7,13	397,64
3	2,52	6,48	122,79	6,49	2,89	5,10	398,02
4	2,51	6,14	96,65	7,11	2,15	8,80	398,45
5	2,55	8,66	115,77	6,38	2,13	7,28	398,65
6	2,54	7,26	105,23	5,94	2,59	6,51	398,82
7	2,52	9,23	102,34	5,60	2,84	7,21	398,91
8	2,51	11,00	93,66	6,70	2,25	8,56	399,01
9	2,51	7,47	119,28	4,51	2,61	6,24	399,37
10	2,51	8,35	108,74	3,99	2,30	7,61	399,58
11	2,51	16,30	120,52	6,06	2,96	8,89	399,83
12	2,56	7,10	80,64	7,18	2,72	8,54	399,89
13	2,61	8,19	119,69	5,53	2,53	8,23	399,98

14	2,55	10,64	106,26	4,98	2,21	6,21	400,17
15	2,53	11,93	114,73	4,77	2,34	5,45	400,18
16	2,59	11,21	111,01	5,87	2,87	9,02	400,39

Tabella 4.7: migliori 16 architetture individuate dalle DP.

Si importano tutti risultati ottenuti tramite DP nell'interfaccia Model per la creazione del modello. In figura 4.8 si riporta una vista.

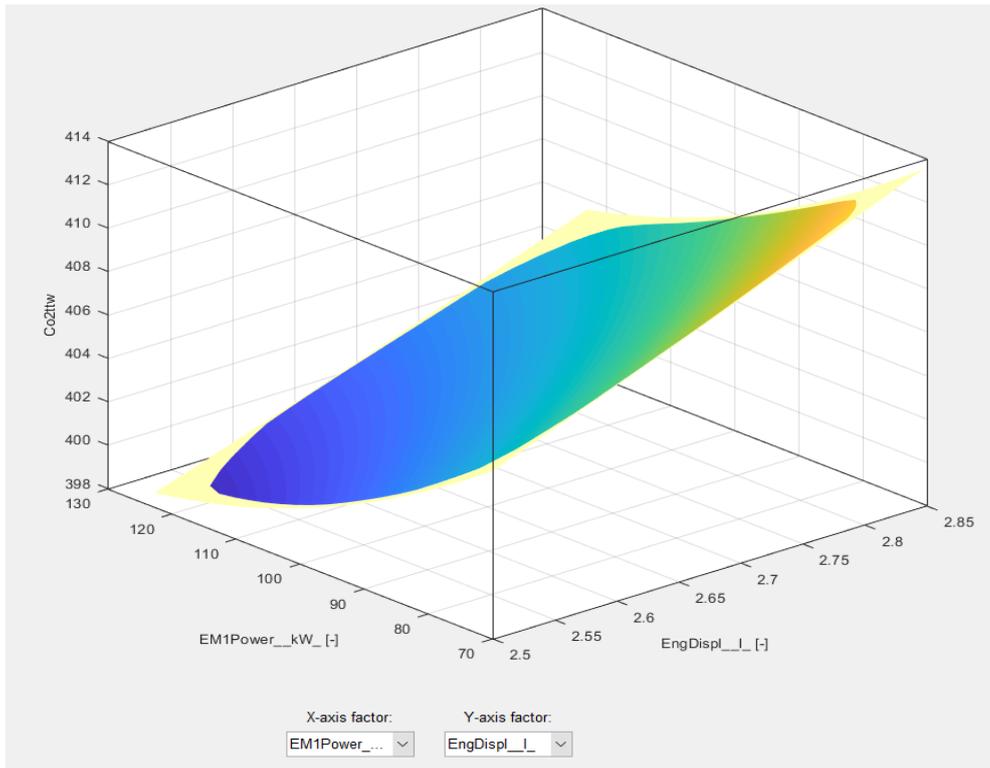


Figura 4.8: Rappresentazione grafica di una vista del modello dalle 3° prova.

Il valore del coefficiente di correlazione multipla  $R^2$  è pari a 0.998, quindi il modello continua ad adattarsi molto bene ai dati di input. In figura 4.9 si riporta il grafico relativo al confronto tra i valori osservati e i valori predetti.

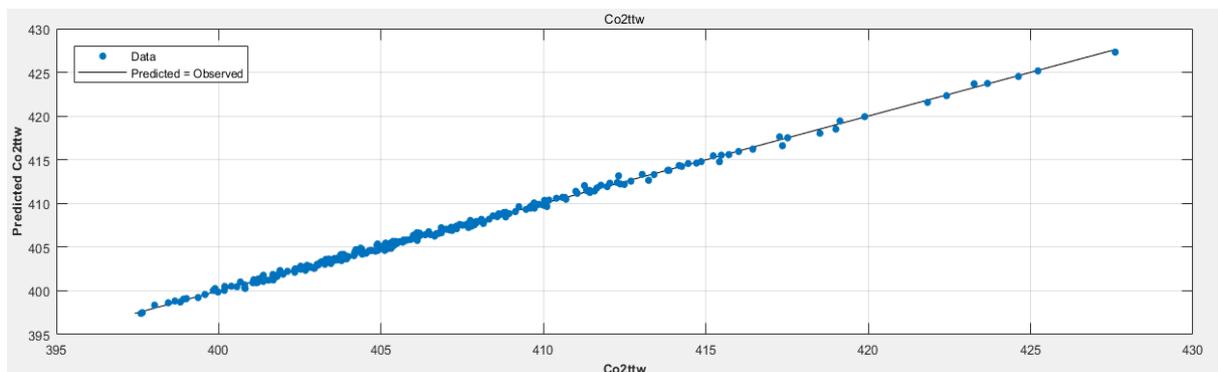


Figura 4.9: Grafico di confronto tra i valori osservati e predetti

#### 4° Prova

Anche dopo la terza prova, il modello continua ad approssimare molto bene i dati di input. Tuttavia si pensa di poter ulteriormente migliorare i valori di CO<sub>2</sub>, quindi si continua con la procedura di ottimizzazione. Si osservano sempre i valori massimi e minimi di ogni componente delle prime 16 architetture per la definizione dei nuovi range di riferimento (tabella 4.8).

RANGE DI RIFERIMENTO DEI FATTORI

ICE [L]	2.5-2.61
PE [kW/kWh]	6.10-16.30
EM [kW]	80.6-122.80
TC [-]	3.90-7.40
FD [-]	2.10-3
C_rate	5-9.10

Tabella 4.8 Range di riferimento 4° prova.

La procedura della quarta prova è uguale alle precedenti, con l'unica differenza riguardo la scelta del numero dei punti. Si è scelto di utilizzare 220 punti, dato che il range dei fattori è ridotto, quindi è ridotto il piano di lavoro ed inoltre è ormai nota la direzione da prendere per ulteriori miglioramenti di CO<sub>2</sub>. Una volta generata la Variation List, si analizza tramite DP. In tabella 4.9 si riportano le migliori 16 architetture.

4° PROVA RISULTATI DP

Classifica	ICE [L]	PE	EM [kW]	TC [-]	FD [-]	Crate	Co <sub>2ttw</sub>
1	2,50	9,49	113,73	7,19	2,52	6,71	396,94
2	2,51	6,70	122,64	6,57	2,76	6,17	397,26
3	2,59	8,29	118,68	7,11	2,29	6,30	397,81
4	2,52	10,64	111,92	7,10	2,16	6,19	397,96
5	2,55	9,77	118,18	6,91	2,20	5,45	397,96
6	2,51	7,30	108,62	6,17	2,54	7,15	398,01
7	2,50	10,16	99,39	6,72	2,29	8,56	398,02
8	2,51	8,81	106,32	5,92	2,73	7,63	398,04
9	2,52	10,04	119,34	5,86	2,83	7,13	398,05
10	2,52	7,69	103,02	6,85	2,86	6,67	398,15
11	2,53	8,01	120,16	5,87	2,49	8,33	398,16
12	2,54	6,34	115,22	7,15	2,85	5,99	398,26
13	2,54	12,44	120,00	6,35	2,48	7,96	398,27
14	2,50	7,45	119,83	5,13	2,56	6,95	398,28
15	2,50	14,23	120,82	6,25	2,82	8,78	398,33
16	2,53	10,32	113,24	6,11	2,75	8,88	398,38

Tabella 4.9: migliori 16 architetture individuate dalle DP.

Si importano tutti i risultati ottenuti tramite DP nell'interfaccia Model per la creazione del modello. In figura 4.10 si riporta una vista.

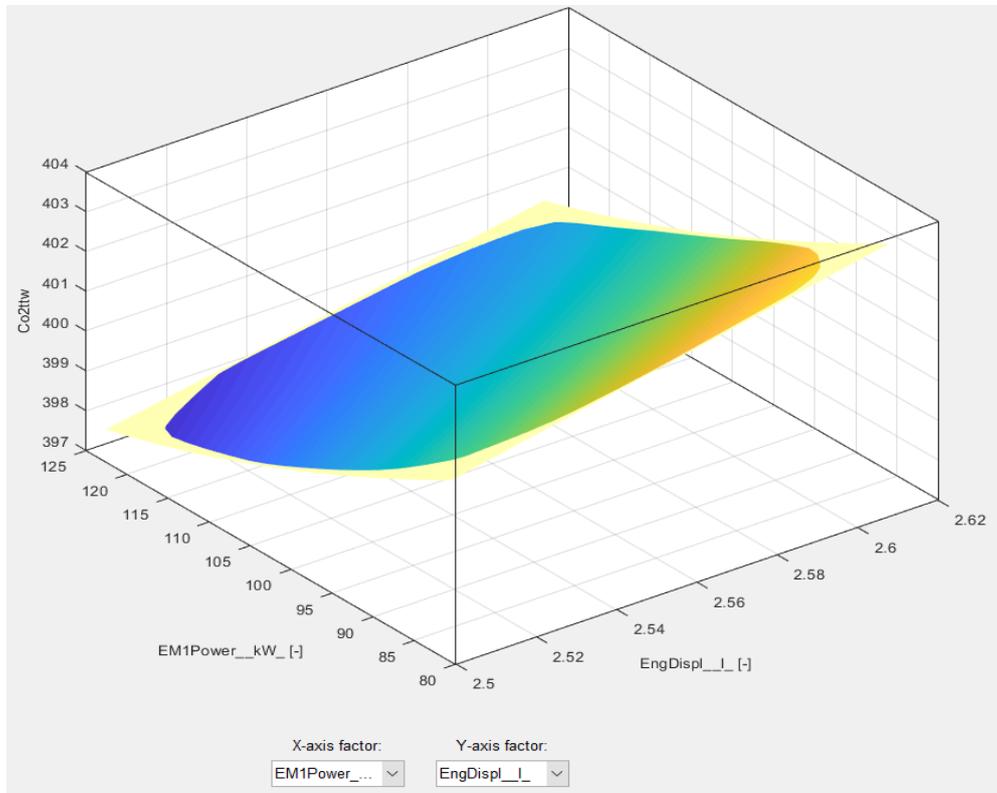


Figura 4.10: Rappresentazione grafica di una vista del modello dalle 4° prova.

Il valore del coefficiente di correlazione multipla  $R^2$  è pari a 0.991, quindi il modello continua ad adattarsi molto bene ai dati di input. In figura 4.11 si riporta il grafico relativo al confronto tra i valori osservati e i valori predetti.

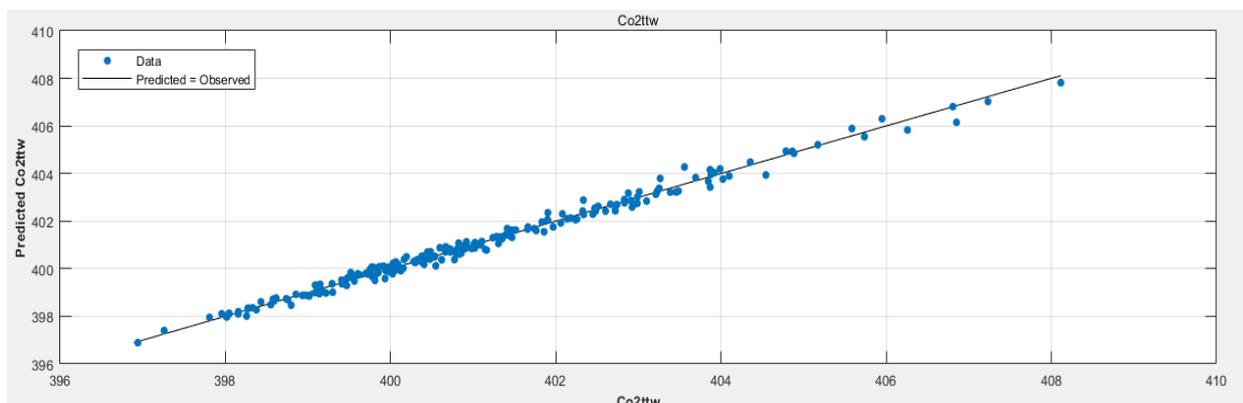


Figura 4.11: Grafico di confronto tra i valori osservati e predetti.

## 5° Prova

Dopo quattro prove, il modello continua ad approssimare molto bene i dati di input. I risultati ottenuti sono molto soddisfacenti, così come l'individuazione di un ipotetico range di riferimento ottimale, tuttavia si è fiduciosi di poter migliorare ulteriormente con un'altra prova. I nuovi range di riferimento, sulla base dei risultati precedenti, sono:

*RANGE DI RIFERIMENTO DEI FATTORI*

ICE [L]	2.5-2.6
PE [kW/kWh]	6.30-14.25
EM [kW]	99.35-122.70
TC [-]	5.10-7.20
FD [-]	2.10-2.90
C_rate	5.40-8.90

*Tabella 4.10 Range di riferimento 5° prova.*

Si continuano ad analizzare 220 punti distribuiti nel piano sperimentale e una volta generata la Variation List verrà studiata tramite DP. Le migliori 16 architetture della prova saranno considerate le architetture ottimali di tutta la procedura effettuata, in quanto consentano di ottenere i valori più bassi di CO<sub>2</sub> e si riportano in tabella 4.11.

