

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Meccanica

Propulsori Termici

A.A. 2021-2022

**Calcolo consumi ed emissioni di un
autoveicolo su cicli guida NEDC e WLTC**



Docenti:

Prof. Millo Federico

Prof. Piano Andrea

Studente:

Uccello Luca Maria

268036

Sommario

Introduzione e dati di input	1
Ipotesi adottate	2
Calcolo dei consumi di combustibile	3
Calcolo delle emissioni di CO₂ e NO_x	5
Calcolo delle emissioni di CO ₂	5
Calcolo delle emissioni di NO _x	6
Ciclo Omologativo NEDC.....	6
Consumo di combustibile (NEDC).....	6
Emissioni di CO ₂ e NO _x (NEDC)	9
Ciclo Omologativo WLTC.....	12
Consumo di combustibile (WLTC).....	13
Emissioni di CO ₂ e NO _x (WLTC)	15
Calcolo dell'energia meccanica	17
Funzionamento con Cut-Off e Stop-Start.....	21
Conclusioni	23

Introduzione e dati di input

L'obiettivo di questa esercitazione è la valutazione, attraverso simulazioni numeriche, del consumo di combustibile e delle emissioni di CO₂ e di NO_x dei due veicoli seguenti, entrambi dotati di un cambio manuale a 5 marce e un motore diesel da 1,3 litri di cilindrata e circa 51 kW di potenza:

- 1) Fiat Idea (Veicolo 1);
- 2) Fiat Punto (Veicolo 2).

A tale scopo, le suddette autovetture saranno sottoposte ai due cicli omologativi:

- 1) New European Driving Cycle (NEDC);
- 2) Worldwide Harmonized Light-Duty Test Cycle (WLTC).

Infine, si valuteranno gli effetti in termini di riduzione del consumo di combustibile e riduzione delle emissioni di CO₂, dati dall'adozione di tecnologie quali *Cut-Off* e *Stop-Start*.

Nella *tabella 1* si riportano i dati riguardanti le specifiche tecniche dei due veicoli presi in esame, in relazione ai due cicli omologativi.

Dati dei veicoli per i due cicli guida	NEDC		WLTC	
	Fiat Idea	Fiat Punto	Fiat Idea	Fiat Punto
Massa [kg]	1168	1063	1360	1210
Raggio ruote [mm]	289	285	289	285
Inerzia ruote [kgm ²]	2,7794	2,7794	2,7794	2,7794
F ₀ [N]	124,7	114,2	186	166
F ₁ [N/(km/h)]	0	0	0	0
F ₂ [N/(km/h) ²]	0,0364	0,0344	0,0419	0,039

Tabella 1 – Dati veicoli relativi ai due cicli omologativi

Nella *tabella 2* sono riportati i dati relativi al motore, uguale per entrambe le vetture.

Dati del motore	
Cilindrata [cm ³]	1248
Inerzia motore [kgm ²]	0,183
Velocità minima di rotazione [rpm]	800

Tabella 2 – Dati motore

Nella *tabella 3* sono riportati i dati relativi al combustibile ed alle emissioni di NO_x al minimo.

Dati combustibile ed emissioni NO _x al minimo	
Densità combustibile [g/l]	835
Consumo combustibile al minimo [g/h]	315
Velocità minima di rotazione [g/h]	1,2

Tabella 3 – Dati combustibile ed emissioni NO_x al minimo

Nella *tabella 4* sono riportati i dati relativi all'efficienza della trasmissione.

Dati combustibile ed emissioni NO _x al minimo	
Rendimento finale trasmissione	1
Rendimento trasmissione	0,94

Tabella 4 – Dati efficienza trasmissione

Inoltre, sono forniti i seguenti dati:

- Profilo di velocità del veicolo sia per ciclo *WLTP* sia per ciclo *NEDC*;
- Profilo di cambio marcia sia per ciclo *WLTP* che per ciclo *NEDC* (per il ciclo *WLTP* viene fornito un profilo di cambio marcia per ciascun veicolo);
- Rapporti di trasmissione e rapporto finale al ponte;
- Mappa dei consumi di combustibile;
- Mappa delle emissioni di NO_x .

Osservando i dati si possono notare alcune importanti differenze tra i due test omologativi; per una stessa vettura il ciclo *WLTP* considera una massa maggiore rispetto a quella prevista dal ciclo *NEDC*, a causa di una serie di optional che per il ciclo *NEDC* non vengono considerati. Un'altra differenza è relativa al profilo di cambio marcia; nel ciclo *WLTP* viene definito un profilo di cambio marcia ad hoc per il veicolo mentre, nel ciclo *NEDC*, il profilo è lo stesso per tutti i veicoli. Infine, anche la resistenza all'avanzamento, funzione della massa, della resistenza aerodinamica e della resistenza al rotolamento viene definita in modo diverso.

Ipotesi adottate

Le ipotesi adottate per questo tipo di analisi sono:

- 1) Transitori termici durante il *warm-up* trascurati;
- 2) Rendimento della trasmissione costante rispetto al carico;
- 3) Il ciclo guida è considerato come una serie di stati stazionari;
- 4) Il profilo di velocità adottato ricalca perfettamente il profilo di velocità impiegato nel ciclo omologativo di interesse in quanto si ha la mancanza di un modello di driver; per questa ragione si utilizza un approccio "a ritroso" (*backward*). Ciò rappresenta una semplificazione molto forte in quanto l'acquisizione dei dati, durante il ciclo omologativo, avviene mediante un guidatore in grado di seguire il profilo di velocità imposto con una tolleranza di $\pm 2 \text{ km/h}$.

Calcolo dei consumi di combustibile

Per ottenere il consumo di combustibile è necessario calcolare i punti operativi del motore e a tale scopo viene adottato l'approccio cinematico "a ritroso" (backward). La **velocità di rotazione del motore** viene calcolata a partire dalla velocità di avanzamento del veicolo, dal rapporto di trasmissione e dal raggio delle ruote secondo la relazione (1):

$$rpm [rpm] = \frac{v \left[\frac{km}{h} \right] \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot R_0 [m] \cdot 3,6} \cdot \tau_f \cdot \tau_{gb} \quad (1)$$

Dove:

- rpm = Velocità di rotazione del motore;
- τ_f = Rapporto di trasmissione finale;
- τ_{gb} = Rapporto di trasmissione, variabile in base alla marcia innestata;
- R_0 = Raggio delle ruote;
- v = Velocità di avanzamento del veicolo.

È importante osservare che la velocità minima di rotazione del motore è pari a $800 rpm$, pertanto tutti i valori di velocità inferiori a tale limite vengono eguagliati a quest'ultimo.

Quando il veicolo si trova in fase di accelerazione oltre alla resistenza all'avanzamento, bisogna considerare un termine inerziale che tenga conto, non solo della massa della vettura, ma anche di tutte le masse rotanti, pertanto è possibile calcolare la **potenza richiesta all'avanzamento** del veicolo mediante la relazione (2):

$$P_m \cdot \eta_t [kW] = F_{res} \cdot v + m_{app} \cdot \frac{dv}{dt} \cdot v \quad (2)$$

Dove:

- P_m = Potenza del motore;
- η_t = Rendimento della trasmissione, ritenuto costante e pari a $0,94$;
- F_{res} = Resistenza all'avanzamento;
- m_{app} = Massa apparente del veicolo.

A sua volta, la **resistenza all'avanzamento** viene calcolata tramite la relazione (3):

$$F_{res} = F_0 + F_1 \cdot v + F_2 \cdot v^2 \quad (3)$$

Dove:

- F_0, F_1, F_2 = Coefficienti di Coast Down, ricavati sperimentalmente.

La massa apparente, come detto sopra, tiene conto non solo della massa del veicolo ma anche di tutte le masse rotanti, pertanto può essere ricavata sfruttando la seguente relazione di equilibrio dell'energia cinetica (4):

$$\frac{1}{2} m_{app} \cdot v^2 = \frac{1}{2} m_v \cdot v^2 + \frac{1}{2} J_{wheel} \cdot \omega_{wheel}^2 + \frac{1}{2} J_{gb} \cdot \omega_{gb}^2 + \frac{1}{2} J_{eng} \cdot \omega_{eng}^2 \quad (4)$$

Dove:

- m_v = Massa del veicolo;
- J_{wheel} = Inerzia delle ruote;
- J_{gb} = Inerzia della trasmissione;
- J_{eng} = Inerzia del motore;
- ω_{wheel} = Velocità angolare delle ruote;
- ω_{gb} = Velocità angolare della trasmissione;
- ω_{eng} = Velocità angolare del motore.

Ricordando che:

$$\omega_{wheel} = \frac{v}{R_0} \quad (5)$$

$$\omega_{gb} = \omega_{wheel} \cdot \tau_{gb} \cdot \tau_f = \frac{v}{R_0} \cdot \tau_{gb} \cdot \tau_f \quad (6)$$

$$\omega_{eng} = \omega_{wheel} \cdot \tau_{gb} \cdot \tau_f = \frac{v}{R_0} \tau_{gb} \cdot \tau_f \quad (7)$$

Andando quindi a sostituire la (5), la (6) e la (7) nella (4) e trascurando l'inerzia del cambio, otteniamo la relazione (8) che ci permette di calcolare la **massa apparente**:

$$m_{app} \cong m_v + J_{wheel} \cdot \frac{1}{R_0^2} + J_{eng} \cdot \frac{\tau_{gb}^2 \cdot \tau_f^2}{R_0^2} \quad (8)$$

A questo punto è possibile valutare la **pressione media effettiva**, mediante la relazione (9):

$$bmep [bar] = 1200 \cdot \frac{P_m [kW]}{rpm \cdot V [dm^3]} \quad (9)$$

Dove:

- $bmep$ = Pressione media effettiva;
- V = Cilindrata del motore.

È bene sottolineare che per i valori negativi di potenza, si impone un valore di pressione media effettiva pari a 0.

In questo modo è possibile tracciare, per ogni ciclo omologativo, la mappa dei punti di funzionamento dei due veicoli.

Calcolo delle emissioni di CO₂ e NO_x

Calcolo delle emissioni di CO₂

La stima delle emissioni di CO₂ si può ottenere tramite il bilancio termico del carbonio, considerando le **moli di combustibile** e quelle dei prodotti di combustione che devono rispettare la seguente relazione **(10)**:

$$n_f = n_{CO_2} + n_{CO} + n_{HC} \quad (10)$$

Dove:

- n_f = Moli di combustibile;
- n_{CO_2} = Moli di CO₂;
- n_{CO} = Moli di CO;
- n_{HC} = Moli di HC.

Ricordando che il numero di moli di un composto chimico è pari al rapporto tra la massa del composto e la sua massa molare, possiamo riscrivere la **(10)** ottenendo la relazione **(11)**, la quale ci permette di correlare la **massa di combustibile** in relazione alle masse dei prodotti di combustione:

$$\frac{m_f}{\mu_f} = \frac{m_{CO_2}}{\mu_{CO_2}} + \frac{m_{CO}}{\mu_{CO}} + \frac{m_{HC}}{\mu_{HC}} \quad (11)$$

Dove:

- m_f = Massa di combustibile;
- m_{CO_2} = Massa di CO₂;
- m_{CO} = Massa di CO;
- m_{HC} = Massa di HC;
- μ_f = Massa molare di combustibile;
- μ_{CO_2} = Massa molare di CO₂;
- μ_{CO} = Massa molare di CO;
- μ_{HC} = Massa molare di HC.

La produzione di CO e HC, in seguito alla combustione, è irrisoria rispetto a quella di CO₂ pertanto possiamo trascurare i termini relativi a questi inquinanti; inoltre, in questo modo, si ottiene una sovrastima della quantità di CO₂ emessa, lasciando un margine di sicurezza, utile nel confronto con il limite massimo di emissioni da rispettare.

A questo punto possiamo riscrivere la **(11)** ottenendo la relazione **(12)**, la quale ci permette di ricavare la **massa di CO₂** emessa in seguito alla combustione:

$$m_{CO_2} \left[\frac{g}{km} \right] \cong m_f \cdot \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_f} = \frac{\rho_f \left[\frac{kg}{dm^3} \right]}{0.0315} \cdot V_f \left[\frac{l}{100km} \right] \quad (12)$$

Dove:

- ρ_f = Densità del combustibile;
- V_f = Consumo di combustibile, espresso in $l/100km$.

