

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

**Analisi di dispositivi PEMS e misurazioni delle  
emissioni inquinanti da motori diesel per  
applicazioni non stradali**



**Relatore:**

prof. Federico MILLO

**Tutor aziendale:**

ing. Andrea MARINONI

**Candidato:**

Luca MANNU

Dicembre 2018



## Sommario

In questa tesi verranno analizzate le problematiche relative all'introduzione dei dispositivi Portable Emission Measurement System (PEMS) per motori di piccola taglia in applicazioni non stradali. Da test eseguiti su un motore monocilindrico si è visto che il rilevamento della portata dei gas di scarico effettuata con il PEMS è molto differente da quella rilevata con la strumentazione della cella motore. Inoltre, si sono analizzate le differenze nella misura della concentrazione di emissioni inquinanti nei gas di scarico.

Dopo la descrizione della metodologia di calcolo adottata si mostreranno i risultati sulle emissioni durante un ciclo di lavoro reale. A tal proposito il PEMS è stato installato su una macchina non stradale con motore conforme alla normativa Stage IV e con sistema Selective Catalytic Reduction (SCR) per l'abbattimento degli  $\text{NO}_x$  e Diesel Oxidation Catalyst (DOC).

I test sono stati eseguiti con due diverse potenze: 75 kW e 100 kW e i risultati mostrano che il livello di emissioni di  $\text{NO}_x$  della taratura da 100 kW è inferiore, a parità di ciclo, alla corrispettiva da 75 kW. Dal calcolo del fattore di conformità (CF) per ciascun inquinante si è visto che, al contrario degli ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$ ), le emissioni di idrocarburi incombusti (HC) e monossido di carbonio (CO) rientrano pienamente nei limiti, relativi al ciclo omologativo, anche nel ciclo reale. Si è quindi proceduto ad un confronto tra il test reale e il ciclo omologativo NRTC per evidenziare le differenze in termini di punti di funzionamento del motore e livello di emissioni.

## Indice figure

Figura 2.1 Schema del rilevatore a ionizzazione di fiamma .....	3
Figura 2.2 Schema dell'analizzatore NDUV per il rilevamento dell'NO.....	4
Figura 2.3 Schema dell'analizzatore NDUV per il rilevamento dell'NO <sub>2</sub> .....	4
Figura 2.4 Schema dell'analizzatore NDIR.....	5
Figura 2.5 Misuratori di portata dei gas di scarico.....	6
Figura 2.6 Sezione del misuratore di portata che mostra il tubo di Pitot .....	6
Figura 3.1 Errore di Zero.....	7
Figura 3.2 Errore di Span .....	7
Figura 3.3 Errore combinato di zero e span .....	8
Figura 3.4 Errore di linearità.....	8
Figura 4.1 Emissioni di CO <sub>2</sub> di un motore monocilindrico in un ciclo 6 modi.....	10
Figura 4.2 Schema di prova .....	10
Figura 4.3 Scostamenti [%] della portata dei gas di scarico del PEMS rispetto al banco analisi.....	13
Figura 4.4 Portata dei gas di scarico rilevata con il PEMS nel ciclo 6 modi - test 3.....	13
Figura 4.5 Scostamento delle emissioni di CO <sub>2</sub> rilevate dal PEMS rispetto al banco analisi per motore monocilindrico.....	14
Figura 4.6 Scostamento delle emissioni di CO rilevate dal PEMS rispetto al banco analisi per motore monocilindrico.....	14
Figura 4.7 Scostamento delle emissioni di NO <sub>x</sub> rilevate dal PEMS rispetto al banco analisi per motore monocilindrico.....	14
Figura 4.8 Scostamento delle emissioni di THC rilevate dal PEMS rispetto al banco analisi per motore monocilindrico.....	15
Figura 4.9 Scostamento delle emissioni di THC rilevate dal PEMS rispetto al banco analisi per motore monocilindrico.....	15
Figura 4.10 Concentrazione emissioni allo scarico rilevate dal banco analisi - Test 1 .....	16
Figura 4.11 Concentrazione emissioni allo scarico rilevate dal PEMS - Test 1.....	16
Figura 4.12 Andamento della concentrazione di CO <sub>2</sub> per il test 6 modi rilevate da PEMS e banco analisi - Test 1 .....	17
Figura 4.13 Andamento della concentrazione di NO <sub>x</sub> per il test 6 modi rilevate da PEMS e banco analisi - Test 1 .....	17
Figura 4.14 Andamento della concentrazione di THC per il test 6 modi rilevate da PEMS e banco analisi - Test 1 .....	18
Figura 4.15 Andamento della concentrazione di CO per il test 6 modi rilevate da PEMS e banco analisi - Test 1 .....	18
Figura 4.16 Correlazione concentrazione di NO <sub>x</sub> rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 1 .....	19
Figura 4.17 Correlazione concentrazione di CO rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 1.....	19