*5° PROVA RISULTATI DP*

<i>Classifica</i>	<b>ICE</b> <b>[L]</b>	<b>PE</b>	<b>EM</b> <b>[kW]</b>	<b>TC</b> <b>[-]</b>	<b>FD</b> <b>[-]</b>	<b>Crate</b>	<b>Co<sub>2</sub>ttw</b>
1	2,50	8,94	117,68	7,08	2,47	6,86	396,73
2	2,51	6,77	122,61	6,70	2,69	6,40	397,14
3	2,52	7,54	111,75	6,87	2,78	6,82	397,20
4	2,50	12,64	121,61	6,51	2,74	8,63	397,20
5	2,50	9,47	109,75	6,79	2,27	8,44	397,22
6	2,51	7,23	114,86	6,46	2,49	7,23	397,43
7	2,53	9,59	117,41	6,43	2,68	8,71	397,53
8	2,52	9,37	120,78	6,27	2,75	7,22	397,53
9	2,51	10,03	119,05	5,95	2,33	6,60	397,57
10	2,52	9,84	116,68	7,02	2,16	6,41	397,57
11	2,50	8,41	113,58	6,31	2,66	7,64	397,63
12	2,55	9,16	120,15	6,90	2,19	5,78	397,64
13	2,54	11,24	121,15	6,57	2,44	7,93	397,71
14	2,54	6,49	118,50	7,05	2,77	6,25	397,71
15	2,50	7,36	121,06	5,84	2,51	7,07	397,73
16	2,53	7,79	121,24	6,28	2,45	8,24	397,79

*Tabella 4.11: le migliori architetture non solo della prova ma di tutta la procedura.*

Il modello relativo alla quinta prova è riportato in figura 4.12.

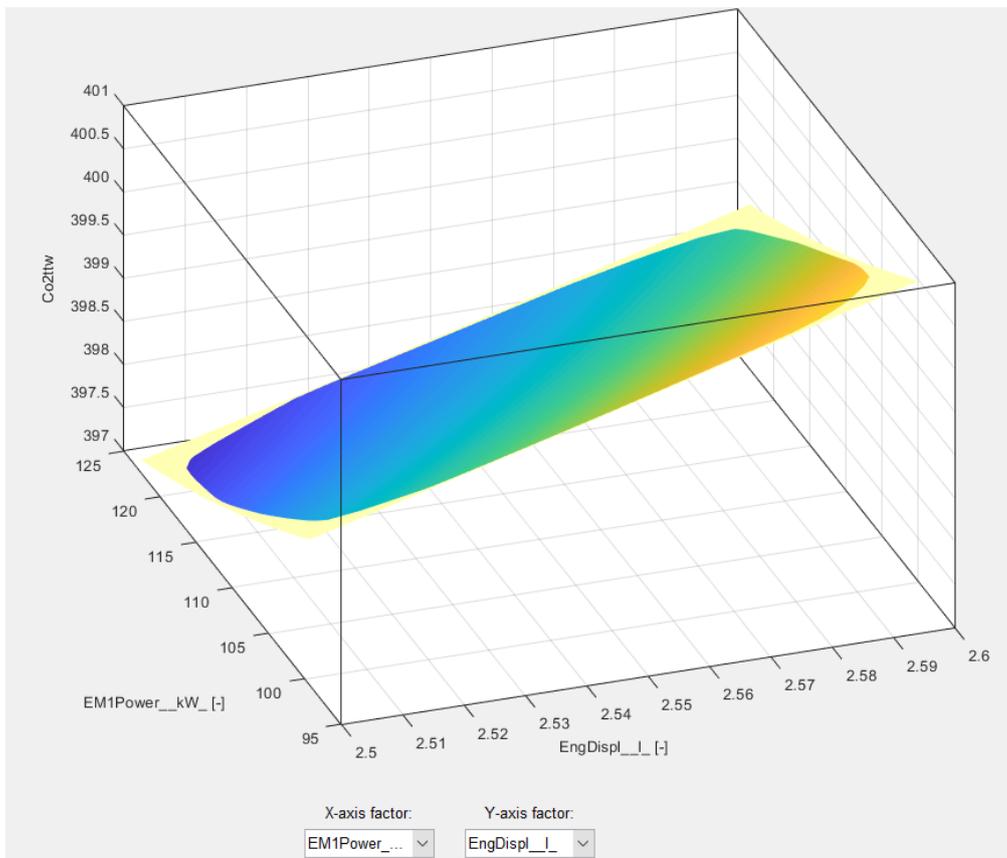


Figura 4.12: Rappresentazione grafica di una vista del modello dalle 5° prova

Il valore del coefficiente di correlazione multipla  $R^2$  è pari a 0.981, quindi il modello si adatta un po' meno ai dati input, ma comunque è un ottimo risultato. In figura 4.13 si riporta il grafico relativo al confronto tra i valori osservati e i valori predetti.

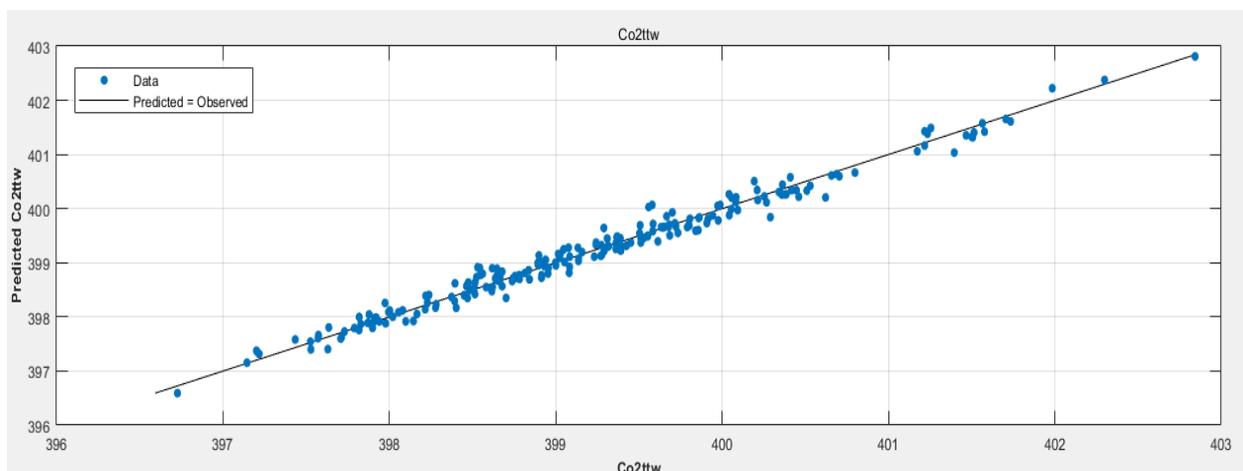


Figura 4.13: Grafico di confronto tra i valori osservati e predetti.

## 4.2. Procedura ottimizzazione parte II

La seconda parte dell'ottimizzazione di design consiste nella ricerca dell'architettura ottimale assoluta. Nonostante gli ottimi risultati raggiunti fino adesso, si pensa che nel modello vi sia l'esistenza di un'ulteriore architettura che possa minimizzare ulteriormente la CO<sub>2</sub>. L'obiettivo della seconda parte dell'ottimizzazione è quindi di analizzare le architetture direttamente sul modello e di provare a trovare l'architettura che emetta il valore di minimo assoluto della CO<sub>2</sub>. Per fare ciò si utilizzerà la seconda interfaccia di Model-Based Calibration: CAGE, ed in particolare si utilizzerà il suo ottimizzatore.

L'ottimizzatore CAGE richiede dei punti da cui partire all'interno del modello poiché la sua funzione non è trovare il minimo assoluto di un modello ma bensì i minimi locali, infatti una volta stabili i punti sarà in grado di trovare il minimo locale più vicino ad ogni punto di partenza. Sarà l'utente a dover impostare differenti punti all'interno del modello per tentare di trovare il minimo assoluto. Si utilizzerà l'algoritmo *foptcon*, consigliato per la ricerca dell'ottimo locale, in quanto rispetto agli altri algoritmi forniti dal tool è il più accurato.

La ricerca del minimo assoluto sarà effettuata sul modello della prova cinque, in quanto le architetture ottenute sono considerate le migliori della procedura. Si importerà il modello su CAGE e si stabiliranno diversi punti da cui partire per la ricerca. Il numero di punti di partenza sono 24 e ogni otto punti cambia il criterio scelto per la selezione:

- I Blocco: si considerano dei valori fuori dal range di riferimento;
- II Blocco: si considerano dei valori all'interno del range di riferimento;
- III Blocco: si utilizzano i valori delle prime 8 architetture migliori.

Successivamente, individuati i valori delle architetture che consentano un ulteriore miglioramento dell'obiettivo, si effettuerà un confronto tra i valori di CO<sub>2</sub> calcolati da CAGE e i valori di CO<sub>2</sub> calcolate dalla DP.

### Lanci effettuati per la ricerca dei minimi locali

Si riporta in tabella 4.12 il range di riferimento della 5° prova:

RANGE DI RIFERIMENTO DEI FATTORI	
ICE [L]	2.5-2.6
PE [kW/kWh]	6.30-14.25
EM [kW]	99.35-122.70
TC [-]	5.10-7.20
FD [-]	2.10-2.90
C_rate	5.40-8.90

Tabella 4.12: Range di riferimento 5° prova.

E si riportano in tabella 4.13 i valori di partenza scelti per la ricerca dei minimi locali.

*Punti di partenza per la ricerca dei minimi locali*

<i>I Blocco</i>	<b>ICE [L]</b>	<b>PE</b>	<b>EM [kW]</b>	<b>TC [-]</b>	<b>FD [-]</b>	<b>Crate</b>
1	1.5	2	50	2	1.5	2
2	2	3	70	3	2	3
3	3	5	80	4	3	4
4	4	15	90	8	6	5
5	5	18	130	10	8	9
6	10	20	140	15	10	12
7	15	25	160	20	15	20
8	20	30	200	30	20	30
<i>II Blocco</i>	<b>ICE [L]</b>	<b>PE</b>	<b>EM [kW]</b>	<b>TC [-]</b>	<b>FD [-]</b>	<b>Crate</b>
9	2,51	6,5	99,5	5,2	2,2	5,5
10	2,52	7,5	100	5,5	2,3	5,8
11	2,53	8,5	104	5,8	2,4	6
12	2,54	9,5	106	6	2,5	6,5
13	2,55	10,5	110	6,5	2,6	7
14	2,56	11,5	115	6,8	2,7	7,5
15	2,58	12,5	120	7	2,8	8
16	2,59	13,5	121	7,1	2,85	8,5
<i>III Blocco</i>	<b>ICE [L]</b>	<b>PE</b>	<b>EM [kW]</b>	<b>TC [-]</b>	<b>FD [-]</b>	<b>Crate</b>
17	2,50	8,94	117,68	7,08	2,47	6,86
18	2,51	6,77	122,61	6,70	2,69	6,40
19	2,52	7,54	111,75	6,87	2,78	6,82
20	2,50	12,64	121,61	6,51	2,74	8,63
21	2,50	9,47	109,75	6,79	2,27	8,44
22	2,51	7,23	114,86	6,46	2,49	7,32
23	2,53	9,59	117,41	6,43	2,68	8,71
24	2,51	9,37	120,78	6,27	2,75	7,22

*Tabella 4.13: Punti di partenza per la ricerca dei minimi locali*

Per i seguenti punti di partenza, le architetture individuate da CAGE che restituiscono valori di minimo locale di CO<sub>2</sub> sono riportate in tabella 4.14.

Valori di minimo locale

<i>I Blocco</i>	<b>ICE</b> [L]	<b>PE</b>	<b>EM</b> [kW]	<b>TC</b> [-]	<b>FD</b> [-]	<b>Crate</b>	<b>Co<sub>2ttw</sub></b> [g/km]
1	2,504	9,388	118,096	7,087	2,438	6,876	396,582
2	2,504	9,388	118,096	7,087	2,438	6,876	396,582
3	2,504	9,426	118,113	7,086	2,435	6,878	396,585
4	2,504	9,420	118,108	7,086	2,436	6,877	396,585
5	2,504	9,390	118,101	7,087	2,438	6,875	396,581
6	2,504	9,390	118,101	7,087	2,438	6,875	396,581
7	2,504	9,390	118,101	7,087	2,438	6,875	396,581
8	2,504	9,390	118,101	7,087	2,438	6,875	396,581
<i>II Blocco</i>	<b>ICE</b> [L]	<b>PE</b>	<b>EM</b> [kW]	<b>TC</b> [-]	<b>FD</b> [-]	<b>Crate</b>	<b>Co<sub>2ttw</sub></b> [g/km]
9	2,504	9,437	118,127	7,086	2,435	6,877	396,585
10	2,502	9,032	117,752	7,077	2,464	6,869	396,590
11	2,503	9,280	117,982	7,080	2,445	6,879	396,584
12	2,504	9,427	118,114	7,086	2,435	6,877	396,585
13	2,504	9,424	118,110	7,086	2,435	6,877	396,585
14	2,504	9,433	118,121	7,086	2,435	6,877	396,585
15	2,504	9,429	118,123	7,086	2,436	6,877	396,586
16	2,504	9,395	118,103	7,087	2,438	6,876	396,582
<i>III Blocco</i>	<b>ICE</b> [L]	<b>PE</b>	<b>EM</b> [kW]	<b>TC</b> [-]	<b>FD</b> [-]	<b>Crate</b>	<b>Co<sub>2ttw</sub></b> [g/km]
17	2,504	9,396	118,103	7,087	2,438	6,876	396,582
18	2,504	9,394	118,101	7,087	2,438	6,876	396,582
19	2,501	8,967	117,583	7,065	2,467	6,896	396,599
20	2,504	9,431	118,105	7,085	2,435	6,880	396,586
21	2,504	9,397	118,103	7,087	2,438	6,876	396,582
22	2,502	9,041	117,707	7,062	2,460	6,893	396,596
23	2,502	9,162	117,887	7,082	2,455	6,869	396,584
24	2,503	9,362	118,075	7,087	2,440	6,875	396,581

Tabella 4.14: Valori di minimo locale trovati da CAGE.