Calcolo delle emissioni di NO_x

Per quanto riguarda la misura degli NO_x, questa avviene attraverso un'interpolazione all'interno della mappa di funzionamento del motore che riporti le emissioni istantanee di NO_x [g/h] per le varie condizioni operative.

Ciclo Omologativo NEDC

Il ciclo NEDC (New European Driving Cycle), riportato in *figura 1*, è un ciclo di guida omologativo combinato; esso prevede un percorso di 11 km della durata di 1180 secondi. Il ciclo viene definito combinato perché costituito da due tratti differenti:

- 1) Una serie di quattro cicli ECE-15, rappresentanti le condizioni di guida di un veicolo in ambito cittadino dove la massima velocità raggiunta è pari a 50 km/h
- 2) Ciclo EUDC, rappresentante il profilo di guida di un percorso extraurbano in cui la massima velocità raggiunta è pari 120 km/h.

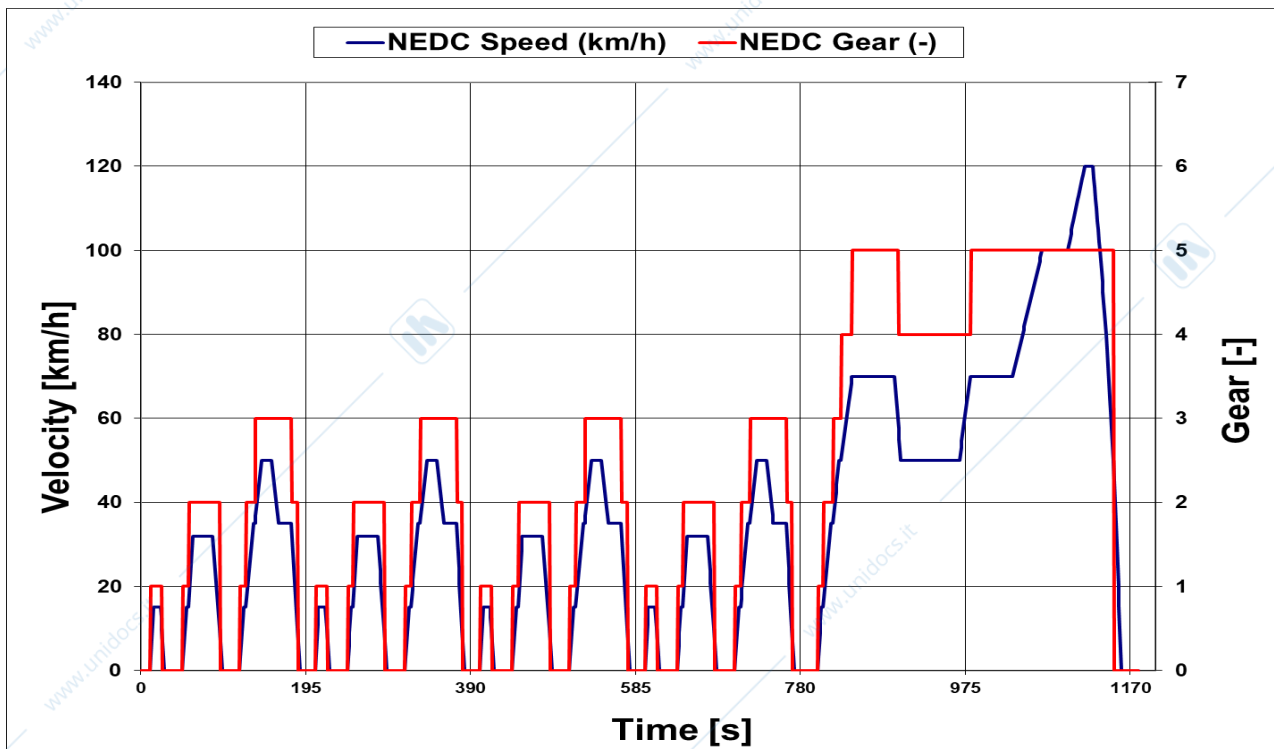


Figura 1 – Ciclo NEDC

Consumo di combustibile (NEDC)

Per tracciare la mappa di funzionamento del motore e poter quindi ricavare il consumo di combustibile, abbiamo bisogno, come detto in precedenza, dei valori di velocità di rotazione del motore, rappresentati in *figura 2* in funzione del tempo, e dei valori di pressione media effettiva, rappresentati in *figura 3* anch'essi in funzione del tempo.

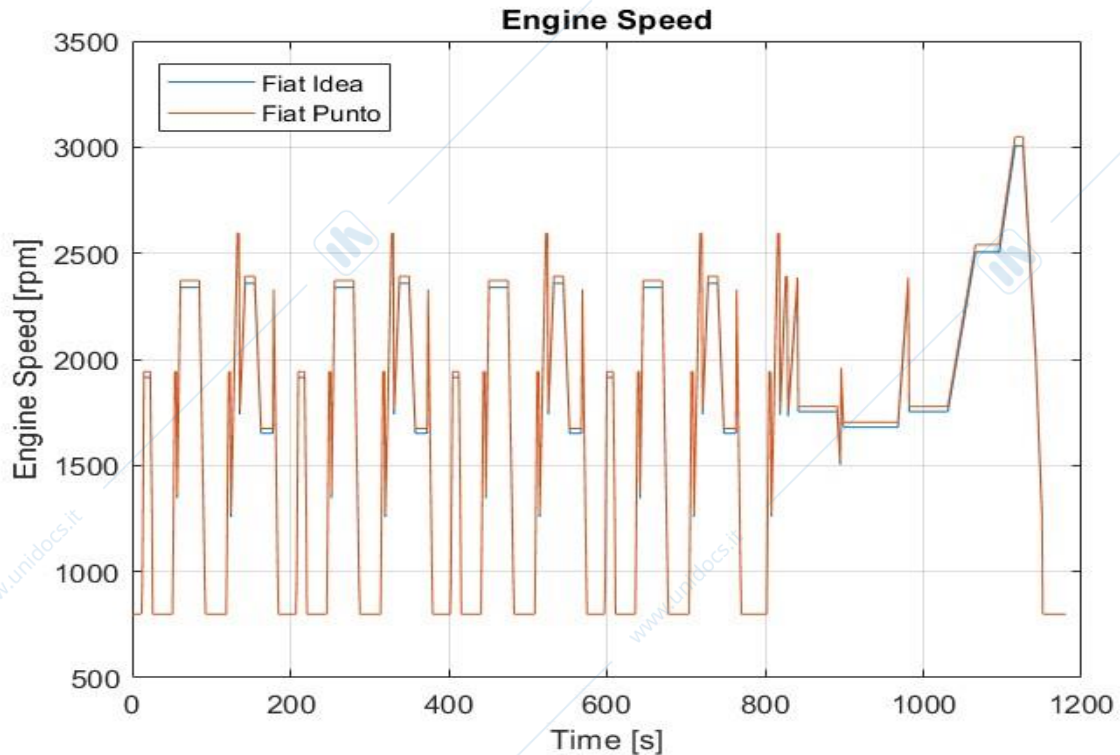


Figura 2 – Profilo di velocità di rotazione motore

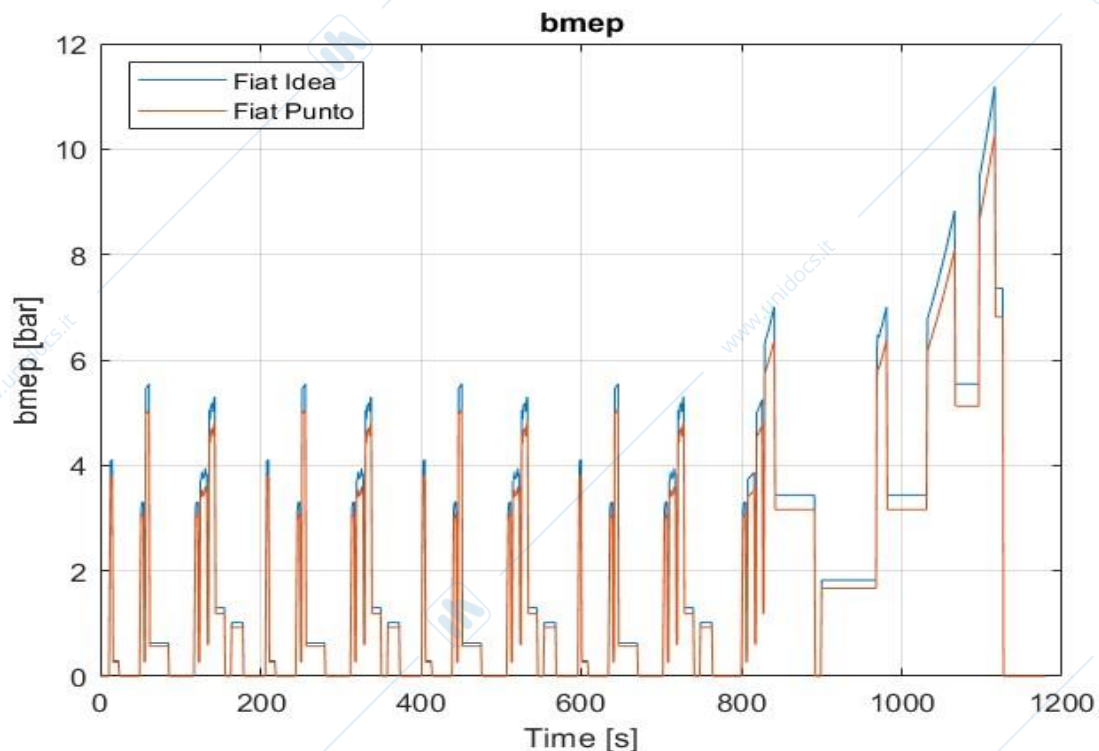


Figura 3 – Andamento della pressione media effettiva

Come si può notare dalle *figure 2 e 3*, gli andamenti dei parametri diagrammati sono molto simili tra un veicolo e l'altro, in quanto quest'ultimi presentano delle piccole differenze in termini di massa, raggio delle ruote e coefficienti di Coast Down, ma per il resto, i parametri costruttivi (cilindrata, trasmissione, inerzie, ecc.) risultano essere analoghi.

Noti i punti di funzionamento del motore, per entrambe le vetture, è possibile tracciare tali punti su una mappa di consumo sperimentale, definita in condizioni stazionarie, come mostrato in *figura 4*.

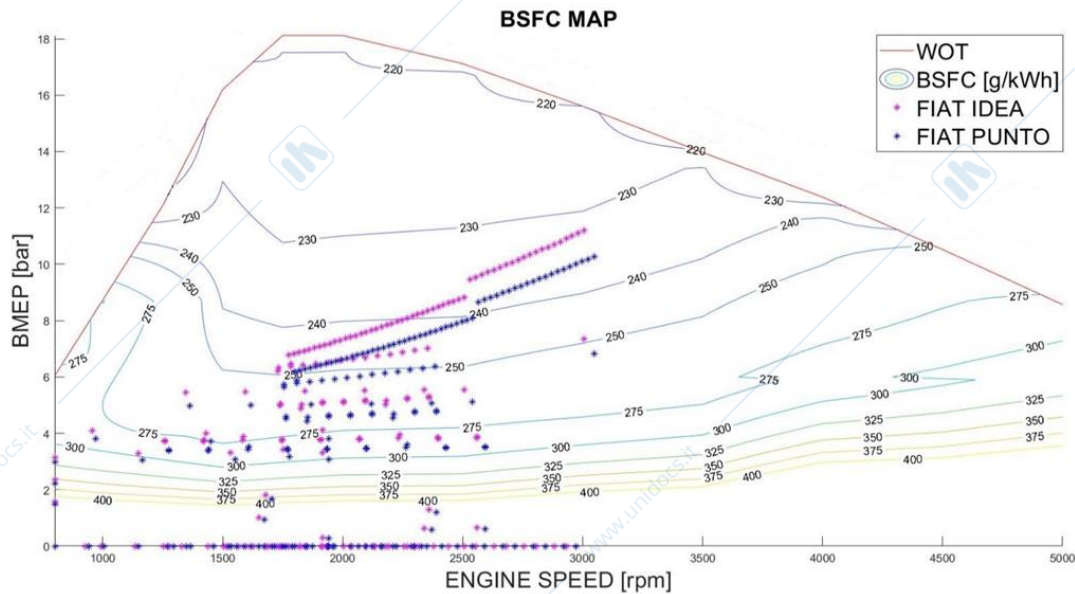


Figura 4 – Mappa dei punti di funzionamento del motore

È importante mettere in evidenza che, nella *figura 4*, le isolinee di consumo combustibile sono limitate alla curva di pieno carico del motore (*WOT*), in quanto tutti i punti che si trovano al di sopra di tale curva, non hanno significato fisico. Inoltre, sempre dalla *figura 4*, si può notare che la maggior parte dei punti operativi cade molto lontano dalle condizioni di pieno carico; ciò è dovuto alla scarsa dinamicità del ciclo *NEDC*, infatti le pressioni medie effettive raggiunte si mantengono sempre nell'intorno di valori medio-bassi, soprattutto nella fase urbana del ciclo dove le velocità e le accelerazioni sono molto contenute.