Figura 4.18 Correlazione concentrazione di CO rilevata dal PEMS e dal banco analisi con esclusione dei dati relativi al modo n° 1- Test 1 .....	20
Figura 4.19 Correlazione concentrazione di CO <sub>2</sub> rilevata dal PEMS e dal banco analisi con esclusione dei dati relativi al modo n° 1- Test 1 .....	20
Figura 4.20 Correlazione concentrazione di NO <sub>x</sub> rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 3 .....	21
Figura 4.21 Correlazione concentrazione di CO <sub>2</sub> rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 3.....	21
Figura 4.22 Correlazione concentrazione di CO rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 3.....	21
Figura 4.23 Correlazione concentrazione di THC rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 3.....	22
Figura 5.1 Veicolo usato per i test RDE dotato di strumentazione PEMS (sopra la cabina) .....	23
Figura 5.2 Schema dei collegamenti tra i componenti.....	24
Figura 5.3 Sequenza di prova per ciclo NRTC.....	25
Figura 5.4 Andamento della potenza nel tempo del ciclo ipotizzato.....	27
Figura 6.1 Esempio di allineamento dei dati - EFM e ECU .....	30
Figura 6.2 Illustrazione del calcolo della finestra mobile .....	31
Figura 6.3 Durata finestra mobile - metodo basato sul lavoro .....	32
Figura 6.4 Durata finestra mobile - metodo basato sulla massa di CO <sub>2</sub> .....	33
Figura 7.1 Velocità del veicolo durante il test - 75kW.....	36
Figura 7.2 Potenza del motore in funzione del tempo nel test RDE ed eventi validi - Taratura 75 kW (PEMS n°1).....	36
Figura 7.3 Potenza media nelle finestre calcolate con il metodo basato sul lavoro e finestre valide – Taratura 75 kW (PEMS n°1).....	37
Figura 7.4 Durata delle finestre calcolate con il metodo basato sulla massa di CO <sub>2</sub> e finestre valide - PEMS n°1 (Taratura 75 kW).....	38
Figura 7.5 Punti di lavoro motore - Test RDE (PEMS n° 1 - taratura 75 kW).....	39
Figura 7.6 Livelli di emissione NO <sub>x</sub> [g/h] - test RDE (PEMS n°1 - taratura 75 kW) .....	40
Figura 7.7 Livelli di emissione NO <sub>x</sub> [g/h] - test NRTC a caldo (PEMS n°1 - taratura 75 kW) .....	41
Figura 7.8 Emissioni specifiche NO <sub>x</sub> [g/kWh] - Test RDE (PEMS n°1 - taratura 75 kW) .....	41
Figura 7.9 Emissioni specifiche NO <sub>x</sub> [g/kWh] - Test NRTC a caldo (PEMS n° 1 - taratura 75 kW) .....	42
Figura 7.10 Percentuale di tempo e massa di inquinanti per fasce di potenza erogata dal motore – Test RDE: esclusione della partenza a freddo (PEMS n° 1 - 75 kW).....	43
Figura 7.11 Percentuale di tempo e massa di NO <sub>x</sub> per fasce di potenza erogata dal motore – Test NRTC a caldo (75 kW).....	43
Figura 7.12 Percentuale di lavoro e valori delle emissioni specifiche medie per fasce di potenza erogata dal motore – Test RDE: esclusione della partenza a freddo (PEMS n° 1 - 75 kW) .....	44
Figura 7.13 Percentuale di lavoro e valori delle emissioni specifiche medie per fasce di potenza erogata dal motore – Test NRTC a caldo (75 kW).....	45
Figura 7.14 Velocità del veicolo durante il test - 100kW .....	45