Si evidenziano i differenti minimi locali trovati da CAGE, ovviamente un'azienda in fase di costruzione dei componenti non andrà ad attenzionare il centesimo o il millesimo del valore, ma l'accuratezza dei valori è riportata solo per evidenziare che CAGE ha comunque trovato un minimo locale diverso rispetto ai punti di partenza.

In figura 4.14 si riporta il modello e i valori di minimo locale individuati da CAGE.

Le architetture corrispondenti ai valori di minimo locale verranno analizzate in DP e si confronteranno le due CO<sub>2</sub> calcolate dai tool, calcolando l'errore percentuale nel seguente modo:

$$ERRORE \% = (CO_{2DP} - CO_{2CAGE}) / (CO_{2DP}) * 100 \quad (4.1)$$

Successivamente si calcherà l'errore medio complessivo.

Valori di minimo locale, confronto dei valori di CO<sub>2</sub>

<i>I Blocco</i>	ICE	PE	EM	TC	FD	Crate	CO <sub>2</sub> ttw	CO <sub>2</sub> ttw	Errore
	[L]		[kW]	[-]	[-]		DP	CAGE	
1	2,50	9,39	118,10	7,09	2,44	6,88	396,45	396,58	-0,03
3	2,50	9,43	118,11	7,09	2,44	6,88	396,42	396,59	-0,04
4	2,50	9,42	118,11	7,09	2,44	6,88	396,42	396,59	-0,04
5	2,50	9,39	118,10	7,09	2,44	6,88	396,47	396,58	-0,03
<i>II Blocco</i>	ICE	PE	EM	TC	FD	Crate	CO <sub>2</sub> ttw	CO <sub>2</sub> ttw	
	[L]		[kW]	[-]	[-]		DP	CAGE	
9	2,50	9,44	118,13	7,09	2,43	6,88	396,45	396,59	-0,03
10	2,50	9,03	117,75	7,08	2,46	6,87	396,70	396,59	0,03
11	2,50	9,28	117,98	7,08	2,45	6,88	396,53	396,58	-0,01
12	2,50	9,43	118,11	7,09	2,44	6,88	396,42	396,59	-0,04
14	2,50	9,43	118,12	7,09	2,43	6,88	396,44	396,59	-0,04
15	2,50	9,43	118,12	7,09	2,44	6,88	396,42	396,59	-0,04
16	2,50	9,40	118,10	7,09	2,44	6,88	396,43	396,58	-0,04
<i>III Blocco</i>	ICE	PE	EM	TC	FD	Crate	CO <sub>2</sub> ttw	CO <sub>2</sub> ttw	
	[L]		[kW]	[-]	[-]		DP	CAGE	
17	2,50	9,40	118,10	7,09	2,44	6,88	396,43	396,58	-0,04
18	2,50	9,39	118,10	7,09	2,44	6,88	396,43	396,58	-0,04
19	2,50	8,97	117,58	7,06	2,47	6,90	396,70	396,60	0,03
20	2,50	9,43	118,10	7,09	2,43	6,88	396,50	396,59	-0,02
21	2,50	9,40	118,10	7,09	2,44	6,88	396,43	396,58	-0,04
22	2,50	9,04	117,71	7,06	2,46	6,89	396,58	396,60	0,00
23	2,50	9,16	117,89	7,08	2,46	6,87	396,51	396,58	-0,02
24	2,50	9,36	118,07	7,09	2,44	6,87	396,53	396,58	-0,01
<b>ERRORE MEDIO COMPLESSIVO</b>									
-0,02									

Tabella 3.15: Confronto dei valori di CO<sub>2</sub> individuati da CAGE e DP

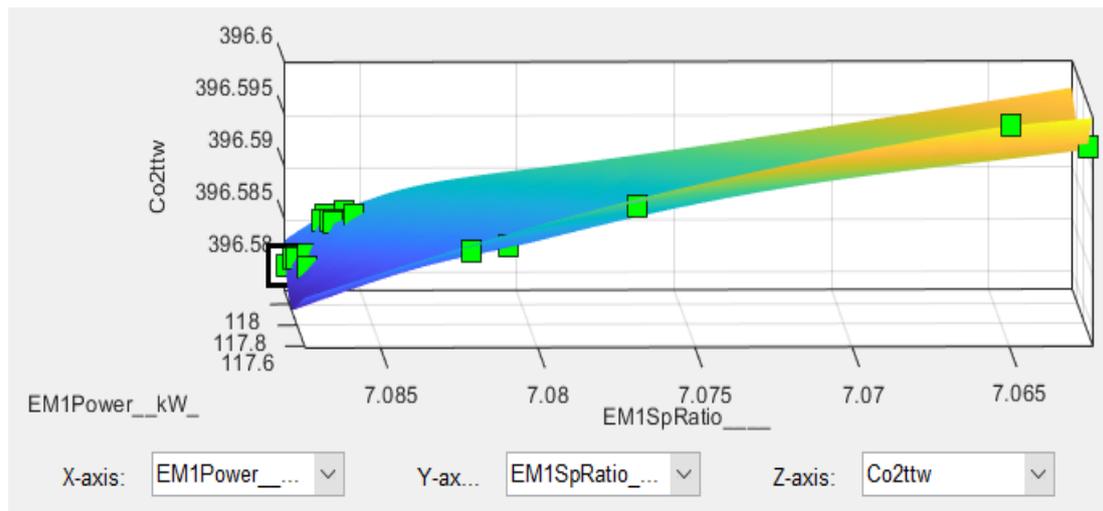


Figura 4.14: Rappresentazione grafica di una vista del modello con relativi minimi locali individuati da CAGE.

Il Design ottimale individuato è riportato in tabella 4.16.

*Design ottimale*

<i>ICE [L]</i>	2.5
<i>PE [kW/kWh]</i>	9.43
<i>EM [kW]</i>	118.12
<i>TC [-]</i>	7.09
<i>FD [-]</i>	2.44
<i>C_rate</i>	6.88
<i>CO<sub>2</sub>ttw [g/km]</i>	396.42

Tabella 4.16: Design ottimale individuato dal metodo classico.

I tempi di calcolo della procedura effettuata sono molto onerosi, sono state impiegate circa due settimane per riuscire ad individuare l'architettura ottimale lavorando a pieno regime. Dato che per un'azienda i tempi di progettazione sono molto importanti, quasi indispensabili perché influiscono su vari processi, si è pensato di provare ad attuare una strategia alternativa. L'idea consiste nel sfruttare la discretizzazione dello stato di carica della batteria.

### 4.3. Strategia alternativa

Prima di illustrare le varie fasi della strategia bisogna fare una premessa sulla discretizzazione dello stato di carica della batteria. L'algoritmo utilizzato definisce lo stato di carica della batteria (SOC) nel seguente modo:

$$SOC = \frac{E}{E_{TOT}} \quad (4.2)$$

Indicando con  $E$  la quantità di energia immagazzinata nella batteria ed  $E_{TOT}$  la taglia del pacco batteria.

In generale per il passo di discretizzazione della SOC window si considera la minima variazione di energia prevista per ogni intervallo di tempo, la quale dipende da numerosi fattori come: il modello del veicolo, il ciclo di guida scelto e la logica di controllo. Essa verrà calcolata tramite l'approccio della matrice di configurazione che calcolerà il suo valore per ogni combinazione di power flow e rapporto di trasmissione corrispondenti all'intervallo del tempo considerato. Come passo di discretizzazione si sceglierà la minima variazione di energia.

Successivamente l'algoritmo calcolerà il numero di livelli di SOC nel seguente modo:

$$N_{SOC} = \frac{a \cdot E_{TOT}}{h} + 1$$

Indicando con  $h$  il passo di discretizzazione e  $a$  la percentuale di  $E_{TOT}$  (il numeratore indica ampiezza della SOC window). Ovviamente più il passo di discretizzazione scelto è piccolo e più si ha una maggiore precisione dei risultati. Di solito nella procedura classica per la valutazione dell'architettura non si impone nessun livello di SOC e si utilizza il SOC di default di convergenza.

La strategia alternativa invece propone un'analisi iniziale per ogni VL generata, imponendo il livello di SOC pari ad 11. Ovviamente non si pretende di ottenere i risultati reali di CO<sub>2</sub>, in quanto si è consapevoli che questa procedura restituisca dei valori di CO<sub>2</sub> ben lontani dai valori reali, ma si pensa di poter individuare le migliori architetture che serviranno per continuare la ricerca dell'ottimo design. Infatti subito dopo aver analizzato la VL con livello SOC=11 si individueranno le prime 110 migliori architetture in termini di CO<sub>2</sub> emessa e si analizzeranno regolarmente con il livello di SOC di convergenza. Questo permetterà di effettuare una prima analisi sull'intera Variation List individuando indicativamente le architetture ipotetiche migliori e permetterà di dimezzare i tempi della ricerca.

### 1° Prova

Si considera lo stesso range di riferimento iniziale utilizzato per l'approccio classico e quindi la prima Variation List studiata sarà uguale per entrambi i metodi. Si riportano i range di riferimento in tabella 4.16.

RANGE DI RIFERIMENTO DEI FATTORI

ICE [L]	2.5-5
PE [kW/kWh]	5-30
EM [kW]	35-125
TC [-]	2-8
FD [-]	2-8
C_rate	3-10

Tabella 4.17: Range di riferimento iniziale

Si analizza la Variation List, costituita da 300 possibili architetture, tramite DP, impostando un valore di SOC pari ad 11 ed, acquisiti i risultati, le architetture si riordineranno in modo crescente in termini di CO<sub>2</sub>. Per dare un'idea dei valori ottenuti, in tabella 4.18 si riportano i primi 16 e gli ultimi 6 valori delle migliori 110 architetture. Subito dopo le architetture ottimali individuate si rianalizzeranno tramite DP impostando il SOC di default (SOC=0). Al solito si riordineranno le architetture secondo il criterio di CO<sub>2</sub> crescente, si riportano le migliori 16 e le ultime 6 architetture in tabella 4.19. Sarà effettuato un confronto tra le posizioni delle prime 110 architetture calcolate tramite SOC=11 e il nuovo riordinamento dovuto all'analisi dell'architetture utilizzando il SOC di default, individuando il massimo spostamento avvenuto. Successivamente si confronteranno le migliori architetture individuate dal metodo classico e quelle individuate dalla strategia alternativa.

1° PROVA RISULTATI, SOC=11

<i>Classifica</i>	<b>ICE</b> <b>[L]</b>	<b>PE</b>	<b>EM</b> <b>[kW]</b>	<b>TC</b> <b>[-]</b>	<b>FD</b> <b>[-]</b>	<b>Crate</b>	<b>Co<sub>2</sub>ttw</b>
1	3,23	7,83	114,10	2,21	3,85	9,21	24,34
2	3,09	6,95	106,72	2,84	2,84	7,05	45,43
3	2,58	5,83	80,18	7,33	2,76	9,36	52,86
4	3,53	7,25	82,46	5,26	2,49	9,59	65,16
5	4,55	7,54	121,48	4,67	2,23	5,68	87,52
6	2,88	10,57	112,70	6,43	2,63	7,57	120,83
7	3,28	9,69	119,38	5,38	4,63	8,69	124,45
8	2,55	9,98	100,74	3,48	3,52	7,95	136,63
9	4,33	6,27	74,73	7,84	2,73	7,02	142,68
10	2,60	8,32	118,67	4,11	5,05	6,34	152,96
11	4,15	8,96	113,93	5,08	2,01	4,98	168,60
12	3,33	5,29	61,37	6,10	3,15	5,76	172,84
13	4,00	13,01	113,05	5,23	3,17	9,40	173,35
14	3,61	10,66	87,73	2,42	2,98	8,30	186,46
15	4,82	6,37	55,39	4,02	3,08	9,73	192,79
16	4,06	8,13	68,75	4,25	2,75	7,38	204,31
...	...	...	...	...	...	...	...
105	4,79	10,96	80,35	4,46	4,60	4,83	445,55
106	3,29	22,24	43,61	3,77	2,95	6,08	446,39
107	4,93	7,39	40,80	2,46	4,64	7,17	447,40
108	2,58	18,28	71,56	3,31	4,81	4,97	448,61
109	4,44	26,19	123,95	2,68	4,88	8,44	449,37
110	4,72	22,68	116,91	3,90	2,54	3,30	452,91

Tabella 4.18: Migliori 110 architetture, calcolate impostando un valore di SOC=11.