A questo punto è possibile, mediante interpolazione, ricavare il consumo istantaneo di combustibile per entrambi i veicoli (*figura 5*).

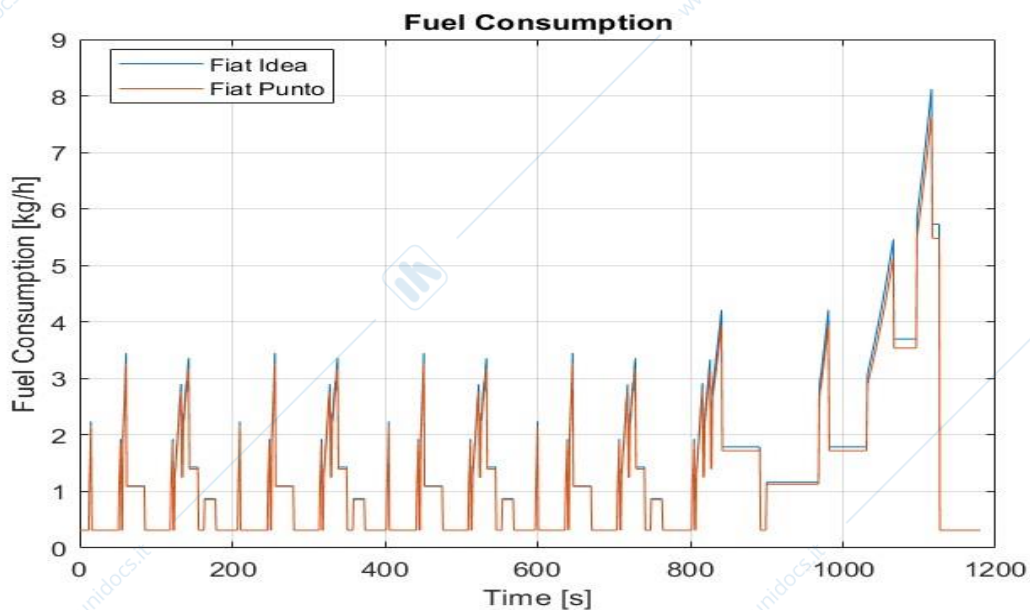


Figura 5 – Consumo istantaneo di combustibile

È importante osservare che, per il calcolo del consumo istantaneo di combustibile, la mappa di funzionamento del motore non è definita per valori di velocità di rotazione del motore inferiori a 850 rpm e di pressione media effettiva inferiore a $0,5 \text{ bar}$; pertanto, per tali condizioni operative, il consumo di combustibile si assume, per entrambi i veicoli, pari ad un consumo minimo di 315 g/h .

Dal consumo istantaneo si ricava, per entrambe le vetture, il consumo cumulativo di combustibile (figura 6).

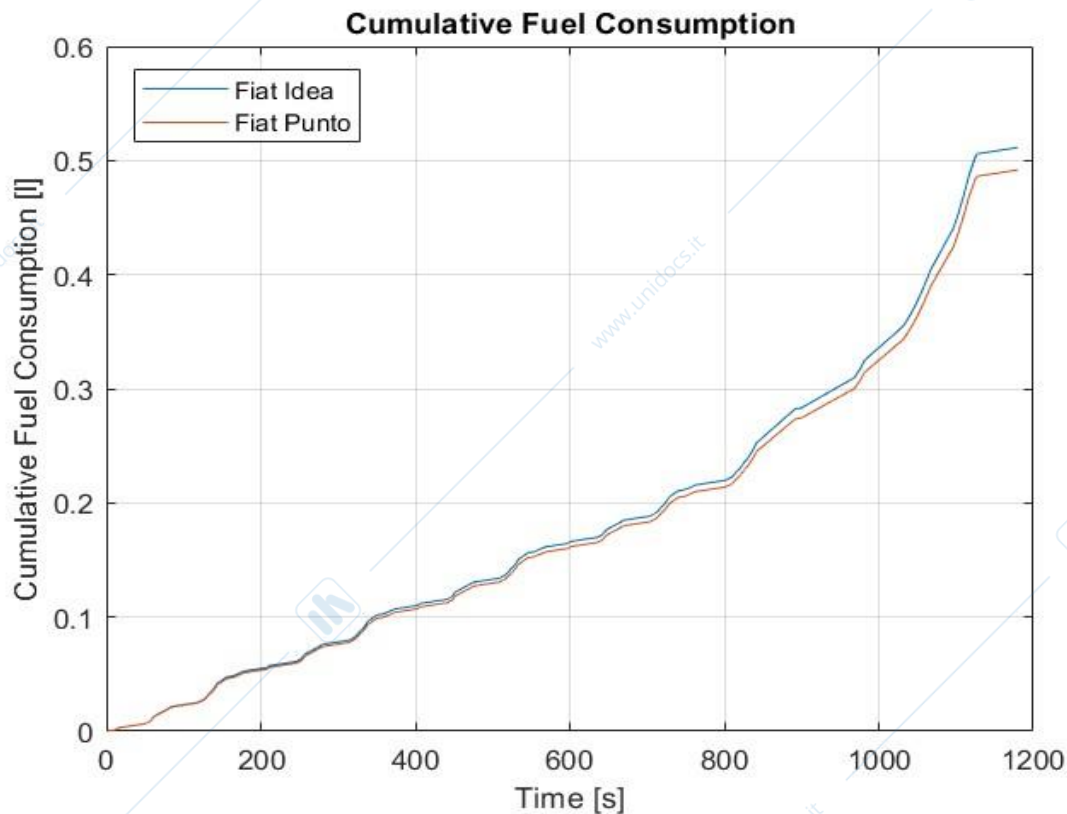


Figura 6 – Consumo cumulativo di combustibile

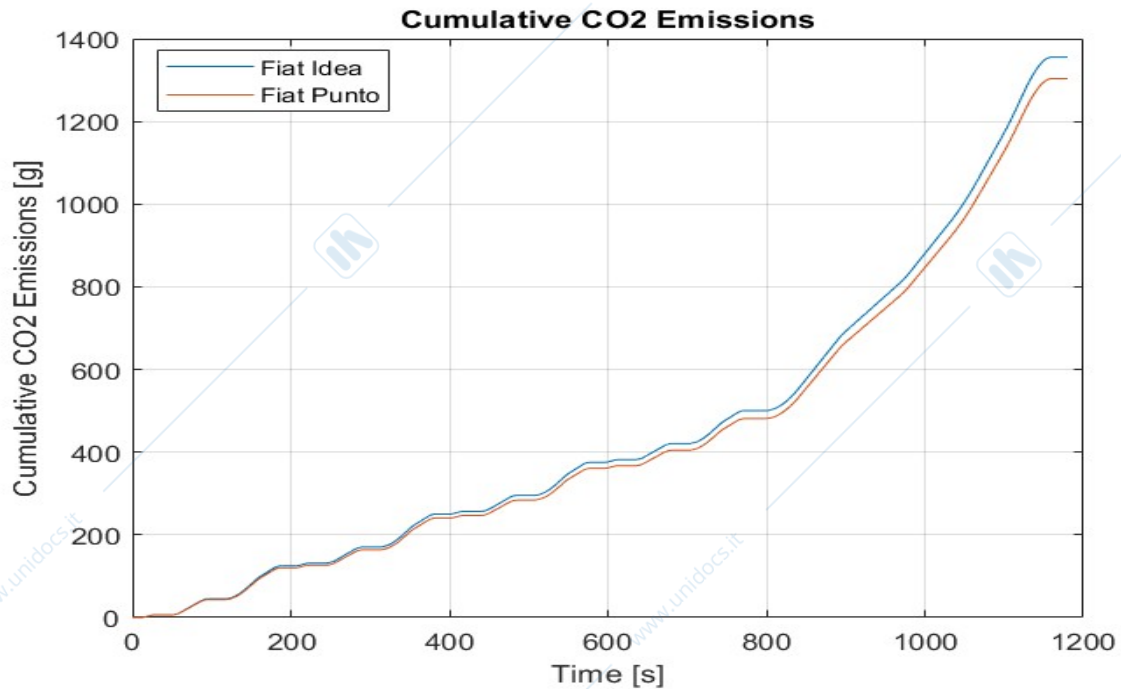
Nella *tabella 5* sono riepilogati i risultati riguardanti il consumo di combustibile dei due veicoli. È possibile notare che le differenze tra un veicolo e l'altro sono minime, in virtù del fatto che, come detto precedentemente, le vetture sono fondamentalmente molto simili. Il maggior consumo della *Fiat Idea* rispetto alla *Fiat Punto* dipende principalmente dalla maggiore massa del primo veicolo, poiché una maggiore massa comporterà un maggiore assorbimento di potenza e dunque verrà bruciato più combustibile.

Veicolo	Consumo Totale [l]	Consumo Specifico [km/l]	Fuel Economy [l/100km]
Fiat Idea	0,51	21,6	4,64
Fiat Punto	0,49	22,4	4,46

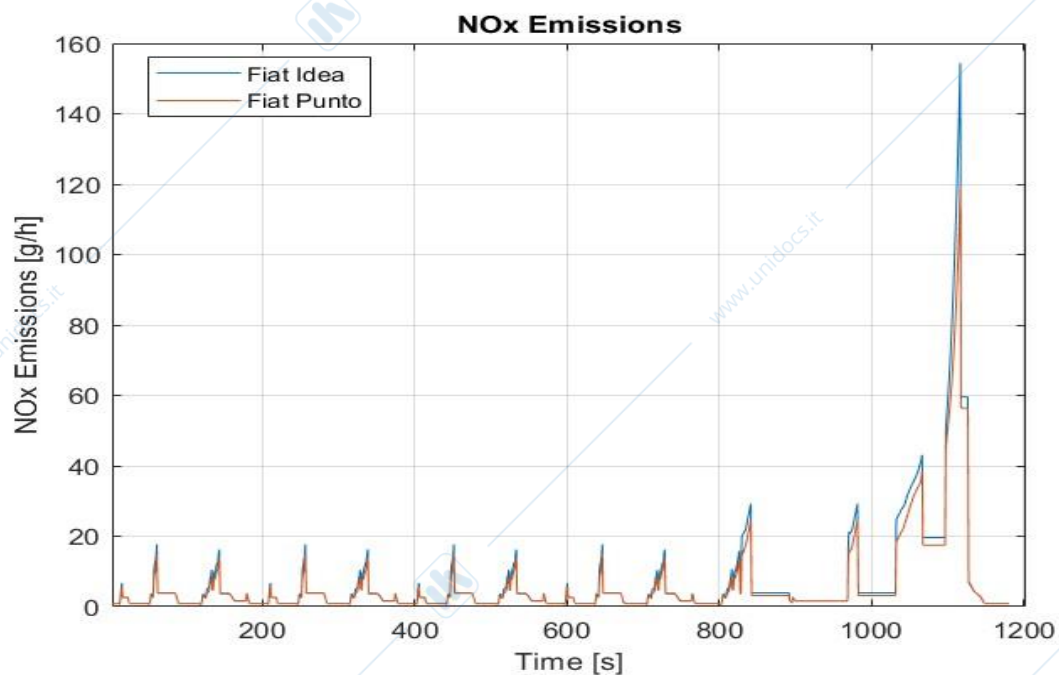
Tabella 5 – Riepilogo consumi di combustibile

Emissioni di CO_2 e NO_x (NEDC)

Partendo dalla massa di combustibile consumata durante il ciclo omologativo, si calcolano le emissioni di CO_2 tramite la metodologia precedentemente esposta. Tali emissioni sono riportate, in *figura 7*, in funzione della durata del ciclo omologativo.