Figura 7.15 Potenza del motore in funzione del tempo nel test RDE ed eventi validi - Taratura 100 kW (PEMS n°1).....	46
Figura 7.16 Potenza media nelle finestre calcolate con il metodo basato sul lavoro e finestre valide – Taratura 100 kW (PEMS n°1).....	46
Figura 7.17 Durata delle finestre calcolate con il metodo basato sulla massa di CO2 e finestre valide - Taratura 100 kW.....	47
Figura 7.18 Punti di lavoro motore - Test RDE (PEMS n° 1 - taratura 100 kW).....	49
Figura 7.19 Livelli di emissione NOx [g/h] - test RDE (PEMS n°1 - taratura 100 kW).....	50
Figura 7.20 Livelli di emissione NOx [g/h] - test NRTC a caldo (PEMS n°1 - taratura 100 kW) .....	50
Figura 7.21 Emissioni specifiche NOx [g/kWh] - Test RDE (PEMS n°1 - taratura 100 kW).....	51
Figura 7.22 Emissioni specifiche NOx [g/kWh] - Test NRTC a caldo (PEMS n°1 - taratura 100 kW) .....	52
Figura 7.23 Percentuale di tempo e massa di inquinanti per fasce di potenza erogata dal motore – Test RDE: esclusione della partenza a freddo (PEMS n°1 - 100 kW).....	52
Figura 7.24 Percentuale di lavoro e valori delle emissioni specifiche medie per fasce di potenza erogata dal motore – Test RDE: esclusione della partenza a freddo (PEMS n°1 - 100 kW) .....	53
Figura 7.25 Percentuale di lavoro e valori delle emissioni specifiche medie per fasce di potenza erogata dal motore – Test NRTC a caldo (100 kW).....	53
Figura 7.26 Regressione lineare per i dati di portata di combustibile – PEMS n°1 (75 kW) .....	55
Figura 7.27 Regressione lineare per i dati di portata di combustibile – PEMS n°1 (100 kW) .....	56
Figura 7.28 Concentrazione NO allo scarico - test RDE (75 kW) .....	57
Figura 7.29 Concentrazione NO2 allo scarico - test RDE (75 kW) .....	57
Figura 7.30 Barre di errore emissioni NO - Intervallo 1 (75 kW).....	58
Figura 7.31 Barre di errore emissioni NO2 - Intervallo 1 (75 kW).....	58
Figura 7.32 Barre di errore emissioni NO - Intervallo 2 (75 kW).....	58
Figura 7.33 Barre di errore emissioni NO2 - Intervallo 2 (75 kW).....	58
Figura 7.34 Barre di errore emissioni NO - Intervallo 3 (75 kW).....	58
Figura 7.35 Barre di errore emissioni NO2 - Intervallo 3 (75 kW).....	58
Figura 7.36 Concentrazione NO2 allo scarico - test RDE (100 kW) .....	59
Figura 7.37 Concentrazione NO allo scarico - test RDE (100 kW) .....	59
<i>Figura 7.38 Barre di errore emissioni NO - Intervallo 1 (100 kW) .....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 7.39 Barre di errore emissioni NO2 - Intervallo 1 (100 kW) .....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 7.40 Barre di errore emissioni NO - Intervallo 2 (100 kW) .....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 7.41 Barre di errore emissioni NO2 - Intervallo 2 (100 kW) .....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 7.42 Barre di errore emissioni NO - Intervallo 3 (100 kW) .....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 7.43 Barre di errore emissioni NO2 - Intervallo 3 (100 kW) .....</i>	<i>60</i>
Figura 7.44 Massa cumulata NOx nel test RDE - 75 kW .....	61
Figura 7.45 Massa cumulata THC nel test RDE - 75 kW .....	61
Figura 7.46 Massa cumulata CO nel test RDE - 75 kW .....	62