1° PROVA RISULTATI SOC=0 e confronto con SOC=11

<i>Classifica</i>	<b>ICE [L]</b>	<b>PE</b>	<b>EM [kW]</b>	<b>TC [-]</b>	<b>FD [-]</b>	<b>Crate</b>	<b>Co<sub>2ttw</sub></b>	<b>Posizione SOC=11</b>
1	2,58	5,83	80,18	7,33	2,76	9,36	400,40	3
2	2,88	10,57	112,70	6,43	2,63	7,57	404,83	6
3	2,71	19,65	103,20	5,70	2,14	8,63	407,17	23
4	2,78	12,32	69,80	4,04	2,21	9,48	409,50	18
5	2,55	9,98	100,74	3,48	3,52	7,95	410,37	8
6	2,56	14,96	75,08	6,83	3,27	9,07	410,79	30
7	2,82	14,28	96,52	4,70	3,05	6,31	412,50	26
8	3,09	6,95	106,72	2,84	2,84	7,05	412,58	2
9	2,63	23,26	109,18	2,16	3,34	9,92	415,09	28
10	3,13	11,30	94,24	2,64	2,57	5,64	416,32	20
11	3,07	16,13	101,80	7,48	2,42	5,02	417,45	44
12	2,50	5,00	35,00	2,00	2,00	3,00	417,83	68
13	3,53	7,25	82,46	5,26	2,49	9,59	419,52	4
14	3,26	9,49	66,64	3,27	2,33	5,35	420,90	35
15	3,33	5,29	61,37	6,10	3,15	5,76	423,84	12
16	3,17	28,73	123,24	7,98	2,02	6,20	424,69	62
...								
69	3,16	6,17	98,28	4,53	5,28	4,20	517,20	29
70	4,75	18,09	63,83	4,58	4,02	8,20	526,30	104
71	4,90	16,52	114,45	3,45	4,39	7,76	539,06	65
72	3,96	7,15	58,20	2,70	5,14	5,13	566,25	88
73	4,44	26,19	123,95	2,68	4,88	8,44	573,33	109
74	4,42	16,23	78,24	4,98	5,02	9,70	584,49	103

<b>MASSIMO SPOSTAMENTO</b>
66

Tabella 4.19: Analisi delle 110 architetture individuate precedentemente, impostando un SOC=0

Il massimo spostamento individuato per le architetture è pari a 66. Il risultato ottenuto indica che un'architettura da SOC=11 a SOC=0 si è spostata in alto in classifica di 66 posizioni. Invece se lo spostamento fosse avvenuto verso il basso il segno sarebbe stato negativo.

1° PROVA RISULTATI, SOC=0. Confronto con il metodo classico

<i>Classifica</i>	<b>ICE</b> <b>[L]</b>	<b>PE</b>	<b>EM</b> <b>[kW]</b>	<b>TC</b> <b>[-]</b>	<b>FD</b> <b>[-]</b>	<b>Crate</b>	<b>Co<sub>2ttw</sub></b>	<b>Confronto</b>
1	2,58	5,83	80,18	7,33	2,76	9,36	400,40	Strategia altern.
	2,58	5,83	80,18	7,33	2,76	9,36	400,40	Metodo classico
2	2,88	10,57	112,70	6,43	2,63	7,57	404,83	-
	2,88	10,57	112,70	6,43	2,63	7,57	404,83	-
3	2,71	19,65	103,20	5,70	2,14	8,63	407,17	-
	2,71	19,65	103,20	5,70	2,14	8,63	407,17	-
4	2,78	12,32	69,80	4,04	2,21	9,48	409,50	-
	2,78	12,32	69,80	4,04	2,21	9,48	409,50	-
5	2,55	9,98	100,74	3,48	3,52	7,95	410,37	-
	2,55	9,98	100,74	3,48	3,52	7,95	410,37	-
6	2,56	14,96	75,08	6,83	3,27	9,07	410,79	-
	2,56	14,96	75,08	6,83	3,27	9,07	410,79	-
7	2,82	14,28	96,52	4,70	3,05	6,31	412,50	-
	2,82	14,28	96,52	4,70	3,05	6,31	412,50	-
8	3,09	6,95	106,72	2,84	2,84	7,05	412,58	-
	3,09	6,95	106,72	2,84	2,84	7,05	412,58	-
9	2,63	23,26	109,18	2,16	3,34	9,92	415,09	-
	2,63	23,26	109,18	2,16	3,34	9,92	415,09	-
10	3,13	11,30	94,24	2,64	2,57	5,64	416,32	-
	3,13	11,30	94,24	2,64	2,57	5,64	416,32	-
11	3,07	16,13	101,80	7,48	2,42	5,02	417,45	-
	3,07	16,13	101,80	7,48	2,42	5,02	417,45	-
12	2,50	5,00	35,00	2,00	2,00	3,00	417,83	-
	2,50	5,00	35,00	2,00	2,00	3,00	417,83	-
13	3,53	7,25	82,46	5,26	2,49	9,59	419,52	-
	3,53	7,25	82,46	5,26	2,49	9,59	419,52	-
14	3,26	9,49	66,64	3,27	2,33	5,35	420,90	-
	3,26	9,49	66,64	3,27	2,33	5,35	420,90	-
15	3,33	5,29	61,37	6,10	3,15	5,76	423,84	-
	3,33	5,29	61,37	6,10	3,15	5,76	423,84	-
16	3,17	28,73	123,24	7,98	2,02	6,20	424,69	-
	3,17	28,73	123,24	7,98	2,02	6,20	424,69	-

Tabella 4.19: Confronto tra la strategia alternativa e metodo classico.

Dal confronto dei due metodi si nota che le migliori 16 architetture non sono cambiate, la pre-analisi della strategia alternativa non ha influito sull'individualizzazione delle architetture ottimali. È da sottolineare però che per le prime prove di analisi molte architetture non vengono considerate ammissibili e quindi vengono escluse, infatti per il metodo classico su 300 architetture solo 86 sono considerate ammissibili. Mentre per la seconda strategia le architetture ammissibili sono 74 su 110. Confrontando i due risultati fino alla quarantottesima posizione non abbiamo cambiamenti, mentre dopo si iniziano a notare le prime differenze in termini di posizioni e architetture individuate. Tuttavia per il nostro obiettivo di ottimizzazione di design si considerano sempre le prime 16 architetture migliori, quindi nella scelta del range di riferimento per la seconda prova non è cambiato nulla.

## 2° prova

Il range di riferimento individuato è lo stesso del metodo classico ed il criterio di scelta per la definizione è sempre lo stesso: si considerano i valori massimi e minimi di ogni componente delle prime 16 architetture. Si riporta il range di riferimento in tabella 4.20.

*RANGE DI RIFERIMENTO DEI FATTORI*

<i>ICE [L]</i>	2.5-3.60
<i>PE [kW/kWh]</i>	5-28.80
<i>EM [kW]</i>	35-123.30
<i>TC [-]</i>	2-8
<i>FD [-]</i>	2-3.60
<i>C_rate</i>	3-9.95

*Tabella 4.20: Range di riferimento seconda prova.*

Si utilizzerà sempre lo stesso procedimento eseguito per la 1° prova. Una volta generata la VL verrà analizzata tramite DP impostando un livello di SOC=11 e dopo aver individuato le migliori 110 architetture, quest'ultime si rianalizzeranno tramite DP impostando il SOC di default. Nelle tabelle seguenti si riportano le migliori 16 e ultime 6 architetture per i risultati ottenuti con SOC=11 e successivamente i risultati per SOC=0. Si calcherà il massimo spostamento delle architetture e si farà un confronto con il metodo classico. Questa procedura sarà ripetuta anche per le prove successive.

2° PROVA RISULTATI, SOC=11

<i>Classifica</i>	<b>ICE</b> [L]	<b>PE</b>	<b>EM</b> [kW]	<b>TC</b> [-]	<b>FD</b> [-]	<b>Crate</b>	<b>CO<sub>2</sub>tw</b>
1	3,08	5,74	115,02	6,31	3,55	8,43	11,88
2	3,60	5,09	102,95	5,49	2,92	8,19	14,49
3	3,13	8,44	120,89	2,77	3,24	9,81	17,09
4	2,82	7,70	112,61	2,21	2,49	9,16	21,73
5	3,23	5,19	83,98	3,36	3,01	8,92	39,12
6	2,76	6,86	105,36	2,84	2,22	7,02	40,12
7	3,45	6,02	91,22	2,54	3,26	7,70	41,57
8	2,54	5,79	79,32	7,33	2,20	9,31	46,02
9	2,95	7,14	81,56	5,26	2,13	9,54	54,82
10	2,84	9,46	117,78	5,38	2,70	8,65	55,81
11	2,98	6,53	120,71	6,02	2,85	5,19	64,09
12	2,57	6,39	122,96	6,57	3,18	4,98	65,73
13	3,40	7,42	119,85	4,67	2,06	5,66	71,19
14	2,54	8,16	117,09	4,11	2,81	6,31	77,79
15	2,94	5,56	107,43	7,58	3,34	4,68	91,72
16	2,72	5,46	87,77	3,52	3,44	5,47	97,84
...	...	...	...	...	...	...	...
105	3,11	10,49	63,63	5,16	3,16	6,39	289,14
106	3,41	16,53	80,53	6,41	2,38	8,10	289,31
107	3,29	20,53	120,20	5,63	3,43	7,37	289,93
108	3,16	16,20	95,88	3,21	2,90	6,27	290,80
109	2,98	15,51	119,51	3,62	2,22	4,28	291,45
110	2,88	10,25	73,80	4,71	2,50	4,53	292,38

Tabella 4.21: Migliori 110 architetture, calcolate impostando un valore di SOC=11.

2° PROVA RISULTATI SOC=0 e confronto con SOC=11

<i>Classifica</i>	<b>ICE [L]</b>	<b>PE</b>	<b>EM [kW]</b>	<b>TC [-]</b>	<b>FD [-]</b>	<b>Crate</b>	<b>Co<sub>2ttw</sub></b>	<b>Posizione SOC=11</b>
1	2,54	5,79	79,32	7,33	2,20	9,31	399,55	8
2	2,54	8,16	117,09	4,11	2,81	6,31	399,76	14
3	2,51	12,90	104,33	7,65	2,74	5,90	399,90	61
4	2,50	16,95	115,19	7,14	2,55	7,36	400,29	60
5	2,67	10,30	111,23	6,43	2,17	7,53	400,61	17
6	2,52	9,74	99,50	3,48	2,41	7,91	400,93	20
7	2,63	7,79	93,64	5,89	2,79	6,64	401,13	22
8	2,57	6,39	122,96	6,57	3,18	4,98	401,75	12
9	2,55	11,32	88,81	5,47	3,13	7,45	403,79	47
10	2,53	14,48	74,32	6,83	2,34	9,03	404,22	77
11	2,84	9,46	117,78	5,38	2,70	8,65	404,45	10
12	2,59	18,95	101,91	5,70	2,04	8,59	405,37	66
13	2,76	6,86	105,36	2,84	2,22	7,02	405,62	6
14	2,64	13,83	95,36	4,70	2,28	6,28	405,85	70
15	2,65	5,93	70,18	5,05	2,56	3,49	406,16	67
16	2,79	6,12	97,09	4,53	2,88	4,19	406,39	32
...								
97	3,32	10,95	101,23	3,50	3,20	4,74	426,94	81
98	3,45	6,02	91,22	2,54	3,26	7,70	427,30	7
99	3,42	17,18	105,02	3,10	3,11	9,22	427,43	62
100	3,20	17,83	114,33	2,05	3,36	6,96	429,87	91
101	3,35	8,53	96,40	5,33	3,54	7,29	431,42	35
102	3,56	17,74	94,67	6,05	3,47	9,71	440,50	92

**MASSIMO  
SPOSTAMENTO**  
-91

Tabella 4.22: Analisi delle 110 architetture individuate precedentemente, impostando un SOC=0

2° PROVA RISULTATI, SOC=0. Confronto con il metodo classico

<b>Classifica</b>	<b>ICE [L]</b>	<b>PE</b>	<b>EM [kW]</b>	<b>TC [-]</b>	<b>FD [-]</b>	<b>Crate</b>	<b>Co<sub>2ttw</sub></b>	<b>Confronto</b>
1	2,54	5,79	79,32	7,33	2,20	9,31	399,55	Stretegia altern.
	2,54	5,79	79,32	7,33	2,20	9,31	399,55	Metodo classico
2	2,54	8,16	117,09	4,11	2,81	6,31	399,76	-
	2,54	8,16	117,09	4,11	2,81	6,31	399,76	-
3	2,51	12,90	104,33	7,65	2,74	5,90	399,90	-
	2,51	12,90	104,33	7,65	2,74	5,90	399,90	-
4	2,50	16,95	115,19	7,14	2,55	7,36	400,29	-
	2,50	16,95	115,19	7,14	2,55	7,36	400,29	-
5	2,67	10,30	111,23	6,43	2,17	7,53	400,61	-
	2,67	10,30	111,23	6,43	2,17	7,53	400,61	-
6	2,52	9,74	99,50	3,48	2,41	7,91	400,93	-
	2,52	9,74	99,50	3,48	2,41	7,91	400,93	-
7	2,63	7,79	93,64	5,89	2,79	6,64	401,13	-
	2,63	7,79	93,64	5,89	2,79	6,64	401,13	-
8	2,57	6,39	122,96	6,57	3,18	4,98	401,75	-
	2,57	6,39	122,96	6,57	3,18	4,98	401,75	-
9	2,55	11,32	88,81	5,47	3,13	7,45	403,79	-
	2,55	11,32	88,81	5,47	3,13	7,45	403,79	-
10	2,53	14,48	74,32	6,83	2,34	9,03	404,22	-
	2,53	14,48	74,32	6,83	2,34	9,03	404,22	-
11	2,84	9,46	117,78	5,38	2,70	8,65	404,45	-
	2,84	9,46	117,78	5,38	2,70	8,65	404,45	-
12	2,59	18,95	101,91	5,70	2,04	8,59	405,37	-
	2,59	18,95	101,91	5,70	2,04	8,59	405,37	-
13	2,76	6,86	105,36	2,84	2,22	7,02	405,62	-
	2,76	6,86	105,36	2,84	2,22	7,02	405,62	-
14	2,64	13,83	95,36	4,70	2,28	6,28	405,85	-
	2,64	13,83	95,36	4,70	2,28	6,28	405,85	-
15	2,65	5,93	70,18	5,05	2,56	3,49	406,16	-
	2,65	5,93	70,18	5,05	2,56	3,49	406,16	-
16	2,79	6,12	97,09	4,53	2,88	4,19	406,39	-
	2,79	6,12	97,09	4,53	2,88	4,19	406,39	-

Tabella 4.23: Confronto tra la strategia alternativa e metodo classico.