Figura 7 – Emissioni cumulative di CO₂

Per quanto riguarda le emissioni di NO_x, tramite la procedura descritta in precedenza, si ricavano le emissioni istantanee per entrambi i veicoli (figura 8).

Figura 8 – Emissioni istantanee di NO_x

È importante osservare che, per il calcolo delle emissioni istantanee di NO_x, la mappa di funzionamento del motore non è definita per valori di velocità di rotazione del motore inferiori a 1000 rpm e di una pressione media effettiva inferiore ad 1 bar; quindi, per tali condizioni operative, le emissioni di NO_x si assumono pari a quelle rilevate in quest'ultime condizioni limite, ovvero 0,9 g/h.

Dalle emissioni istantanee si ricava, per entrambe le vetture, l'emissione cumulativa di NO_x (figura 9).

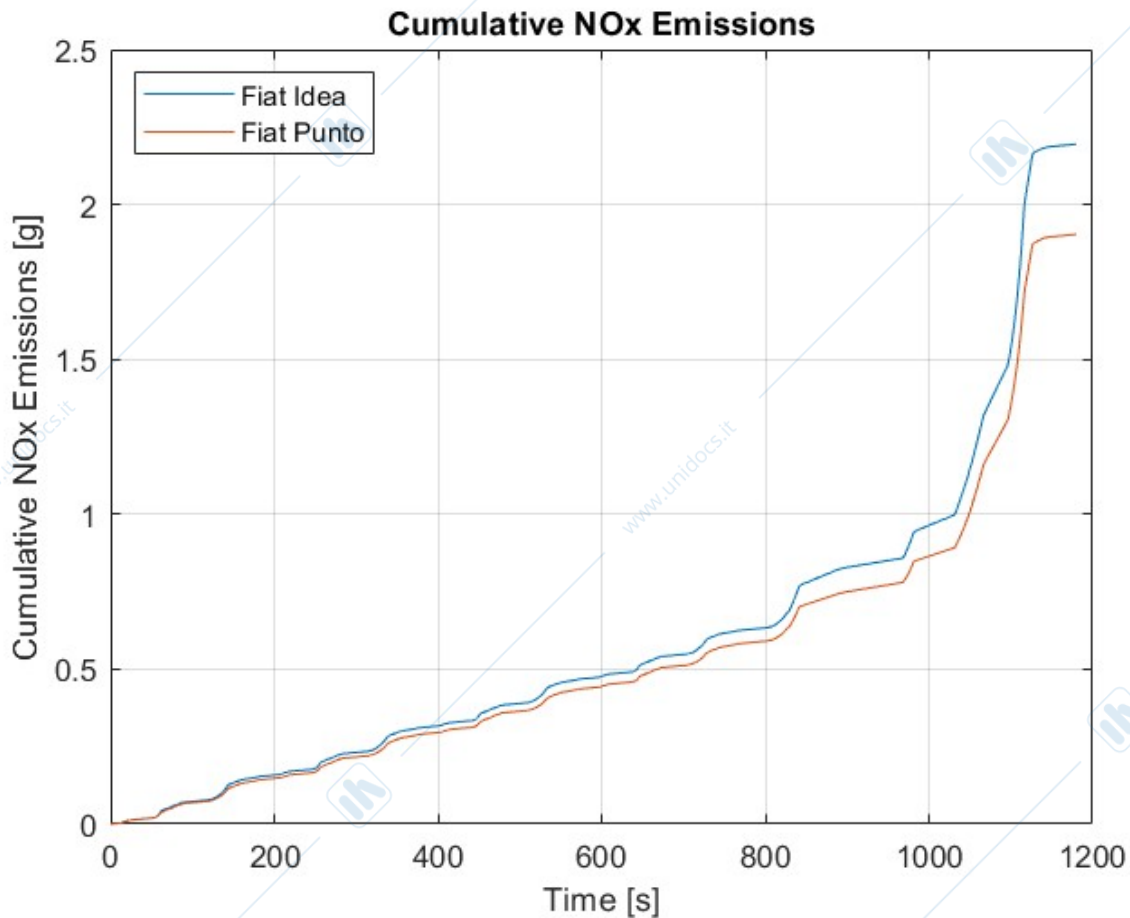


Figura 9 – Emissioni cumulative di NO_x

Nella *tabella 6* sono riepilogati i risultati riguardanti le emissioni dei due veicoli. È possibile notare che le differenze tra un veicolo e l'altro sono, anche in questo caso, minime, in virtù del fatto che, come detto in precedenza, le vetture sono fondamentalmente analoghe. Come per il consumo di combustibile, le maggiori emissioni della *Fiat Idea* rispetto alla *Fiat Punto* dipendono principalmente dalla maggiore massa del primo veicolo, poiché una maggiore massa comporterà un maggiore assorbimento di potenza e dunque verrà bruciato più combustibile con un conseguente incremento delle emissioni.

Veicolo	Emissione Totale CO_2 [g]	Emissione Specifico CO_2 [g/km]	Emissione Totale NO_x [g]	Emissione Specifico NO_x [g/km]
Fiat Idea	1355	123	2,2	0,20
Fiat Punto	1303	118	1,9	0,17

Tabella 6 – Riepilogo emissioni di CO_2 e NO_x

Ciclo Omologativo WLTC

Come si è visto, il ciclo *NEDC* tende a sottostimare i consumi e le emissioni poiché caratterizzato da velocità e accelerazioni troppo blande che difficilmente saranno quelle riprodotte nella guida reale. Per questo motivo, il suddetto ciclo omologativo è stato sostituito da un nuovo modello, denominato *WLTC* (Worldwide Harmonized Light-Duty Test Cycle) in grado di simulare al meglio il comportamento reale di guida, prevedendo manovre di accelerazione decisamente più aggressive, fasi stazionarie ridotte, massa del veicolo e coefficienti di Coast Down più elevati.

Il ciclo *WLTC* varia a seconda della classe del veicolo, la quale viene definita dal rapporto tra potenza [*kW*] e peso [*t*] del veicolo (potenza a vuoto/peso nominale); tale rapporto viene identificato per mezzo della sigla *PWR* (Power to Weight Ratio). Il ciclo *WLTC* distingue tre classi di veicoli:

- Classe 1)** Veicoli a bassa potenza con $PWR \leq 22$;
- Classe 2)** Veicoli a potenza media con $22 \leq PWR \leq 34$;
- Classe 3)** Veicoli ad alta potenza con $PWR > 34$.

Si è constatato che la maggior parte delle vetture comuni circolanti in Europa, hanno rapporti potenza-peso di $40\text{-}70 \text{ kW/t}$, quindi appartengono alla classe 3; i due veicoli presi in esame non fanno eccezione. È bene sottolineare che il ciclo omologativo *WLTC*, rispetto al ciclo *NEDC*, risulta essere più lungo sia in termini chilometrici (lunghezza pari a circa $23,3 \text{ km}$) che in termini di tempo (durata pari a 1800 secondi). In *figura 10* è possibile osservare il ciclo *WLTC* per veicoli di *Classe 3*.

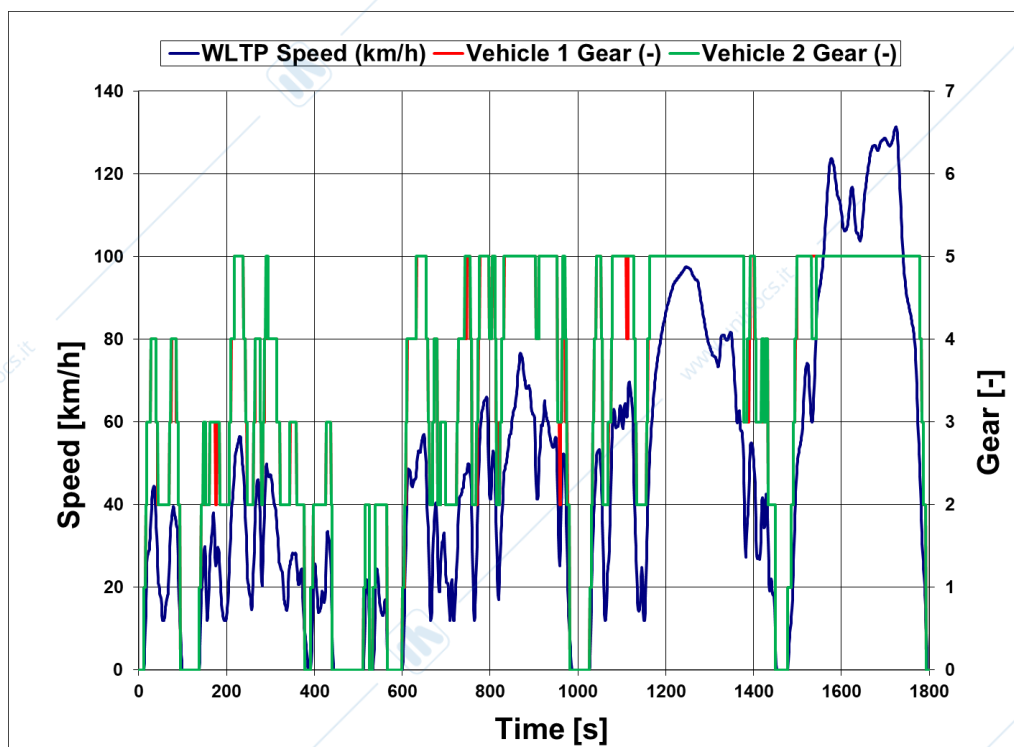


Figura 10 – Ciclo WLTC (Classe 3)

Si può notare come, a differenza del ciclo *NEDC*, ci siano due profili, uno per veicolo, rappresentanti la marcia innestata; questo perché il ciclo *WLTC* fornisce un algoritmo per il calcolo dei punti di cambiata ottimali, che tiene conto sia del peso totale del veicolo sia delle curve di potenza a pieno carico entro i regimi normalizzati, coprendo così la vasta gamma di velocità di rotazione e potenza del motore consentite dalla tecnologia attuale.

Consumo di combustibile (WLTC)

La procedura è la medesima utilizzata precedentemente:

- 1) Calcolo della velocità di rotazione del motore (*figura 11*);
- 2) Calcolo della pressioni media effettiva (*figura 12*);
- 3) Tracciamento della mappa di funzionamento del motore (*figura 13*);
- 4) Calcolo consumo istantaneo di combustibile (*figura 14*);
- 5) Calcolo consumo cumulativo di combustibile (*figura 15*).