Figura 7.47 Massa cumulata NOx nel test RDE - 100 kW .....	62
Figura 7.48 Massa cumulata THC nel test RDE - 100 kW .....	63
Figura 7.49 Contributo delle emissioni durante la partenza a freddo - 100kW.....	63
Figura 8.1 Potenza del motore in funzione del tempo nel test su strada ed eventi validi – Taratura 75 kW .....	64
Figura 8.2 Potenza media nelle finestre calcolate con il metodo basato sul lavoro e finestre valide – Taratura 75 kW.....	65
Figura 8.3 Durata delle finestre calcolate con il metodo basato sulla massa di CO2 e finestre valide - Taratura 75 kW.....	66
Figura 8.4 Punti di lavoro motore - Test RDE (taratura 75 kW) .....	67
Figura 8.5 Punti di lavoro motore - ciclo NRTC (taratura 75 kW).....	68
Figura 8.6 Livelli di emissione NOx [g/h] - test RDE (PEMS n°2 - taratura 75 kW).....	69
Figura 8.7 Livelli di emissione NOx [g/h] - test NRTC a caldo (taratura 75 kW).....	69
Figura 8.8 Emissioni specifiche NOx [g/kWh] - Test RDE (PEMS n°2 - taratura 75 kW).....	70
Figura 8.9 Emissioni specifiche NOx [g/kWh] - Test NRTC a caldo (taratura 75 kW).....	70
Figura 8.10 Percentuale di tempo e massa di inquinanti per fasce di potenza erogata dal motore – Test RDE ( PEMS n°2 - 75 kW) .....	71
Figura 8.11 Percentuale di lavoro e valori delle emissioni specifiche medie per fasce di potenza erogata dal motore – Test RDE (PEMS n° 2 - 75 kW).....	71
Figura 8.12 Percentuale di lavoro e valori delle emissioni specifiche medie per fasce di potenza erogata dal motore – Test NRTC (75 kW).....	72
Figura 8.13 Potenza del motore in funzione del tempo nel test su strada ed eventi validi – Taratura 100 kW .....	72
Figura 8.14 Potenza media nelle finestre e finestre valide - Taratura 100 kW (Metodo basato sul lavoro) .....	73
Figura 8.15 Durata delle finestre calcolate con il metodo basato sulla massa di CO2 e finestre valide - Taratura 100 kW.....	74
Figura 8.16 Punti di lavoro motore - Test RDE (PEMS n°2 - taratura 100 kW).....	75
Figura 8.17 Punti di lavoro motore - ciclo NRTC (taratura 100 kW).....	76
Figura 8.18 Livello di emissioni di NOx [g/h] - Test RDE (PEMS n°2 - Taratura 100 kW).....	76
Figura 8.19 Livello di emissioni di NOx [g/h] - Test NRTC (Taratura 100 kW) .....	77
Figura 8.20 Emissioni specifiche NOx [g/kWh] - Test RDE (PEMS n°2 - taratura 100 kW).....	77
Figura 8.21 Emissioni specifiche NOx [g/kWh] - Test NRTC a caldo (taratura 100 kW).....	78
Figura 8.22 Percentuale di tempo e massa di NOx per fasce di potenza erogata dal motore – Test RDE (100 kW).....	78
Figura 8.23 Percentuale di tempo e massa di NOx per fasce di potenza erogata dal motore – Test NRTC (100 kW).....	79

Figura 8.24 Percentuale di lavoro e valori delle emissioni specifiche medie per fasce di potenza erogata dal motore -Test RDE (100kW).....	79
Figura 8.25 Percentuale di lavoro e valori delle emissioni specifiche medie per fasce di potenza erogata dal motore - Test NRTC (100kW).....	80
Figura A.1 Correlazione concentrazione di NOx rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 2 .....	82
Figura A.2 Correlazione concentrazione di CO rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 2 .....	82
Figura A.3 Correlazione concentrazione di CO2 rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 2 .....	82
Figura A.4 Correlazione concentrazione di NOx rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 3 .....	83
Figura A.5 Correlazione concentrazione di CO rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 3 .....	83
Figura A.6 Correlazione concentrazione di CO2 rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 3 .....	83
Figura A.7 Correlazione concentrazione di THC rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 3.....	83
Figura A.8 Correlazione concentrazione di NOx rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 4 .....	84
Figura A.9 Correlazione concentrazione di CO rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 4 .....	84
Figura A.10 Correlazione concentrazione di CO2 rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 4 .....	84
Figura A.11 Correlazione concentrazione di THC rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 4.....	84