Anche per la 2° prova alcune architetture non vengono considerate ammissibili, per la strategia alternativa le ammissibili sono 102/110, mentre per il metodo classico 196/300. Le migliori 16 architetture individuate per entrambi i metodi sono uguali, qualche cambiamento in termini di posizione e architetture si inizia a notare dalla trentaduesima posizione in poi. Il range di riferimento per la prova successiva rimane uguale alla terza prova del metodo classico.

### 3° Prova

Si riporta in tabella 4.24 il range di riferimento considerato e si esegue nuovamente la procedura.

RANGE DI RIFERIMENTO DEI FATTORI

ICE [L]	2.5-2.85
PE [kW/kWh]	5.70-19
EM [kW]	70.10-123
TC [-]	2.80-7.65
FD [-]	2-3.20
C_rate	3.40-9.35

Tabella 4.24: Range di riferimento terza prova

### 3° PROVA RISULTATI, SOC=11

Classifica	ICE [L]	PE	EM [kW]	TC [-]	FD [-]	Crate	Co <sub>2ttw</sub>
1	2,85	5,75	110,81	5,62	2,69	7,84	9,17
2	2,69	6,12	118,04	6,29	3,16	8,05	9,19
3	2,70	7,62	121,55	3,43	2,93	9,23	10,90
4	2,60	7,21	116,59	2,97	2,37	8,68	12,08
5	2,51	6,14	96,65	7,11	2,15	8,80	12,57
6	2,73	5,80	99,44	3,90	2,76	8,47	12,58
7	2,64	6,89	98,00	5,43	2,10	9,00	18,51
8	2,80	6,27	103,78	3,24	2,94	7,42	20,13
9	2,58	6,74	112,25	3,48	2,17	6,84	24,14
10	2,61	8,19	119,69	5,53	2,53	8,23	24,82
11	2,78	5,91	89,11	6,82	2,54	8,70	25,22
12	2,83	6,43	82,09	4,43	2,22	9,12	38,15
13	2,52	6,58	87,66	4,71	2,91	8,21	47,07
14	2,74	8,14	102,96	5,89	2,74	8,82	48,70
15	2,51	7,47	119,28	4,51	2,61	6,24	49,64
16	2,79	7,05	120,93	4,96	2,05	5,68	50,59

...	...	...	...	...	...	...	...
105	2,78	14,74	115,15	6,25	2,67	8,37	176,07
106	2,75	7,15	77,54	5,76	3,03	5,54	177,04
107	2,81	9,54	104,40	6,48	2,72	5,31	180,35
108	2,61	10,95	81,88	4,64	2,03	7,75	180,87
109	2,70	13,13	96,34	4,07	2,29	8,07	181,20
110	2,83	13,21	95,00	3,62	2,04	8,25	181,31

Tabella 4.25: Migliori 110 architetture, calcolate impostando un valore di SOC=11.

3° PROVA RISULTATI SOC=0 e confronto con SOC=11

Classifica	ICE [L]	PE	EM [kW]	TC [-]	FD [-]	Crate	Co <sub>2ttw</sub>	Posizione SOC=11
1	2,50	10,12	111,63	7,37	2,56	5,89	397,60	77
2	2,50	12,38	118,14	6,96	2,41	7,13	397,64	75
3	2,52	6,48	122,79	6,49	2,89	5,10	398,02	22
4	2,51	6,14	96,65	7,11	2,15	8,80	398,45	5
5	2,55	8,66	115,77	6,38	2,13	7,28	398,65	23
6	2,54	7,26	105,23	5,94	2,59	6,51	398,82	26
7	2,52	9,23	102,34	5,60	2,84	7,21	398,91	52
8	2,51	11,00	93,66	6,70	2,25	8,56	399,01	66
9	2,51	7,47	119,28	4,51	2,61	6,24	399,37	15
10	2,51	8,35	108,74	3,99	2,30	7,61	399,58	24
11	2,51	16,30	120,52	6,06	2,96	8,89	399,83	101
12	2,56	7,10	80,64	7,18	2,72	8,54	399,89	35
13	2,61	8,19	119,69	5,53	2,53	8,23	399,98	10
14	2,55	10,64	106,26	4,98	2,21	6,21	400,17	80
15	2,59	11,21	111,01	5,87	2,87	9,02	400,39	44
16	2,65	6,56	121,45	6,05	2,64	5,27	400,56	18
...								
105	2,72	12,87	117,63	2,84	3,02	6,79	407,69	104
106	2,77	9,47	83,43	5,90	3,05	7,32	407,93	96
107	2,83	13,21	95,00	3,62	2,04	8,25	408,62	110
108	2,84	6,97	73,51	3,17	2,53	6,94	408,84	64
109	2,84	12,82	105,85	6,08	3,10	9,14	408,94	83
110	2,81	7,31	93,04	3,77	3,11	4,72	409,72	100

MASSIMO  
SPOSTAMENTO  
-96

Tabella 4.26: Analisi delle migliori 110 architetture, impostando un SOC=0

3° PROVA RISULTATI, SOC=0. Confronto con il metodo classico

Classifica	ICE [L]	PE	EM [kW]	TC [-]	FD [-]	Crate	Co <sub>2</sub> ttw	Confronto
1	2,50	10,12	111,63	7,37	2,56	5,89	397,60	Stretegia altern.
	2,50	10,12	111,63	7,37	2,56	5,89	397,60	Metodo. classico
2	2,50	12,38	118,14	6,96	2,41	7,13	397,64	-
	2,50	12,38	118,14	6,96	2,41	7,13	397,64	-
3	2,52	6,48	122,79	6,49	2,89	5,10	398,02	-
	2,52	6,48	122,79	6,49	2,89	5,10	398,02	-
4	2,51	6,14	96,65	7,11	2,15	8,80	398,45	-
	2,51	6,14	96,65	7,11	2,15	8,80	398,45	-
5	2,55	8,66	115,77	6,38	2,13	7,28	398,65	-
	2,55	8,66	115,77	6,38	2,13	7,28	398,65	-
6	2,54	7,26	105,23	5,94	2,59	6,51	398,82	-
	2,54	7,26	105,23	5,94	2,59	6,51	398,82	-
7	2,52	9,23	102,34	5,60	2,84	7,21	398,91	-
	2,52	9,23	102,34	5,60	2,84	7,21	398,91	-
8	2,51	11,00	93,66	6,70	2,25	8,56	399,01	-
	2,51	11,00	93,66	6,70	2,25	8,56	399,01	-
9	2,51	7,47	119,28	4,51	2,61	6,24	399,37	-
	2,51	7,47	119,28	4,51	2,61	6,24	399,37	-
10	2,51	8,35	108,74	3,99	2,30	7,61	399,58	-
	2,51	8,35	108,74	3,99	2,30	7,61	399,58	-
11	2,51	16,30	120,52	6,06	2,96	8,89	399,83	-
	2,51	16,30	120,52	6,06	2,96	8,89	399,83	-
12	2,56	7,10	80,64	7,18	2,72	8,54	399,89	-
	2,56	7,10	80,64	7,18	2,72	8,54	399,89	-
13	2,61	8,19	119,69	5,53	2,53	8,23	399,98	-
	2,61	8,19	119,69	5,53	2,53	8,23	399,98	-
14	2,55	10,64	106,26	4,98	2,21	6,21	400,17	-
	2,55	10,64	106,26	4,98	2,21	6,21	400,17	-
15	2,59	11,21	111,01	5,87	2,87	9,02	400,39	-
	<b>2,53</b>	<b>11,93</b>	<b>114,73</b>	<b>4,77</b>	<b>2,34</b>	<b>5,45</b>	<b>400,18</b>	-
16	2,65	6,56	121,45	6,05	2,64	5,27	400,56	-
	<b>2,59</b>	<b>11,21</b>	<b>111,01</b>	<b>5,87</b>	<b>2,87</b>	<b>9,02</b>	<b>400,39</b>	-

Tabella 4.27: Confronto tra la strategia alternativa e il metodo classico.

Confrontando il metodo della strategia alternativa e il metodo classico si può notare che si iniziano ad avere delle differenze dalla quindicesima posizione in poi, ma sono dovute al fatto che la strategia alternativa considera delle parti nello spazio, quindi a differenza del metodo classico presenta dei “buchi”. Infatti se si considera l’architettura individuata alla quindicesima posizione dalla strategia alternativa, secondo il metodo classico la stessa è posizionata alla sedicesima posizione, questo significa che è presente un “buco” tra la posizione 14 e la posizione 15.

#### 4° prova

Dalla quarta prova in poi il range varierà a causa della differenza delle ultime due architetture. Infatti vi sarà una leggera variazione dovuta al cambiamento del range di riferimento della cilindrata del motore termico.

Il range di riferimento considerato è riportato in tabella 4.28.

<i>ICE [L]</i>	2.5-2.65
<i>PE [kW/kWh]</i>	6.10-16.30
<i>EM [kW]</i>	80.6-122.80
<i>TC [-]</i>	3.90-7.40
<i>FD [-]</i>	2.10-3
<i>C_rate</i>	5-9.10

Tabella 4.28: Range di riferimento quarta prova

Nella quarta prova, come avvenuto per il metodo classico, si useranno 220 punti, distribuiti nel piano Sobol, in quanto il range dei fattori è ridotto e si è individuata la direzione da percorrere per ottenere la migliore architettura. Si riportano nelle tabelle seguenti i risultati e il relativo confronto.

4° PROVA RISULTATI, SOC=11

<i>Classifica</i>	<b>ICE [L]</b>	<b>PE</b>	<b>EM [kW]</b>	<b>TC [-]</b>	<b>FD [-]</b>	<b>Crate</b>	<b>Co<sub>2</sub>ttw</b>
1	2,58	6,42	118,84	6,42	2,97	8,20	9,86
2	2,60	6,18	104,01	4,69	2,67	8,49	10,48
3	2,59	7,57	121,65	4,35	2,80	9,02	10,94
4	2,54	7,26	117,69	4,02	2,38	8,64	11,53
5	2,62	6,26	95,77	6,80	2,51	8,65	16,23
6	2,63	6,54	107,47	4,21	2,81	7,77	17,03
7	2,56	7,02	102,85	5,80	2,17	8,86	17,46
8	2,54	6,90	114,23	4,39	2,23	7,37	17,81
9	2,55	8,01	120,16	5,87	2,49	8,33	18,94
10	2,51	6,70	122,64	6,57	2,76	6,17	25,47
11	2,62	7,14	121,15	5,46	2,14	6,57	26,53
12	2,64	6,66	90,16	5,08	2,26	8,94	27,54
13	2,51	7,45	119,83	5,13	2,56	6,95	29,20
14	2,60	7,97	106,81	6,13	2,65	8,73	31,64
15	2,57	7,06	100,38	4,88	2,69	7,95	33,00
16	2,53	6,30	105,82	4,79	2,91	6,46	33,12
...							
105	2,52	10,40	83,90	4,94	2,48	8,27	155,41
106	2,52	7,89	83,40	5,99	2,32	5,82	155,53
107	2,59	8,77	103,51	7,17	2,95	5,59	156,21
108	2,63	11,44	94,12	5,40	2,40	8,04	157,34
109	2,58	11,20	101,70	5,65	2,55	7,05	159,55
110	2,52	13,99	104,67	4,53	2,63	9,07	160,23

Tabella 4.29: Migliori 110 architetture, calcolate impostando un valore di SOC=11

4° PROVA RISULTATI, SOC=0 e confronto con SOC=11

<i>Classifica</i>	<b>ICE [L]</b>	<b>PE</b>	<b>EM [kW]</b>	<b>TC [-]</b>	<b>FD [-]</b>	<b>Crate</b>	<b>Co<sub>2</sub>ttw</b>	<b>Posizione SOC=11</b>
1	2,50	9,49	113,73	7,19	2,52	6,71	396,95	54
2	2,51	6,70	122,64	6,57	2,76	6,17	397,29	10
3	2,50	10,16	99,39	6,72	2,29	8,56	398,04	53
4	2,51	8,81	106,32	5,92	2,73	7,63	398,08	40
5	2,52	7,30	108,62	6,17	2,54	7,15	398,10	19
6	2,53	10,64	111,92	7,10	2,16	6,19	398,12	93
7	2,53	10,04	119,34	5,86	2,83	7,13	398,19	51
8	2,57	9,77	118,18	6,91	2,20	5,45	398,22	88
9	2,52	7,69	103,02	6,85	2,86	6,67	398,27	41
10	2,51	7,45	119,83	5,13	2,56	6,95	398,31	13
11	2,50	14,23	120,82	6,25	2,82	8,78	398,35	92
12	2,55	8,01	120,16	5,87	2,49	8,33	398,44	9
13	2,50	8,13	111,43	4,76	2,33	7,90	398,44	18
14	2,62	8,29	118,68	7,11	2,29	6,30	398,57	35
15	2,54	10,32	113,24	6,11	2,75	8,88	398,58	39
16	2,56	6,34	115,22	7,15	2,85	5,99	398,61	16
...								
105	2,58	9,81	86,04	4,90	2,60	7,61	401,95	103
106	2,63	6,54	107,47	4,21	2,81	7,77	402,02	6
107	2,63	11,44	94,12	5,40	2,40	8,04	402,32	108
108	2,64	12,63	111,59	4,61	2,85	8,14	402,44	96
109	2,63	7,34	98,90	4,60	2,93	5,91	402,84	58
110	2,65	9,45	82,58	5,27	2,90	8,40	403,75	94