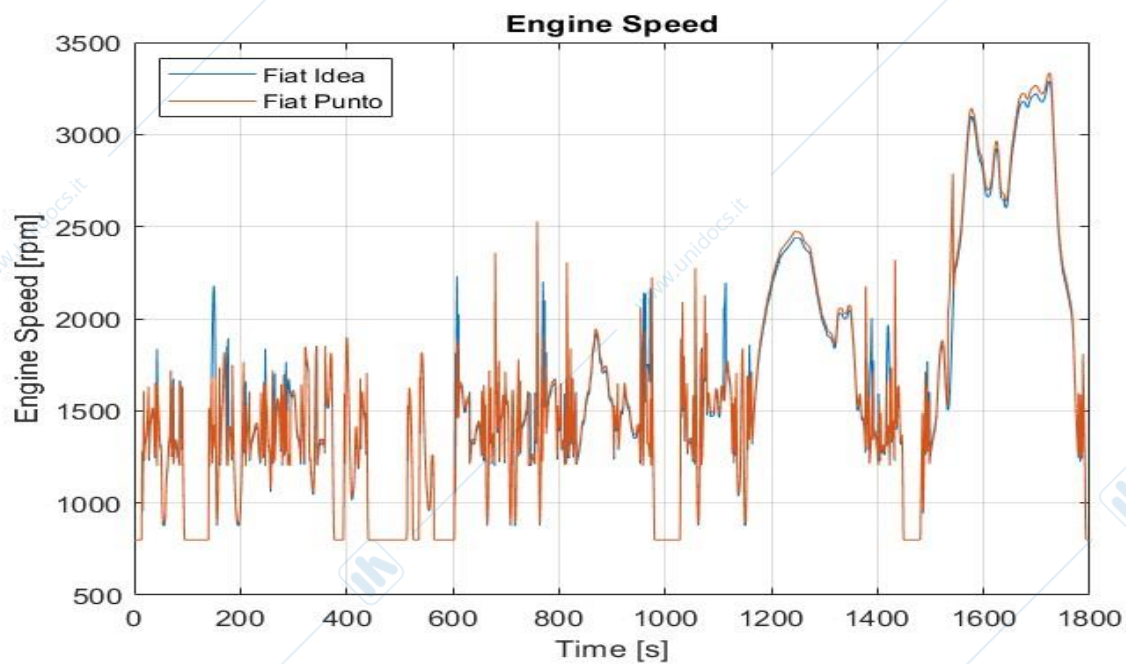


Figura 11 – Profilo di velocità di rotazione motore

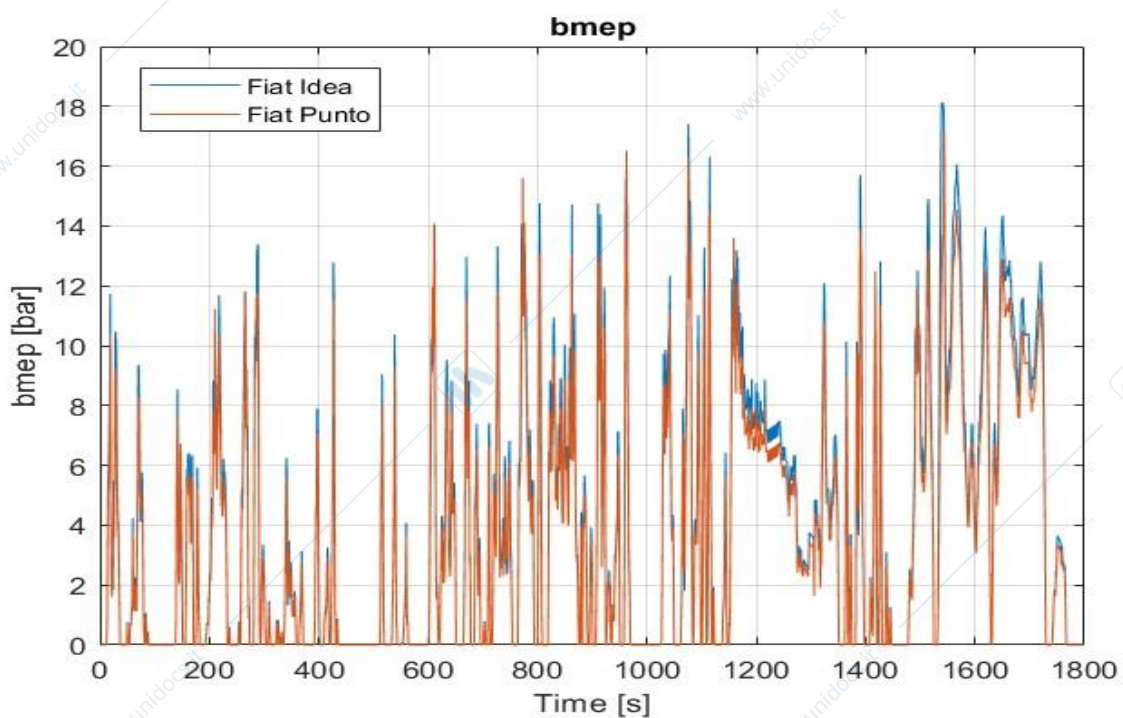


Figura 12 – Andamento della pressione media effettiva

Dalle *figure 11 e 12* possiamo notare quanto detto prima, ovvero il ciclo *WLTC*, rispetto al ciclo *NEDC*, risulta essere più dinamico riportando valori più elevati di velocità di rotazione del motore e di pressione media effettiva.

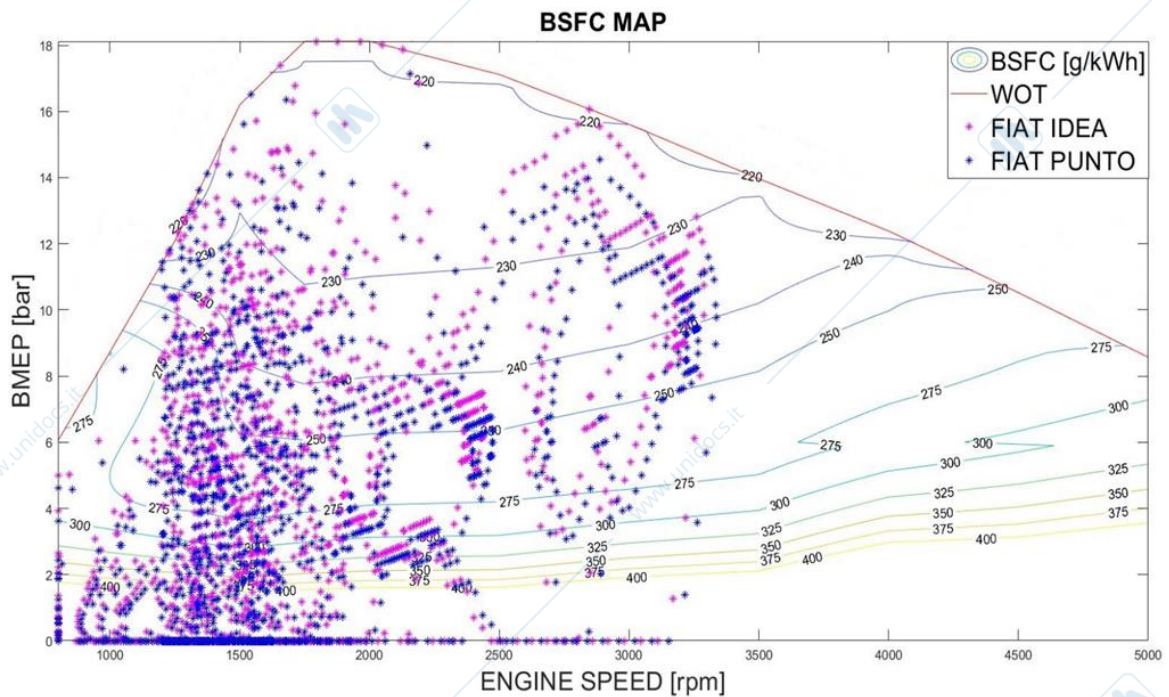


Figura 13 – Mappa dei punti di funzionamento del motore

Dalla *figura 13* possiamo osservare come i punti operativi, rispetto al ciclo *NEDC*, siano molto più sparsi sul piano quotato, in un certo senso più casuali, e soprattutto vanno da carichi bassi a carichi alti; questo ci fa capire che il ciclo *WLTC* è più vicino ad un ciclo di guida reale ed ecco spiegato il perché tale ciclo omologativo abbia sostituito il precedente.