<b>MASSIMO SPOSTAMENTO</b>
-100

Tabella 4.30: Analisi delle migliori 110 architetture, impostando un SOC=0

4° PROVA RISULTATI SOC=0 e confronto con SOC=11

Classifica	ICE [L]	PE	EM [kW]	TC [-]	FD [-]	Crate	Co <sub>2ttw</sub>	Confronto
1	2,50	9,49	113,73	7,19	2,52	6,71	396,95	Stretegia altern.
	2,50	9,49	113,73	7,19	2,52	6,71	396,94	Metodo classico
2	2,51	6,70	122,64	6,57	2,76	6,17	397,29	-
	2,51	6,70	122,64	6,57	2,76	6,17	397,26	-
3	2,50	10,16	99,39	6,72	2,29	8,56	398,04	-
	<b>2,59</b>	<b>8,29</b>	<b>118,68</b>	<b>7,11</b>	<b>2,29</b>	<b>6,30</b>	<b>397,81</b>	-
4	2,51	8,81	106,32	5,92	2,73	7,63	398,08	-
	<b>2,52</b>	<b>10,64</b>	<b>111,92</b>	<b>7,10</b>	<b>2,16</b>	<b>6,19</b>	<b>397,96</b>	-
5	2,52	7,30	108,62	6,17	2,54	7,15	398,10	-
	<b>2,55</b>	<b>9,77</b>	<b>118,18</b>	<b>6,91</b>	<b>2,20</b>	<b>5,45</b>	<b>397,96</b>	-
6	2,53	10,64	111,92	7,10	2,16	6,19	398,12	-
	<b>2,51</b>	<b>7,30</b>	<b>108,62</b>	<b>6,17</b>	<b>2,54</b>	<b>7,15</b>	<b>398,01</b>	-
7	2,53	10,04	119,34	5,86	2,83	7,13	398,19	-
	<b>2,50</b>	<b>10,16</b>	<b>99,39</b>	<b>6,72</b>	<b>2,29</b>	<b>8,56</b>	<b>398,02</b>	-
8	2,57	9,77	118,18	6,91	2,20	5,45	398,22	-
	<b>2,51</b>	<b>8,81</b>	<b>106,32</b>	<b>5,92</b>	<b>2,73</b>	<b>7,63</b>	<b>398,04</b>	-
9	2,52	7,69	103,02	6,85	2,86	6,67	398,27	-
	<b>2,52</b>	<b>10,04</b>	<b>119,34</b>	<b>5,86</b>	<b>2,83</b>	<b>7,13</b>	<b>398,05</b>	-
10	2,51	7,45	119,83	5,13	2,56	6,95	398,31	-
	<b>2,52</b>	<b>7,69</b>	<b>103,02</b>	<b>6,85</b>	<b>2,86</b>	<b>6,67</b>	<b>398,15</b>	-
11	2,50	14,23	120,82	6,25	2,82	8,78	398,35	-
	<b>2,53</b>	<b>8,01</b>	<b>120,16</b>	<b>5,87</b>	<b>2,49</b>	<b>8,33</b>	<b>398,16</b>	-
12	2,55	8,01	120,16	5,87	2,49	8,33	398,44	-
	<b>2,54</b>	<b>6,34</b>	<b>115,22</b>	<b>7,15</b>	<b>2,85</b>	<b>5,99</b>	<b>398,26</b>	-
13	2,50	8,13	111,43	4,76	2,33	7,90	398,44	-
	<b>2,54</b>	<b>12,44</b>	<b>120,00</b>	<b>6,35</b>	<b>2,48</b>	<b>7,96</b>	<b>398,27</b>	-
14	2,62	8,29	118,68	7,11	2,29	6,30	398,57	-
	<b>2,50</b>	<b>7,45</b>	<b>119,83</b>	<b>5,13</b>	<b>2,56</b>	<b>6,95</b>	<b>398,28</b>	-
15	2,54	10,32	113,24	6,11	2,75	8,88	398,58	-
	<b>2,50</b>	<b>14,23</b>	<b>120,82</b>	<b>6,25</b>	<b>2,82</b>	<b>8,78</b>	<b>398,33</b>	-
16	2,56	6,34	115,22	7,15	2,85	5,99	398,61	-
	<b>2,53</b>	<b>10,32</b>	<b>113,24</b>	<b>6,11</b>	<b>2,75</b>	<b>8,88</b>	<b>398,38</b>	-

Tabella 4.31: Confronto tra la strategia alternativa e il metodo classico.

## 5° Prova

Considerando i massimi e i minimi di ogni componente, il range di riferimento scelti per la quinta prova sono riportati in tabella 4.32.

RANGE DI RIFERIMENTO DEI FATTORI

ICE [L]	2.5-2.62
PE [kW/kWh]	6.30-14.25
EM [kW]	99.35-122.70
TC [-]	4.70-7.20
FD [-]	2.10-2.90
C_rate	5.40-8.90

Tabella 4.32: Range di riferimento quinta prova.

Anche per la quinta prova si utilizzeranno 220 punti e una volta generata la Variation List si ripeterà la procedura eseguita per le prove precedenti. I risultati sono riportati nelle tabelle seguenti.

5° PROVA RISULTATI, SOC=11

Classifica	ICE [L]	PE	EM [kW]	TC [-]	FD [-]	Crate	Co <sub>2tw</sub>
1	2,58	6,36	112,30	5,27	2,61	8,38	9,20
2	2,56	6,55	120,51	6,50	2,88	8,13	9,65
3	2,54	7,20	119,87	4,79	2,35	8,50	10,18
4	2,60	6,42	107,74	6,77	2,46	8,52	10,70
5	2,57	7,45	122,06	5,02	2,72	8,83	10,77
6	2,55	7,01	111,66	6,06	2,17	8,69	11,36
7	2,60	6,64	114,22	4,92	2,73	7,77	12,78
8	2,61	6,73	104,64	5,54	2,24	8,76	13,00
9	2,53	6,92	117,96	5,05	2,21	7,42	15,61
10	2,54	7,79	121,24	6,11	2,45	8,24	17,07
11	2,56	7,05	110,30	5,40	2,63	7,92	19,92
12	2,58	7,76	113,85	6,29	2,59	8,59	20,10
13	2,60	7,11	121,79	5,81	2,13	6,74	20,20
14	2,51	6,77	122,61	6,60	2,69	6,40	20,96
15	2,52	6,46	113,31	5,33	2,82	6,64	21,19
16	2,50	7,36	121,06	5,58	2,51	7,07	23,25
...	...	...	...	...	...	...	...

105	2,61	8,44	107,47	4,71	2,22	5,77	116,79
106	2,50	12,64	121,61	6,38	2,74	8,63	116,84
107	2,61	11,39	116,50	5,21	2,76	8,08	117,39
108	2,56	10,28	111,03	5,95	2,50	7,15	118,20
109	2,59	11,49	121,88	6,21	2,82	7,60	119,88
110	2,55	8,88	101,81	5,00	2,60	6,56	120,32

Tabella 4.33: Migliori 110 architetture, calcolate impostando un valore di SOC=11.

5° PROVA RISULTATI SOC=0 e confronto con SOC=11

Classifica	ICE [L]	PE	EM [kW]	TC [-]	FD [-]	Crate	Co <sub>2</sub> ttw	Posizione SOC=11
1	2,50	8,94	117,68	7,05	2,47	6,86	396,75	63
2	2,51	6,77	122,61	6,60	2,69	6,40	397,21	14
3	2,50	9,47	109,75	6,71	2,27	8,44	397,24	50
4	2,52	7,54	111,75	6,81	2,78	6,82	397,28	41
5	2,50	12,64	121,61	6,38	2,74	8,63	397,31	106
6	2,53	9,84	116,68	6,99	2,16	6,41	397,59	102
7	2,52	9,37	120,78	6,10	2,75	7,22	397,62	65
8	2,51	7,23	114,86	6,32	2,49	7,23	397,66	20
9	2,51	10,03	119,05	5,72	2,33	6,60	397,74	95
10	2,51	8,41	113,58	6,15	2,66	7,64	397,77	40
11	2,55	6,49	118,50	7,02	2,77	6,25	397,82	19
12	2,53	9,59	117,41	6,28	2,68	8,71	397,83	39
13	2,53	8,54	103,00	7,12	2,28	7,26	397,85	72
14	2,55	9,16	120,15	6,85	2,19	5,78	397,92	98
15	2,51	8,16	105,55	7,16	2,89	8,85	397,99	36
16	2,52	7,14	104,00	6,96	2,58	8,42	398,04	17
...								
104	2,61	7,67	118,69	4,82	2,64	7,31	400,52	26
105	2,61	7,26	109,47	5,20	2,84	6,18	400,57	55
106	2,60	6,64	114,22	4,92	2,73	7,77	400,59	7
107	2,61	11,39	116,50	5,21	2,76	8,08	400,70	107
108	2,61	8,44	107,47	4,71	2,22	5,77	400,86	105
109	2,62	8,91	100,44	5,68	2,81	8,30	400,87	81

MASSIMO  
SPOSTAMENTO

101

Tabella 4.34: Analisi delle migliori 110 architetture, impostando un SOC=0.

5° PROVA RISULTATI, SOC=0 e SOC=11

Classifica	ICE [L]	PE	EM [kW]	TC [-]	FD [-]	Crate	C <sub>02ttw</sub>	Posizione SOC=11
1	2,50	8,94	117,68	7,05	2,47	6,86	396,75	Stretegia altern.
	2,50	8,94	117,68	<b>7,08</b>	2,47	6,86	<b>396,73</b>	Metodo. classico
2	2,51	6,77	122,61	6,60	2,69	6,40	397,21	-
	2,51	6,77	122,61	<b>6,70</b>	2,69	6,40	<b>397,14</b>	-
3	2,50	9,47	109,75	6,71	2,27	8,44	397,24	-
	<b>2,52</b>	<b>7,54</b>	<b>111,75</b>	<b>6,87</b>	<b>2,78</b>	<b>6,82</b>	<b>397,20</b>	-
4	2,52	7,54	111,75	6,81	2,78	6,82	397,28	-
	<b>2,50</b>	<b>12,64</b>	<b>121,61</b>	<b>6,51</b>	<b>2,74</b>	<b>8,63</b>	<b>397,20</b>	-
5	2,50	12,64	121,61	6,38	2,74	8,63	397,31	-
	<b>2,50</b>	<b>9,47</b>	<b>109,75</b>	<b>6,79</b>	<b>2,27</b>	<b>8,44</b>	<b>397,22</b>	-
6	2,53	9,84	116,68	6,99	2,16	6,41	397,59	-
	<b>2,51</b>	<b>7,23</b>	<b>114,86</b>	<b>6,46</b>	<b>2,49</b>	<b>7,23</b>	<b>397,43</b>	-
7	2,52	9,37	120,78	6,10	2,75	7,22	397,62	-
	<b>2,53</b>	<b>9,59</b>	<b>117,41</b>	<b>6,43</b>	<b>2,68</b>	<b>8,71</b>	<b>397,53</b>	-
8	2,51	7,23	114,86	6,32	2,49	7,23	397,66	-
	<b>2,52</b>	<b>9,37</b>	<b>120,78</b>	<b>6,27</b>	<b>2,75</b>	<b>7,22</b>	<b>397,53</b>	-
9	2,51	10,03	119,05	5,72	2,33	6,60	397,74	-
	2,51	10,03	119,05	<b>5,95</b>	2,33	6,60	397,57	-
10	2,51	8,41	113,58	6,15	2,66	7,64	397,77	-
	<b>2,52</b>	<b>9,84</b>	<b>116,68</b>	<b>7,02</b>	<b>2,16</b>	<b>6,41</b>	<b>397,57</b>	-
11	2,55	6,49	118,50	7,02	2,77	6,25	397,82	-
	<b>2,50</b>	<b>8,41</b>	<b>113,58</b>	<b>6,31</b>	<b>2,66</b>	<b>7,64</b>	<b>397,63</b>	-
12	2,53	9,59	117,41	6,28	2,68	8,71	397,83	-
	<b>2,55</b>	<b>9,16</b>	<b>120,15</b>	<b>6,90</b>	<b>2,19</b>	<b>5,78</b>	<b>397,64</b>	-
13	2,53	8,54	103,00	7,12	2,28	7,26	397,85	-
	<b>2,54</b>	<b>11,24</b>	<b>121,15</b>	<b>6,57</b>	<b>2,44</b>	<b>7,93</b>	<b>397,71</b>	-
14	2,55	9,16	120,15	6,85	2,19	5,78	397,92	-
	<b>2,54</b>	<b>6,49</b>	<b>118,50</b>	<b>7,05</b>	<b>2,77</b>	<b>6,25</b>	<b>397,71</b>	-
15	2,51	8,16	105,55	7,16	2,89	8,85	397,99	-
	<b>2,50</b>	<b>7,36</b>	<b>121,06</b>	<b>5,84</b>	<b>2,51</b>	<b>7,07</b>	<b>397,73</b>	-
16	2,52	7,14	104,00	6,96	2,58	8,42	398,04	-
	<b>2,53</b>	<b>7,79</b>	<b>121,24</b>	<b>6,28</b>	<b>2,45</b>	<b>8,24</b>	<b>397,79</b>	-

Tabella 4.35: Confronto tra la strategia alternativa e il metodo classico.

Come si può notare le due classifiche sono leggermente diverse (i valori differenti sono evidenziati in grassetto), ma questo è dovuto alla differenza dei range di riferimento riferiti alla cilindrata motore e la torque coupling. Questo comporta una distribuzione leggermente diversa dei punti all'interno del piano sperimentale Sobol. Ma è evidente che entrambi i metodi al primo posto hanno individuato la stessa architettura.

5° PROVA RISULTATI, SOC=0

Classifica	ICE [L]	PE	EM [kW]	TC [-]	FD [-]	Crate	Co <sub>2ttw</sub>	Posizione SOC=11
1	2,50	8,94	117,68	7,05	2,47	6,86	396,75	Strategia
	2,50	8,94	117,68	<b>7,08</b>	2,47	6,86	<b>396,73</b>	Metodo classico

Tabella 4.36: La migliore architettura individuata per la strategia alternativa e per il metodo classico.

Un'ulteriore indagine sarà effettuata tramite l'ottimizzazione CAGE in modo da verificare se l'ottimizzatore individua, per entrambe le metodologie, la stessa architettura ottimale.