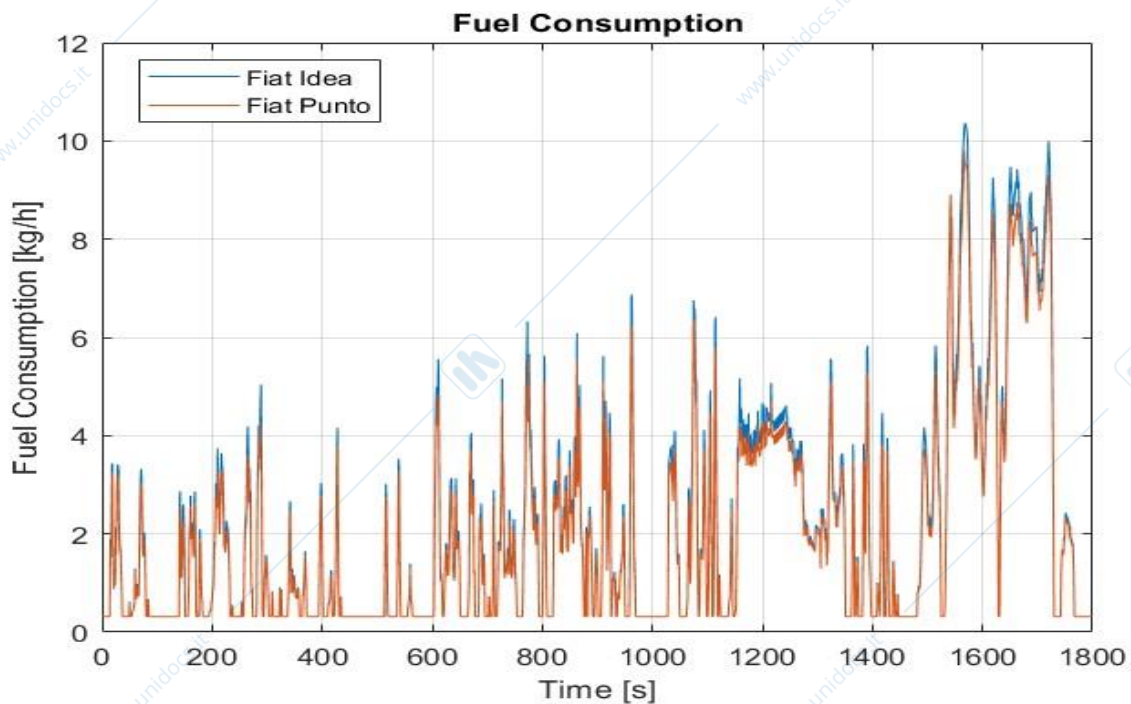


Figura 14 – Consumo istantaneo di combustibile

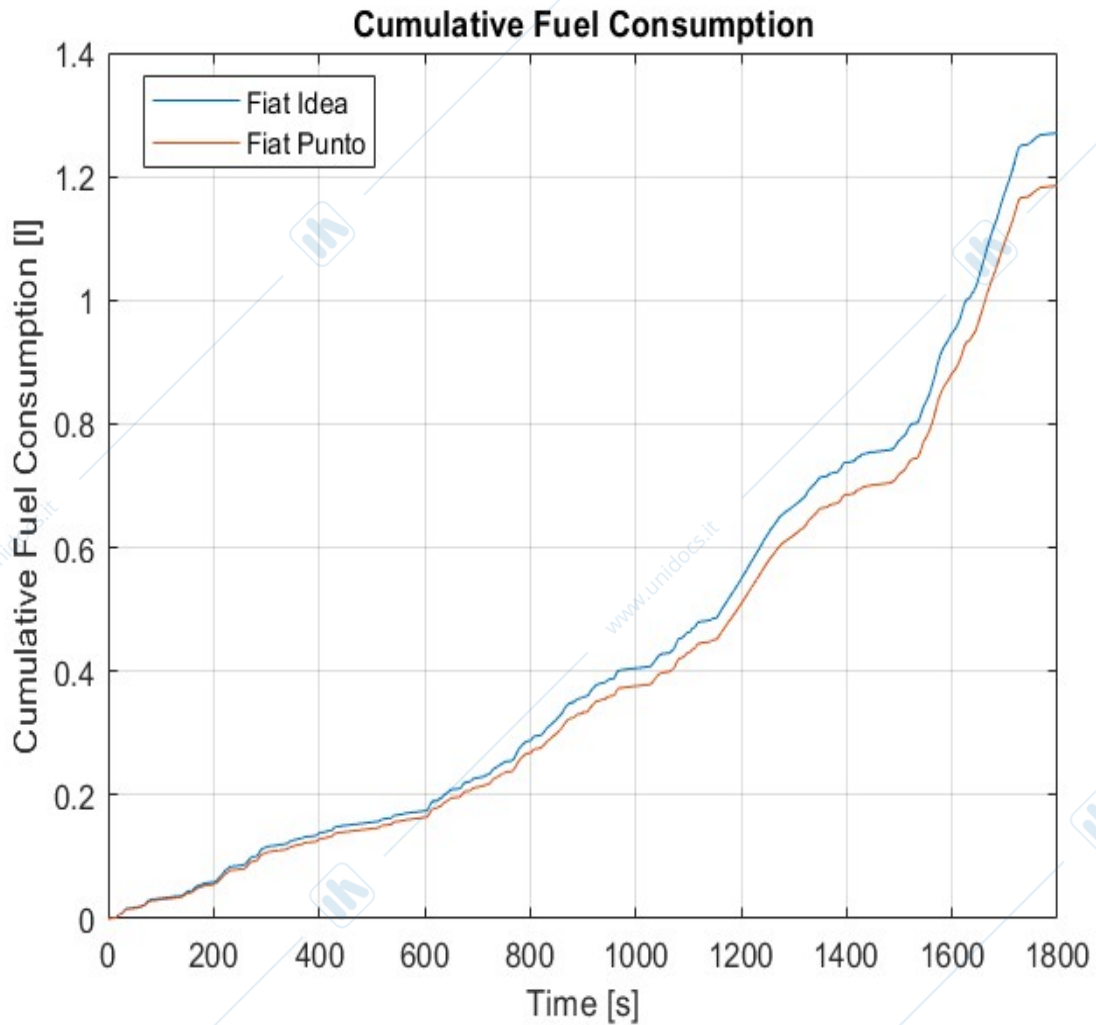


Figura 15 – Consumo cumulativo di combustibile

Nella *tabella 7* sono riepilogati i risultati riguardanti il consumo di combustibile dei due veicoli sia per il ciclo *WLTC* che per il ciclo *NEDC*, in modo da facilitarne il confronto. Valgono le stesse considerazioni fatte precedentemente. Possiamo aggiungere che il consumo totale di combustibile risulta essere leggermente più del doppio rispetto a quello ricavato sul ciclo *NEDC*, poiché quest'ultimo, oltre ad essere più moderato, è circa la metà in termini chilometrici rispetto al *WLTC* e questo, ovviamente, impatta in maniera significativa sul consumo complessivo.

	Veicolo	Consumo Totale [l]	Consumo Specifico [km/l]	Fuel Economy [l/100km]
WLTC	Fiat Idea	1,27	18,3	5,46
	Fiat Punto	1,18	19,6	5,09
NEDC	Fiat Idea	0,51	21,6	4,64
	Fiat Punto	0,49	22,4	4,46

Tabella 7 – Riepilogo consumi di combustibile (WLTC e NEDC)

Emissioni di CO₂ e NO_x (WLTC)

Si procede identicamente a quanto fatto in precedenza per il ciclo *NEDC*; i risultati riguardanti le emissioni di CO₂ sono riportati in *figura 16* mentre quelli riguardanti le emissioni di NO_x sono riportati nelle *figure 17* e *18*.

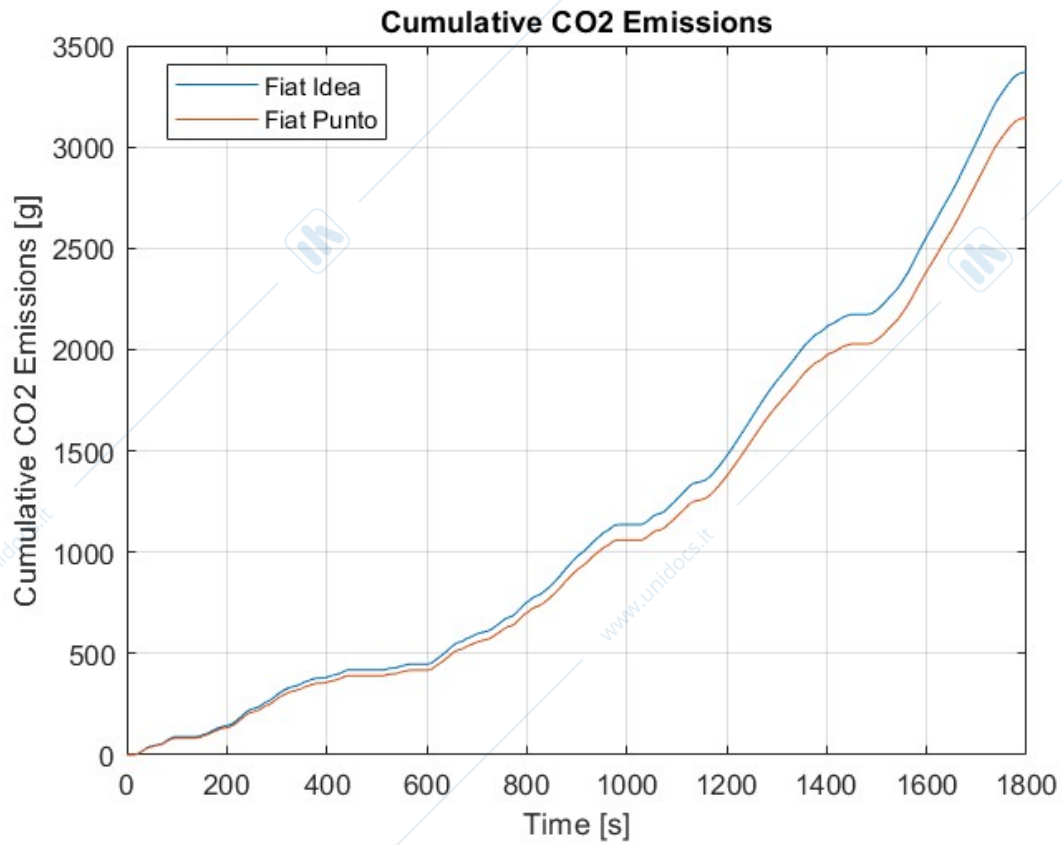


Figura 16 – Emissioni cumulative di CO₂

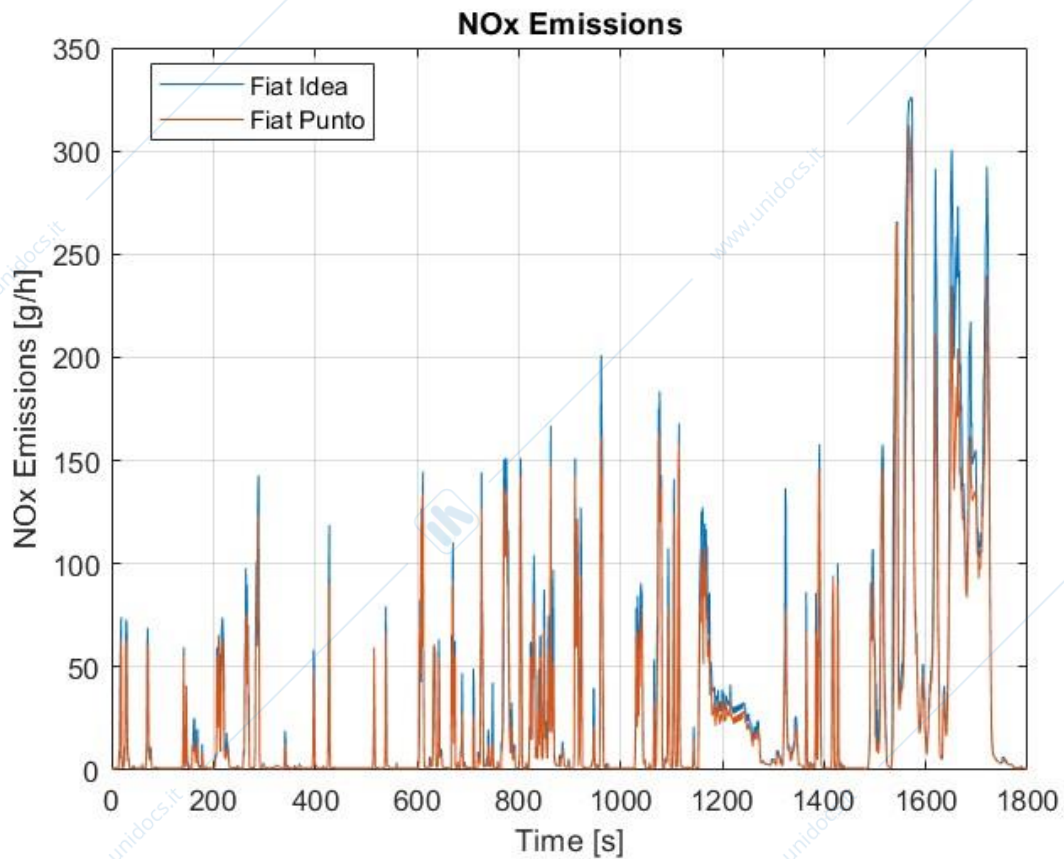
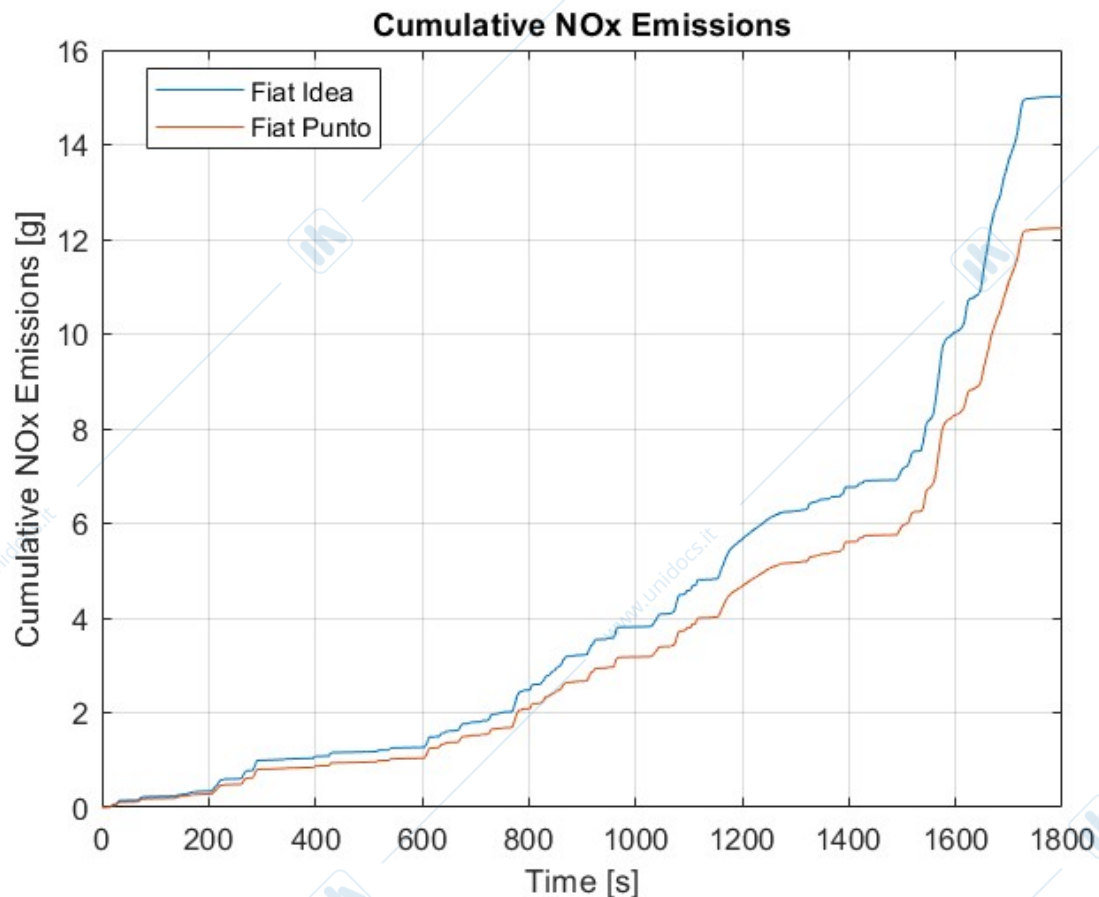


Figura 17 – Emissioni istantanee di NO_x

Figura 18 – Emissioni cumulative di NO_x

Nella *tabella 8* sono riepilogati i risultati riguardanti le emissioni dei due veicoli sia per il ciclo *WLTC* che per il ciclo *NEDC*, in modo da facilitarne il confronto. È facile osservare che le emissioni specifiche di CO₂ e NO_x sono più elevate nel ciclo *WLTC*, soprattutto per quanto riguarda gli NO_x (un ordine di grandezza maggiore); questo perché, come abbiamo detto prima, tale ciclo risulta essere più aggressivo e pertanto il motore, operando in punti a maggiore carico, brucia più combustibile e di conseguenza crescono le emissioni. Inoltre, il maggiore innalzamento delle emissioni di NO_x è dovuto, soprattutto, al fatto che nei punti a carico elevato, si generano temperature più alte in seguito alla combustione e di conseguenza incrementano le emissioni di NO_x.

	Veicolo	Emissione Totale CO ₂ [g]	Emissione Specifica CO ₂ [g/km]	Emissione Totale NO _x [g]	Emissione Specifica NO _x [g/km]
WLTC	Fiat Idea	3368	145	15	0,64
	Fiat Punto	3142	135	12	0,52
NEDC	Fiat Idea	1355	123	2,2	0,20
	Fiat Punto	1303	118	1,9	0,17

Tabella 8 – Riepilogo emissioni di CO₂ e NO_x (WLTC e NEDC)

Calcolo dell'energia meccanica

Per entrambi i cicli omologativi analizzati, si può calcolare l'**energia meccanica** richiesta da ciascun ciclo come integrale nel tempo della potenza considerando solo i termini in cui questa risulta positiva; tale parametro è molto utile per poter effettuare un confronto accurato tra i due cicli.

L'analisi della potenza nei punti in cui essa risulta negativa potrebbe, invece, essere interessante per stabilire quale sia l'energia meccanica recuperabile tramite una **frenata rigenerativa** qualora i veicoli fossero provvisti di un motore elettrico reversibile.

Nelle *figure 19* e *20* vengono riportati i valori di potenza istantanea, rispettivamente per il ciclo *NEDC* e *WLTC*, mentre nelle *figure 21* e *22* sono rappresentati gli andamenti dell'energia meccanica richiesta dai cicli omologativi, rispettivamente per il ciclo *NEDC* e *WLTC*.

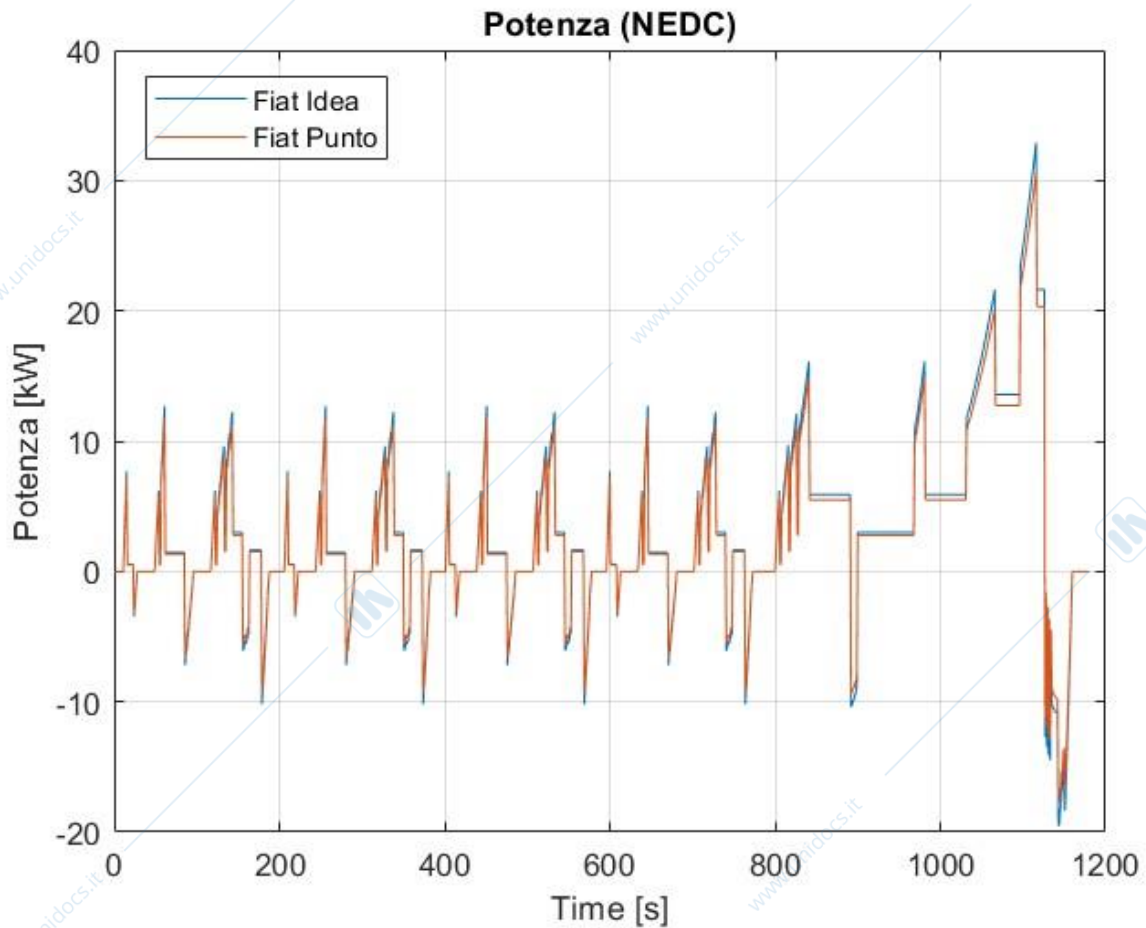


Figura 19 – Potenza istantanea (NEDC)

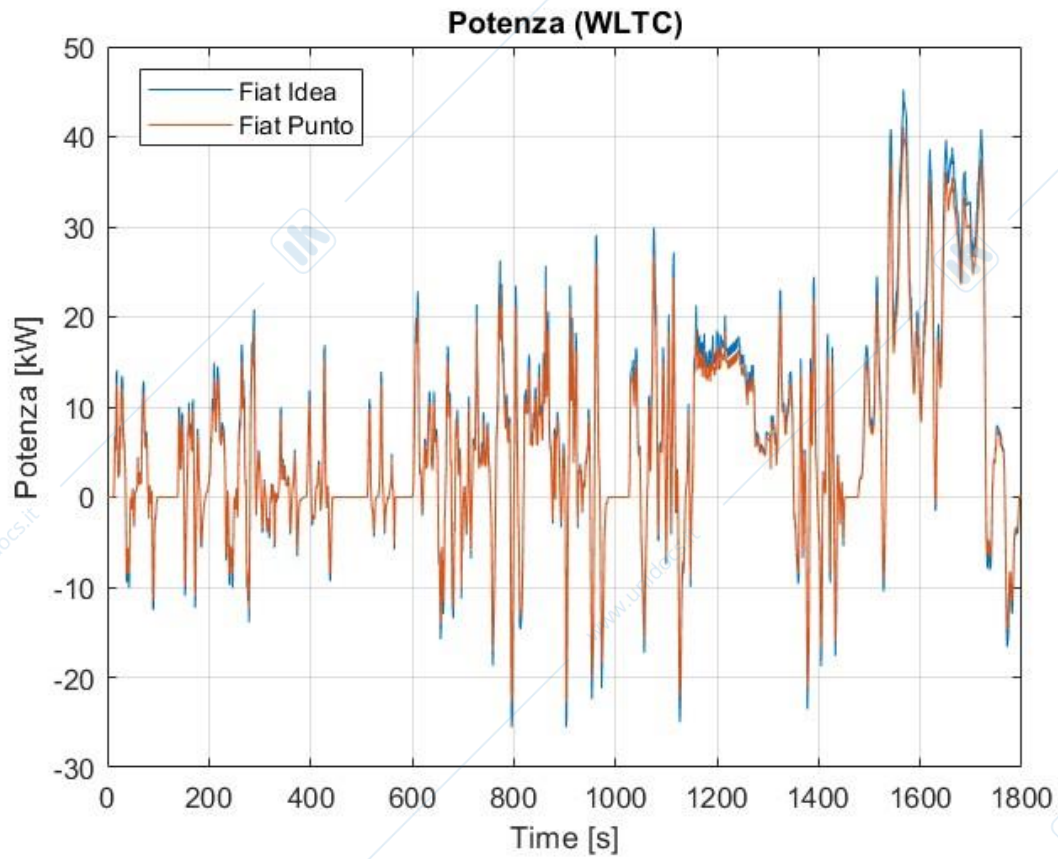


Figura 20 – Potenza istantanea (WLTC)

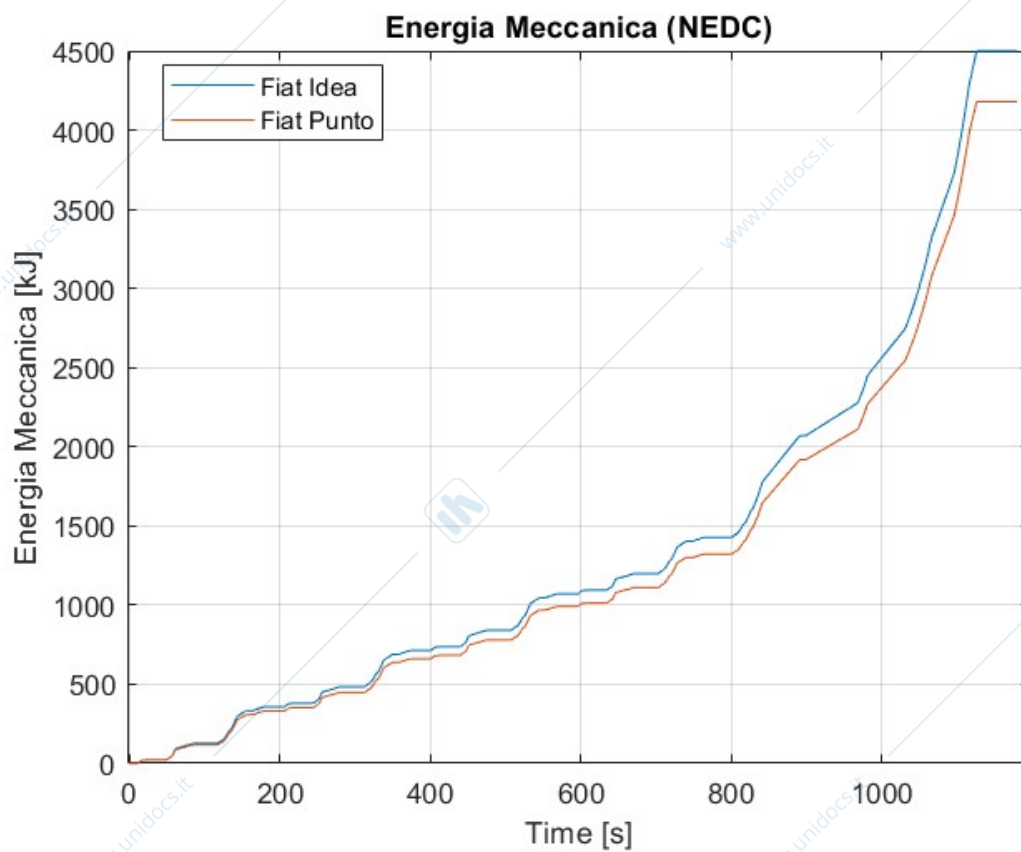


Figura 21 – Andamento dell'energia meccanica richiesta (NEDC)