Si continua con la seconda fase della procedura e si sceglie come punti di partenza per la ricerca del minimo locale gli stessi punti utilizzati per il metodo classico, in modo da far un confronto. In più si utilizzerà un quarto blocco costituito dalle migliori 8 architetture individuate dalla strategia alternativa.

In definitiva i vari blocchi sono costituiti dalle seguenti architetture:

- I Blocco: si considerano dei valori fuori dal range di riferimento;
- II Blocco: si considerano dei valori all'interno del range di riferimento;
- III Blocco: si utilizzano i valori delle prime 8 architetture migliori individuate dal metodo classico.
- IV Blocco: si utilizzano i valori delle prime 8 architetture migliori individuate dalla strategia alternativa.

Le varie architetture di partenza sono illustrate in tabella 4.37.

Punti di partenza per la ricerca dei minimi locali

I Blocco	ICE [L]	PE	EM [kW]	TC [-]	FD [-]	Crate
1	1.5	2	50	2	1.5	2
2	2	3	70	3	2	3
3	3	5	80	4	3	4
4	4	15	90	8	6	5
5	5	18	130	10	8	9
6	10	20	140	15	10	12
7	15	25	160	20	15	20
8	20	30	200	30	20	30

<i>II Blocco</i>	<b>ICE [L]</b>	<b>PE</b>	<b>EM [kW]</b>	<b>TC [-]</b>	<b>FD [-]</b>	<b>Crate</b>
9	2,51	6,5	99,5	5,2	2,2	5,5
10	2,52	7,5	100	5,5	2,3	5,8
11	2,53	8,5	104	5,8	2,4	6
12	2,54	9,5	106	6	2,5	6,5
13	2,55	10,5	110	6,5	2,6	7
14	2,56	11,5	115	6,8	2,7	7,5
15	2,58	12,5	120	7	2,8	8
16	2,59	13,5	121	7,1	2,85	8,5
<i>III Blocco</i>	<b>ICE [L]</b>	<b>PE</b>	<b>EM [kW]</b>	<b>TC [-]</b>	<b>FD [-]</b>	<b>Crate</b>
17	2,50	8,94	117,68	7,08	2,47	6,86
18	2,51	6,77	122,61	6,70	2,69	6,40
19	2,52	7,54	111,75	6,87	2,78	6,82
20	2,50	12,64	121,61	6,51	2,74	8,63
21	2,50	9,47	109,75	6,79	2,27	8,44
22	2,51	7,23	114,86	6,46	2,49	7,32
23	2,53	9,59	117,41	6,43	2,68	8,71
24	2,51	9,37	120,78	6,27	2,75	7,22
<i>IV Blocco</i>	<b>ICE [L]</b>	<b>PE</b>	<b>EM [kW]</b>	<b>TC [-]</b>	<b>FD [-]</b>	<b>Crate</b>
25	2,50	8,94	117,68	7,05	2,47	6,86
26	2,51	6,77	122,61	6,60	2,69	6,40
27	2,50	9,47	109,75	6,71	2,27	8,44
28	2,52	7,54	111,75	6,81	2,78	6,82
29	2,50	12,64	121,61	6,38	2,74	8,63
30	2,53	9,84	116,68	6,99	2,16	6,41
31	2,52	9,37	120,78	6,10	2,75	7,22
32	2,51	7,23	114,86	6,32	2,49	7,23

Tabella 4.37: Punti di partenza per la ricerca dei minimi locali

Per i seguenti punti di partenza, le architetture individuate da CAGE che restituiscono valori di minimo locale di CO<sub>2</sub> sono riportate in tabella 4.38.

Valori di minimo locale

<i>I Blocco</i>	<b>ICE</b> <b>[L]</b>	<b>PE</b>	<b>EM</b> <b>[kW]</b>	<b>TC</b> <b>[-]</b>	<b>FD</b> <b>[-]</b>	<b>Crate</b>	<b>Co<sub>2ttw</sub></b> <b>[g/km]</b>
1	2,502	8,943	117,671	7,050	2,471	6,865	396,750
2	2,502	8,943	117,671	7,050	2,471	6,865	396,750
3	2,507	9,114	117,446	7,035	2,411	6,784	396,766
4	2,503	8,994	117,603	7,047	2,453	6,839	396,756
5	2,505	9,281	121,919	6,534	2,699	7,337	396,868
6	2,505	9,281	121,919	6,534	2,699	7,337	396,868
7	2,505	9,281	121,919	6,534	2,699	7,337	396,868
8	2,505	9,281	121,919	6,534	2,699	7,337	396,868
<i>II Blocco</i>	<b>ICE</b> <b>[L]</b>	<b>PE</b>	<b>EM</b> <b>[kW]</b>	<b>TC</b> <b>[-]</b>	<b>FD</b> <b>[-]</b>	<b>Crate</b>	<b>Co<sub>2ttw</sub></b> <b>[g/km]</b>
9	2,503	8,993	117,614	7,047	2,454	6,841	396,755
10	2,502	8,942	117,668	7,050	2,472	6,866	396,751
11	2,502	8,941	117,672	7,050	2,472	6,865	396,750
12	2,501	8,940	117,683	7,053	2,472	6,863	396,746
13	2,505	9,348	121,926	6,529	2,701	7,365	396,869
14	2,505	9,287	122,047	6,523	2,704	7,345	396,864
15	2,505	9,317	122,021	6,520	2,704	7,359	396,868
16	2,505	9,287	122,046	6,523	2,704	7,345	396,864
<i>III Blocco</i>	<b>ICE</b> <b>[L]</b>	<b>PE</b>	<b>EM</b> <b>[kW]</b>	<b>TC</b> <b>[-]</b>	<b>FD</b> <b>[-]</b>	<b>Crate</b>	<b>Co<sub>2ttw</sub></b> <b>[g/km]</b>
17	2,502	8,941	117,669	7,050	2,472	6,865	396,750
18	2,504	9,044	117,556	7,042	2,436	6,814	396,759
19	2,505	9,278	122,050	6,523	2,704	7,343	396,864
20	2,503	8,991	117,617	7,047	2,455	6,842	396,755
21	2,505	9,412	121,965	6,523	2,703	7,391	396,867
22	2,505	9,253	121,888	6,539	2,697	7,325	396,869
23	2,502	8,939	117,669	7,051	2,472	6,865	396,751
24	2,505	9,249	122,015	6,527	2,703	7,331	396,865

<i>IV Blocco</i>	<b>ICE</b> [L]	<b>PE</b>	<b>EM</b> [kW]	<b>TC</b> [-]	<b>FD</b> [-]	<b>Crate</b>	<b>Co2ttw</b> [g/km]
25	2,505	9,278	121,909	6,534	2,699	7,338	396,868
26	2,505	9,280	121,886	6,537	2,698	7,335	396,869
27	2,501	8,940	117,681	7,053	2,472	6,863	396,747
28	2,505	9,284	121,904	6,535	2,699	7,338	396,869
29	2,505	9,073	117,490	7,039	2,426	6,813	396,759
30	2,505	9,275	122,019	6,526	2,703	7,340	396,865
31	2,505	9,247	121,905	6,537	2,698	7,324	396,869
32	2,503	8,984	117,624	7,046	2,457	6,845	396,756

Tabella 4.39: Valori di minimo locale trovati da CAGE.

In figura 4.15 si mostra una vista del modello, in cui sono evidenziati con dei quadrati verdi i punti di minimo locale trovati dall'ottimizzatore CAGE.

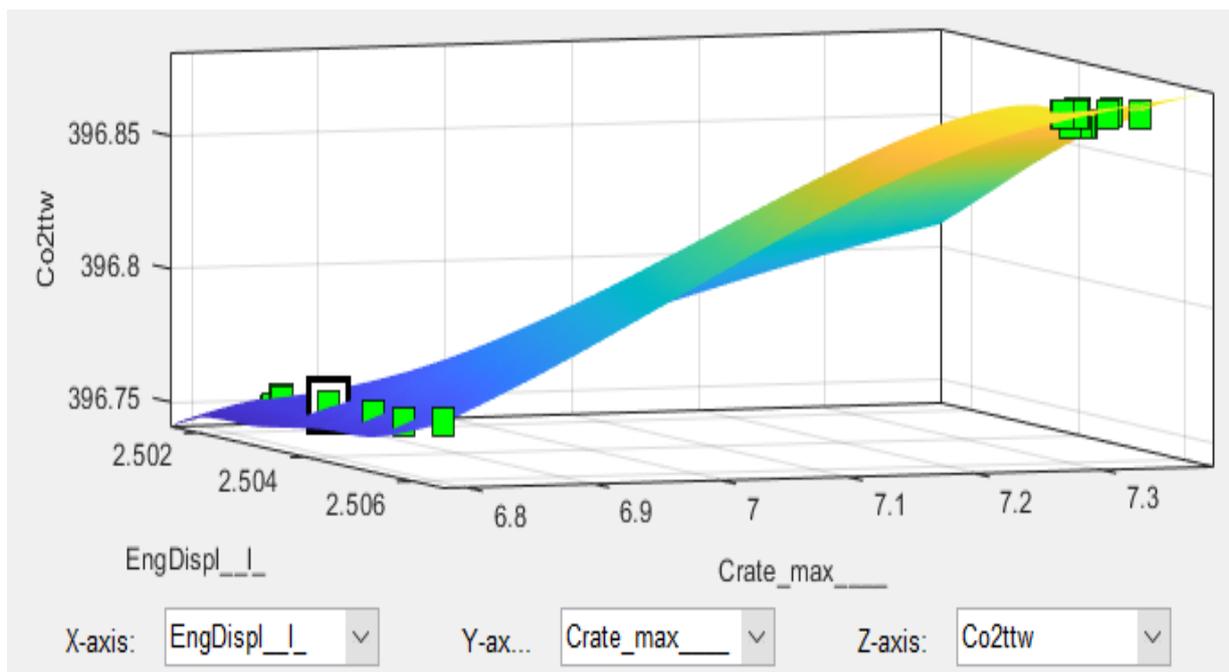


Tabella 4.15: Rappresentazione grafica di una vista del modello con relativi minimi locali individuati da CAGE

Nella tabella precedente si evidenziano le architetture che si andranno ad analizzare in DP per un confronto riguardo i valori della CO<sub>2</sub>. Il confronto è riportato in tabella 4.40 e l'errore è calcolato nel seguente modo:

$$ERRORE \% = (CO_{2DP} - CO_{2CAGE}) / (CO_{2DP}) * 100 \quad (4.3)$$

Valori di minimo locale, confronto dei valori di CO<sub>2</sub>

<i>I Blocco</i>	ICE [L]	PE	EM [kW]	TC [-]	FD [-]	Crate	CO <sub>2</sub> ttw DP	CO <sub>2</sub> ttw CAGE	Errore %
1	2,50	8,94	117,67	7,05	2,47	6,87	396,70	396,75	-0,01
3	2,51	9,11	117,45	7,03	2,41	6,78	396,82	396,77	0,01
4	2,50	8,99	117,60	7,05	2,45	6,84	396,63	396,76	-0,03
5	2,51	9,28	121,92	6,53	2,70	7,34	396,73	396,87	-0,03
<i>II Blocco</i>	ICE [L]	PE	EM [kW]	TC [-]	FD [-]	Crate	CO <sub>2</sub> ttw DP	CO <sub>2</sub> ttw CAGE	Errore %
9	2,50	8,99	117,61	7,05	2,45	6,84	396,63	396,76	-0,03
10	2,50	8,94	117,67	7,05	2,47	6,87	396,71	396,75	-0,01
11	2,50	8,94	117,67	7,05	2,47	6,87	396,70	396,75	-0,01
12	2,50	8,94	117,68	7,05	2,47	6,86	396,74	396,75	0,00
14	2,51	9,35	121,93	6,53	2,70	7,37	396,83	396,87	-0,01
15	2,51	9,29	122,05	6,52	2,70	7,35	396,75	396,86	-0,03
16	2,51	9,32	122,02	6,52	2,70	7,36	396,75	396,87	-0,03
<i>III Blocco</i>	ICE [L]	PE	EM [kW]	TC [-]	FD [-]	Crate	CO <sub>2</sub> ttw DP	CO <sub>2</sub> ttw CAGE	Errore %
17	2,50	8,94	117,67	7,05	2,47	6,87	396,72	396,75	-0,01
18	2,50	9,04	117,56	7,04	2,44	6,81	396,57	396,76	-0,05
19	2,51	9,28	122,05	6,52	2,70	7,34	396,77	2,51	-0,02
20	2,50	8,99	117,62	7,05	2,45	6,84	396,65	396,75	-0,03
21	2,51	9,41	121,97	6,52	2,70	7,39	396,84	396,87	-0,01
22	2,51	9,25	121,89	6,54	2,70	7,32	396,69	396,87	-0,04
23	2,50	8,94	117,67	7,05	2,47	6,86	396,71	396,75	-0,01
24	2,51	9,25	122,01	6,53	2,70	7,33	396,73	396,87	-0,03
<i>IV Blocco</i>	ICE [L]	PE	EM [kW]	TC [-]	FD [-]	Crate	CO <sub>2</sub> ttw DP	CO <sub>2</sub> ttw CAGE	Errore %
25	2,51	9,28	121,91	6,53	2,70	7,34	396,72	396,868	-0,04
26	2,51	9,28	121,89	6,54	2,70	7,34	396,70	396,869	-0,04
27	2,50	8,94	117,68	7,05	2,47	6,86	396,73	396,747	0,00

28	2,51	9,28	121,90	6,53	2,70	7,34	396,73	396,869	-0,03
29	2,51	9,07	117,49	7,04	2,43	6,81	396,55	396,759	-0,05
30	2,51	9,28	122,02	6,53	2,70	7,34	396,72	396,865	-0,04
31	2,51	9,25	121,90	6,54	2,70	7,32	396,70	396,869	-0,04
32	2,50	8,98	117,62	7,05	2,46	6,84	396,62	396,756	-0,03
<b>ERRORE MEDIO COMPLESSIVO</b>									
-0,03									

Tabella 4.40: Confronto dei valori di CO<sub>2</sub> individuati da CAGE e DP

Il Design ottimale individuato dalla strategia alternativa è:

<i>Design ottimale</i>	
<i>ICE [L]</i>	2.51
<i>PE [kW/kWh]</i>	9.07
<i>EM [kW]</i>	117.49
<i>TC [-]</i>	7.04
<i>FD [-]</i>	2.43
<i>C_rate</i>	6.81
<i>CO<sub>2ttw</sub> [g/km]</i>	396.55

Tabella 4.41: Design ottimale individuato dalla strategia alternativa

## Conclusione

In tabella 4.42 e 4.43 si riportano i vari range di riferimento utilizzati per entrambi i metodi e in tabella 4.44 le migliori architetture individuate utilizzando l'ottimizzatore di CAGE, in modo da avere un'idea globale dei risultati della procedura svolta.

RANGE DI RIFERIMENTO DEI FATTORI

	<b>PROVA I</b>		<b>PROVA II</b>	
	METODO CLASSICO	STRATEGIA ALTERNATIVA	METODO CLASSICO	STRATEGIA ALTERNATIVA
ICE [L]	2.5-5	2.5-5	2.5-3.60	2.5-3.60
PE [kW/kWh]	5-30	5-30	5-28.80	5-28.80
EM [kW]	35-125	35-125	35-123.30	35-123.30
TC [-]	2-8	2-8	2-8	2-8
FD [-]	2-8	2-8	2-3.60	2-3.60
C_rate	3-10	3-10	3-9.95	3-9.95
	<b>PROVA III</b>		<b>PROVA IV</b>	
ICE [L]	2.5-2.85	2.5-2.85	2.5-2.61	2.5-2.65
PE [kW/kWh]	5.70-19	5.70-19	6.10-16.30	6.10-16.30
EM [kW]	70.10-123	70.10-123	80.6-122.80	80.6-122.80
TC [-]	2.80-7.65	2.80-7.65	3.90-7.40	3.90-7.40
FD [-]	2-3.20	2-3.20	2.10-3	2.10-3
C_rate	3.40-9.35	3.40-9.35	5-9.10	5-9.10

Tabella 4.42: Range di riferimento relativo alle prime quattro prove

<b>PROVA V</b>		
	<b>METODO CLASSICO</b>	<b>STRATEGIA ALTERNATIVA</b>
<i>ICE [L]</i>	2.5-2.6	2.5-2.62
<i>PE [kW/kWh]</i>	6.30-14.25	6.30-14.25
<i>EM [kW]</i>	99.35-122.70	99.35-122.70
<i>TC [-]</i>	5.10-7.20	4.70-7.20
<i>FD [-]</i>	2.10-2.90	2.10-2.90
<i>C_rate</i>	5.40-8.90	5.40-8.90

Tabella 4.43 Range di riferimento della quinta prova.

<b>MIGLIORI ARCHITETTURE: METODO CLASSICO</b>						
<b>ICE [L]</b>	<b>PE [kW/kWh]</b>	<b>EM [kW]</b>	<b>TC [-]</b>	<b>FD [-]</b>	<b>C_rate</b>	<b>CO<sub>2</sub>ttw [g/km]</b>
2.5	9.43	118.12	7.09	2.44	6.88	396.42
<b>MIGLIORI ARCHITETTURE: STRATEGIA ALTERNATIVA</b>						
2,51	9,07	117,49	7,04	2,43	6,81	396,55

Tabella 4.44: Migliori architetture individuate da entrambi i metodi

È possibile notare che per entrambi i metodi si è ottenuto un ottimo risultato ed inoltre la soluzione finale è alquanto simile, infatti la strategia alternativa è riuscita ad ottenere un risultato quasi ottimale.

La tecnica DoE utilizzata per l'ottimizzazione è stata indispensabile per lo studio di un problema così complesso, dove diversi fattori influiscono sull'obiettivo che si vuole raggiungere. Tale tecnica ha permesso di riuscire in poco tempo a trovare la soluzione ottimale, in quanto lo studio dei singoli fattori e la loro interazione sarebbe stata impensabile se si fosse attuata una procedura a tentativi. Sicuramente il metodo classico è più preciso e studia ogni singolo punto dello spazio fornito, ma i tempi computazionali sono molto onerosi. La soluzione ottimale infatti è stata raggiunta dopo due settimane circa di lavoro a pieno regime.

Si è pensato, quindi, di provare a trovare una soluzione che riducesse i tempi di calcolo senza che andasse ad influire particolarmente sul risultato. La strategia alternativa è un ottimo approccio che dimezza i tempi di processo e, se pur escludendo dei punti e parti del piano sperimentale, riesce comunque a raggiungere un risultato quasi ottimale, dimezzando i tempi di lavoro. Il metodo classico ovviamente può essere applicato in qualunque ambito della ricerca, mentre la strategia alternativa è limitata alla ricerca del design ottimale adoperando il tool di simulazione fornito della Dynamic Programming.

Si potrebbe pensare di distribuire sin dall'inizio meno punti sul piano sperimentale Sobol? La risposta non è un no certo, ma quasi. La scelta dei 300 punti è dovuta alla volontà di studiare

pienamente il piano di lavoro e non rischiare di escludere architetture ipoteticamente ottimali. Infatti in figura 5.1 è possibile notare la differenza della distribuzione dei punti nel piano, nel caso si scegliesse un numero punti pari a 300 (immagine di sinistra) e 110 punti (immagine di destra). Se inizialmente nei risultati delle prime prove (1-2) non si notano differenze, poiché il range di partenza scelto è molto ampio, tuttavia pian piano che il range si restringe si potrebbero escludere architetture ottimali. Per questo, nel caso in cui l'obiettivo fosse l'ottimizzazione di processo, di un prodotto, etc, è importante la scelta del numero di punti che si vuole studiare.

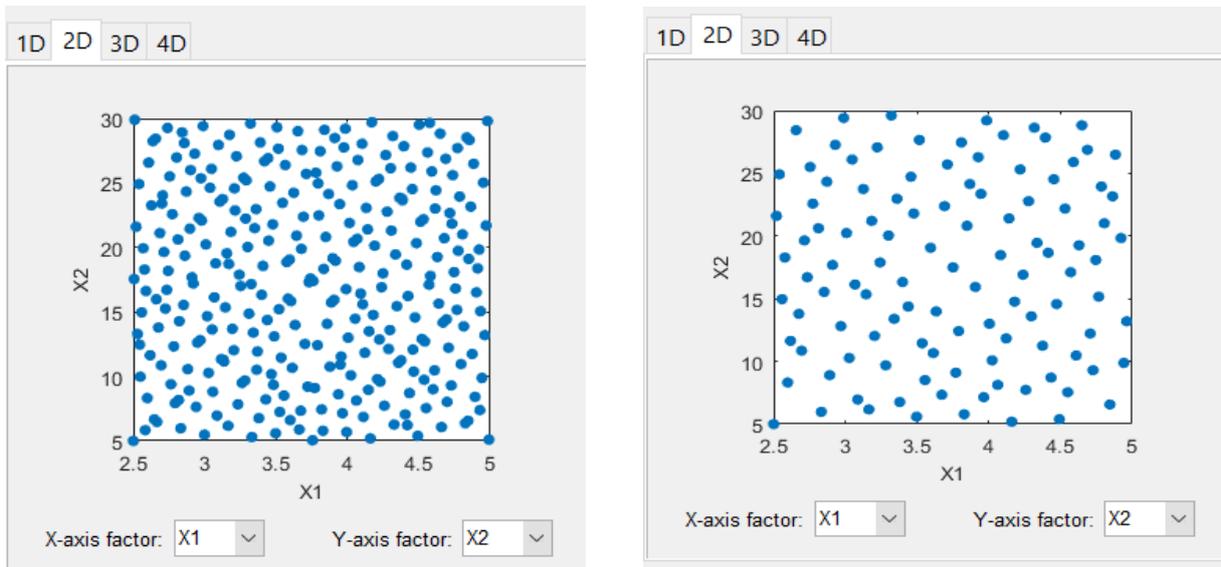


Figura 5.1: Distribuzione dei punti nel piano sperimentale: a sinistra 300 punti, a destra 110.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Ministero dello Sviluppo Economico, Ministero dell’Ambiente e della tutela del Territorio e del Mare, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, *Guida sul risparmio di carburanti e sulle emissioni di CO<sub>2</sub> delle autovetture*, 2016
- [2] D.Antonelli, *Evoluzione della limitazione di sostanze inquinanti e climalteranti delle normative di omologazione per autoveicoli*, 2015.
- [3] NASA's Goddard Space Flight Center, disponibile online.  
<https://svs.gsfc.nasa.gov/13142>
- [4] Analisi IPCC, Disponibile online.  
<https://earthobservatory.nasa.gov/features/GlobalWarming/page5.php>
- [5] Jerzy Merkisz, Jacek Pielecha, Stanislaw Radsimirski, *New trends in Emission Control in the European Union*, 2014, Switzerland
- [6] “Cars and Light Trucks”, Disponibile online.  
<https://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php#stds>
- [7] Regolamento (UE) 2017/1151 della Commissione, 01.06.2017
- [8] P.Mock; Jorg Kuhlwein; Uwe Tiegte; Vicente Franco; Anup Bandivadekar; John German. *The WLTP: How a new test procedure will affect fuel consumption values in the EU*. ICCT, 2014.
- [9] European Commission, *Reducing CO<sub>2</sub> emissions from passenger cars*, disponibile online. [https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars_en)
- [10] 284 final 2019/0143 Commissione Europea, *Regolamento del parlamento Europeo e del Consiglio che deinisce i livelli di prestazione in materia di emissioni di CO<sub>2</sub> dei veicoli pesanti nuovi*, 17.5.2018, Bruxelles, disponibile online.  
<http://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2018/IT/COM-2018-284-F1-IT-MAIN-PART-1.PDF>
- [11] Ran Bao;Victor Avila; James Baxter, *Effect of 48V Mild Hybrid System Layout on Powertrain System Efficiency and Its Potential of Fuel Economy Improvement*, March, 2017.
- [12] D.C. Montgomery, *Progettazione e analisi degli esperimenti*, McGraw-Hill,Milano;2005
- [13] F. Triefenbach, *Design of Experiments:the D-Optimal Approach and Its Implementation As a Computer Algoritm*, Gennaio 2008.
- [14] M. Cavazzuti, *Optimization Methods From Theory to Design Scientific and Technological Aspects in Mechanics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013
- [15] D.C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, John Willey & Sons, Asia,2009
- [16] E.Cereda, *Metodi quasi Monte Carlo per applicazioni finanziare*, Milano,2010
- [17] F.M.Azmin,; R. Stobart,“Benefiting from Sobol Sequences Experiment Design Type for Model-based Calibration, SAE International,2015
- [18] Model-Based Calibration Toolbox, disponibile online.  
<https://edulab.unitn.it/nfs/Manualistica/Software/MathWorks%20Guide/mbc/mbcmodeL.pdf>
- [19] Benjamin berger, 2012, *Modeling and Optimization for Stationary Base Engine Calibration*, Munchen
- [20] Hujun Yin,Yang Gao, Bin li, Daoqiang Zhang,Ming Yang,Yun Li, Frank Lawonn, Antonio J.Tallon-Ballesteros, 2016, *Intelligent Data Engineering and Automated Learning-IDEAK 2016*,Yangzhou, China. pp.241-243
- [21] G.Ferrari, *Motori a combustione interna*,2000
- [22] Paolo G.Iora, *Tecnologie per la mobilità sostenibile,veicoli elettrici, ibridi e a fuel cell*, Esculapio,Bologna, Ottobre 2016

- [23] Simone Nicoletti, *Accumulo elettrochimico di energia: Tecnologie, innovazione ed applicazione in ambito automobilistico*, 2016
- [24] Benjamin Berger, *Modelling and Optimization for stationary Base Engine Calibration*, 2012
- [25] M. Venditti, *Innovative Models and Algorithms for the Optimization of Layout and Control Strategy of Complex Diesel HEVs*, May, 2015
- [26] Richard Bellman; Robert E Kalaba, *Dynamic programming and modern control Theory*, Academic Press New York, 1965.
- [27] D.C. Montgomery, G.C. Runger, N.F. Hubele, *Statistica per ingegneria*, EGEA S.p.A, Gennaio 2014
- [28] Heavy-Duty Truck and Bus Engines, disponibile online:  
<https://www.dieselnet.com/standards/eu/hd.php#stds>
- [29] World Harmonized Vehicle Cycle (WHVC). Disponibile online:  
<https://www.dieselnet.com/standards/cycles/whvc.php>

## Ringraziamenti

Ringrazio la Prof.ssa Daniela Misul per avermi dato l'opportunità di avvicinarmi al vasto mondo dei veicoli ibridi. Il percorso tesi è stata una crescita non solo professionale, dove ho ampliato il mio bagaglio di conoscenze, avvicinandomi ad un mondo un po' lontano rispetto al percorso svolto, ma è stato anche un percorso di crescita personale. La Prof.ssa Misul è stata da esempio, insegnandomi molto sia in ambito personale che professionale. Un ringraziamento va anche a Claudio Maino che specialmente nelle prime fasi della tesi è stato presente, dandomi consigli e spunti per migliorare.

Ringrazio tutti i miei compagni di corso che durante questi anni mi hanno accompagnato in questo percorso, in particolare ringrazio la mia compagna di avventure e disavventure Giovanna che è stata sempre presente fino alla fine.

Ringrazio le mie conquiline Diletta e Giusy che mi hanno sopportata e supportata in questi anni, sempre con amore e affetto sincero.

Ringrazio il mio infinito amore Oreste, se sono qui è anche grazie a lui, ha sempre creduto in me e mi ha sempre sostenuto in qualunque scelta.

Ringrazio la mia immensa grande famiglia, per essere sempre presente.

AD MAIORA!