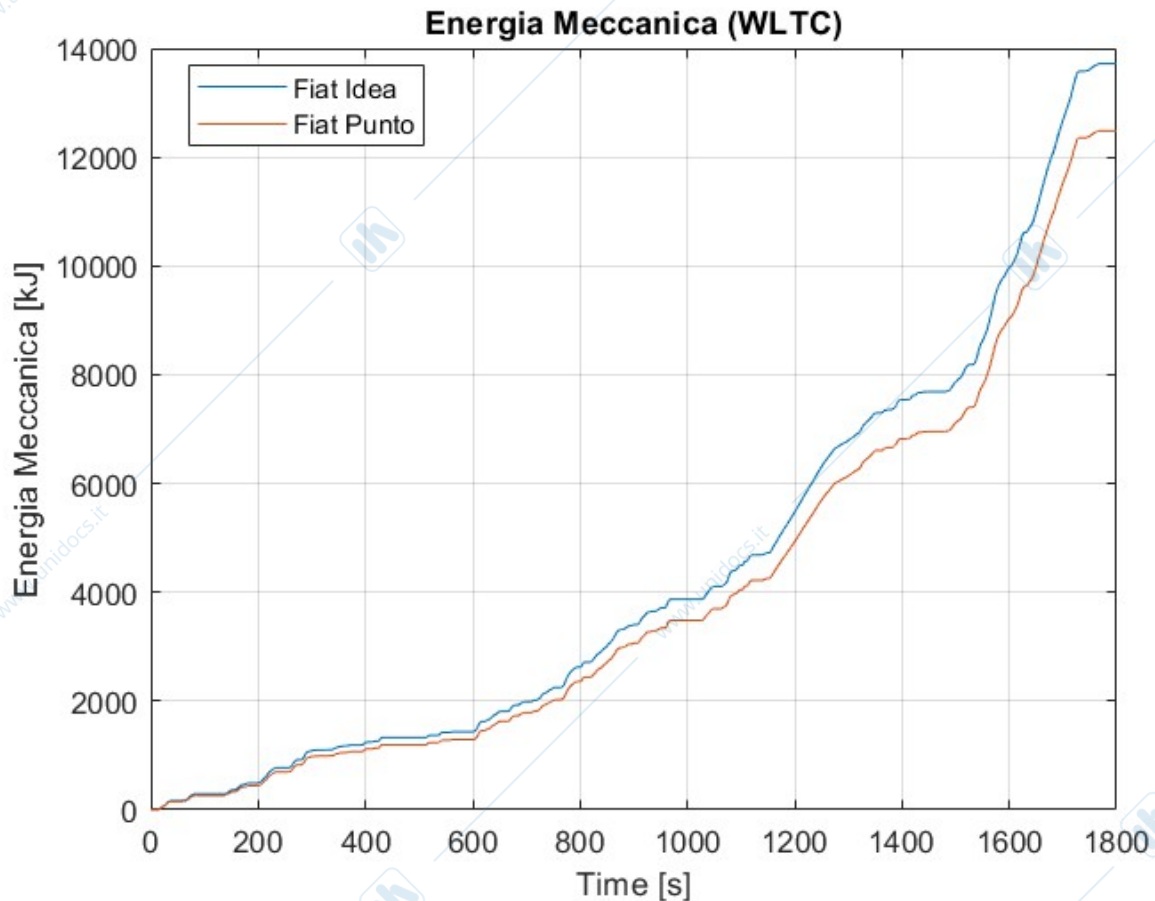


Figura 22 – Andamento dell'energia meccanica richiesta (WLTC)

Nella *tabella 9* sono riepilogati i risultati riguardanti l'energia meccanica richiesta sia per il ciclo *WLTC* che per il ciclo *NEDC*, per entrambi i veicoli, in modo da facilitarne il confronto. I risultati mostrano come il ciclo omologativo *WLTC* richieda una quantità maggiore di energia, poiché, come abbiamo detto in precedenza, quest'ultimo risulta essere nettamente più aggressivo.

	Veicolo	Energia Richiesta [kJ]	Energia Specifica Richiesta [kJ/km]	Max Energia Recuperata [kJ]	Max Energia Specifica Recuperata [kJ/km]
WLTC	Fiat Idea	13716	590	2509	108
	Fiat Punto	12484	537	2236	96
NEDC	Fiat Idea	4499	408	1040	94
	Fiat Punto	4179	379	950	86

Tabella 9 – Riepilogo energia meccanica richiesta (WLTC e NEDC)

Funzionamento con Cut-Off e Stop-Start

Si vogliono adesso valutare gli effetti che avrebbero l'adozione di tecnologie quali Cut-Off e Stop-Start sul consumo di combustibile e sulle emissioni di CO₂ e NO_x.

La tecnologia **Cut-Off** è disponibile per i veicoli ad iniezione elettronica; questa permette il taglio dell'alimentazione di combustibile quando viene rilasciato il pedale dell'acceleratore con una marcia innestata, in condizioni tali da non fare spegnere il motore, ovvero per regimi di rotazione del propulsore al di sopra dei *1000-1400 rpm*.

La tecnologia **Stop-Start** permette invece di spegnere il propulsore termico, quando il veicolo è fermo e il guidatore innesta la marcia in folle, in modo da ridurre il tempo in cui questo gira al minimo; ciò incide maggiormente su consumi ed emissioni nei casi in cui vi siano frequenti fermate obbligate come, ad esempio, nella guida urbana. Questa tecnologia non entra in funzione se la temperatura del liquido refrigerante si trova al di sotto di *40-50°C*, in modo da favorire il raggiungimento del regime termico del motore e dei sistemi di post-trattamento delle emissioni.

Ai fini del calcolo si sono imposte le seguenti condizioni:

- **Cut-Off:** Consumo di combustibile ed emissioni di NO_x nulli quando la pressione media effettiva è pari a *0 bar* e la velocità di rotazione del motore è maggiore di *1000 rpm*;
- **Stop-Start:** Consumo di combustibile ed emissioni di NO_x nulli quando la velocità del veicolo è nulla e la marcia è in folle.

Nella pagina seguente, per un miglior confronto, sono state riportate le tabelle relative ai consumi e alle emissioni nelle seguenti condizioni di funzionamento dei veicoli:

- *Tabella 10:* Cut-Off e Stop-Start disabilitati;
- *Tabella 11:* Cut-Off abilitato e Stop-Start disabilitato;
- *Tabella 12:* Cut-Off e Stop-Start abilitati.

I risultati dimostrano quanto detto sopra, ovvero che le due tecnologie riescono efficacemente a ridurre i consumi di combustibile e le emissioni di CO₂ e NO_x.

CUT-OFF ● STOP-START ●		NEDC		WLTC	
		Fiat Idea	Fiat Punto	Fiat Idea	Fiat Punto
Consumi	Consumo Totale [l]	0,51	0,49	1,27	1,18
	Consumo Specifico [km/l]	21,6	22,4	18,3	19,6
	Fuel Economy [l/100km]	4,64	4,46	5,46	5,09
Emissioni	Emissione Totale CO ₂ [g]	1355	1303	3368	3142
	Emissione Specifica CO ₂ [g/km]	123	118	145	135
	Emissione Totale NO _x [g]	2,19	1,9	15	12,2
	Emissione Specifica NO _x [g/km]	0,2	0,173	0,645	0,526

Tabella 10 – Consumi ed Emissioni con Cut-Off e Stop-Start disabilitati

CUT-OFF ● STOP-START ●		NEDC		WLTC	
		Fiat Idea	Fiat Punto	Fiat Idea	Fiat Punto
Consumi	Consumo Totale [l]	0,50	0,48	1,23	1,15
	Consumo Specifico [km/l]	22,1	23	18,9	20,3
	Fuel Economy [l/100km]	4,53	4,35	5,3	4,93
Emissioni	Emissione Totale CO ₂ [g]	1323	1270	3268	3043
	Emissione Specifica CO ₂ [g/km]	120	115	140	131
	Emissione Totale NO _x [g]	2,12	1,82	14,9	12,1
	Emissione Specifica NO _x [g/km]	0,192	0,165	0,639	0,519

Tabella 11 – Consumi ed Emissioni con Cut-Off abilitato e Stop-Start disabilitato

CUT-OFF ● STOP-START ●		NEDC		WLTC	
		Fiat Idea	Fiat Punto	Fiat Idea	Fiat Punto
Consumi	Consumo Totale [l]	0,47	0,45	1,21	1,12
	Consumo Specifico [km/l]	23,5	24,6	19,2	20,7
	Fuel Economy [l/100km]	4,25	4,07	5,2	4,83
Emissioni	Emissione Totale CO ₂ [g]	1242	1189	3204	2979
	Emissione Specifica CO ₂ [g/km]	113	108	138	128
	Emissione Totale NO _x [g]	2,04	1,75	14,8	12
	Emissione Specifica NO _x [g/km]	0,185	0,159	0,636	0,517

Tabella 12 – Consumi ed Emissioni con Cut-Off e Stop-Start abilitati

Conclusioni

Dall'analisi dei cicli omologativi *NEDC* e *WLTC* sono emerse due importanti differenze:

- 1) Il ciclo *NEDC* non rappresenta al meglio il comportamento di un guidatore reale poiché i profili di accelerazione utilizzati risultano essere molto blandi, pertanto i valori calcolati in merito al consumo di combustibile ed alle emissioni di inquinanti sono relativamente approssimativi; tuttavia, tale ciclo omologativo, ha il pregio di essere ripetibile, rendendo la procedura di omologazione di facile attuazione.
- 2) Il ciclo *WLTC* applica manovre di accelerazione molto più aggressive e ridotte situazioni stazionarie; ciò simula in maniera più concreta il comportamento di un guidatore reale, di conseguenza i valori legati al consumo di combustibile e alle emissioni risultano notevolmente superiori e più vicine ad un ciclo reale di guida di quelle valutate con il ciclo *NEDC*.

Inoltre, abbiamo dimostrato che, mediante l'utilizzo delle tecnologie Cut-Off e Stop-Start, è possibile ridurre consumi ed emissioni.

Nelle *tabelle 13* e *14* sono riportati i risparmi, a livello di consumi ed emissioni, ottenuti rispetto alle condizioni di funzionamento dei veicoli in cui le due tecnologie sono disabilitate. Si può notare come l'aggiunta dell'intervento dello Stop-Start, abbia un impatto molto più significativo sul ciclo omologativo *NEDC*; questo proprio in virtù del fatto che tale ciclo simuli una guida prevalentemente urbana, dove appunto il sistema Stop-Start trova maggiore utilizzo e di conseguenza si avranno maggiori benefici dall'adozione di tale tecnologia.

CUT-OFF ● STOP-START ●		NEDC		WLTC	
		Fiat Idea	Fiat Punto	Fiat Idea	Fiat Punto
Consumi	Consumo Totale [l]	1,96%	2,04%	3,15%	2,54%
	Consumo Specifico [km/l]	2,26%	2,61%	3,17%	3,45%
	Fuel Economy [l/100km]	2,37%	2,47%	2,93%	3,14%
Emissioni	Emissione Totale CO ₂ [g]	2,36%	2,53%	2,97%	3,15%
	Emissione Specifica CO ₂ [g/km]	2,44%	2,54%	3,45%	2,96%
	Emissione Totale NO _x [g]	3,20%	4,21%	0,67%	0,82%
	Emissione Specifica NO _x [g/km]	4,00%	4,62%	0,93%	1,33%

Tabella 13 – Risparmi percentuali con Cut-Off abilitato e Stop-Start disabilitato

CUT-OFF ● STOP-START ●		NEDC		WLTC	
		Fiat Idea	Fiat Punto	Fiat Idea	Fiat Punto
Consumi	Consumo Totale [l]	7,84%	8,16%	4,72%	5,08%
	Consumo Specifico [km/l]	8,09%	8,94%	4,69%	5,31%
	Fuel Economy [l/100km]	8,41%	8,74%	4,76%	5,11%
Emissioni	Emissione Totale CO ₂ [g]	8,34%	8,75%	4,87%	5,19%
	Emissione Specifica CO ₂ [g/km]	8,13%	8,47%	4,83%	5,19%
	Emissione Totale NO _x [g]	6,85%	7,89%	1,33%	1,64%
	Emissione Specifica NO _x [g/km]	7,50%	8,09%	1,40%	1,71%

Tabella 14 – Risparmi percentuali con con Cut-Off e Stop-Start abilitati