## Indice tabelle

Tabella 4.1 Specifiche tecniche del motore monocilindrico 15 LD 350 .....	9
Tabella 4.2 Ciclo 6 modi tipo G2 - ISO 8178 [4].....	9
Tabella 4.3 Coefficiente $u_{gas}$ e parametri specifici del carburante per gas di scarico grezzi .....	12
Tabella 5.1 Fasi di lavoro della macchina .....	26
Tabella 5.2 Possibile ciclo per il test RDE .....	27
Tabella 5.3 Dati acquisiti durante test 'In service monitoring' [7] .....	28
Tabella 5.4 Specifiche tecniche del motore KDI 3404 TCR-SCR montato sul veicolo.....	29
Tabella 6.1 Durate per il calcolo degli eventi validi.....	30
Tabella 7.1 Concentrazioni dei gas di span e zero.....	35
Tabella 7.2 Attività eseguita dalla macchina .....	35
Tabella 7.3 Dati delle finestre mobili - Metodo basato sul lavoro (PEMS n°1, taratura 75 kW).....	37
Tabella 7.4 Dati delle finestre mobili - Metodo basato sulla massa di CO <sub>2</sub> - PEMS n°1 (Taratura 75 kW) .....	38
Tabella 7.5 Valori di conformity factor - PEMS n° 1 (75 kW).....	39
Tabella 7.6 Dati delle finestre mobili - Metodo basato sul lavoro (Taratura 100 kW).....	47
Tabella 7.7 Dati delle finestre mobili - Metodo basato sul lavoro (PEMS n°1, taratura 100kW).....	48
Tabella 7.8 Valori di conformity factor - PEMS n°1 (100 kW) .....	48
Tabella 7.9 Valori di m e R <sup>2</sup> per poter considerare il test RDE valido .....	55
Tabella 7.10 Contributo delle emissioni durante la partenza a freddo - 75kW .....	62
Tabella 7.11 Contributo delle emissioni durante la partenza a freddo - 100kW .....	63
Tabella 8.1 Dati delle finestre mobili - Metodo basato sul lavoro (Taratura 75 kW).....	65
Tabella 8.2 Dati delle finestre mobili - Metodo basato sulla massa di CO <sub>2</sub> (Taratura 75 kW) .....	66
Tabella 8.3 Valori di conformity factor - Test 75 kW.....	67
Tabella 8.4 Dati per il calcolo delle finestre mobili - Metodo basato sul lavoro (Taratura 100 kW) ....	73
Tabella 8.5 Dati delle finestre mobili - Metodo basato sulla massa di CO <sub>2</sub> (Taratura 100 kW) .....	74
Tabella 8.6 Valori di conformity factor – PEMS n°2 (100 kW).....	75

## Indice generale

Sommario .....	i
Indice figure.....	ii
Indice tabelle .....	vii
Elenco dei simboli e acronimi.....	x
1 Introduzione .....	1
2 Descrizione del set up sperimentale .....	3
2.1 Rilevatore a ionizzazione di fiamma.....	3
2.2 Analizzatore UV .....	4
2.3 Sensore NDIR.....	5
2.4 Misuratore di portata.....	6
3 Taratura strumentazione.....	7
4 Introduzione del PEMS per motori di piccola taglia .....	9
4.1 Confronto delle misure su un monocilindrico effettuate da PEMS e banco analisi.....	9
4.1.1 Ciclo 6 modi stazionario .....	9
4.1.2 Esecuzione test.....	10
4.1.3 Misure di inquinanti gassosi.....	13
4.1.4 Allineamento dei dati .....	16
4.1.5 Analisi della correlazione dei dati.....	18
5 Real driving emission.....	23
5.1 Installazione di PEMS su veicolo: fasi preliminari .....	23
5.2 Definizione del ciclo tipico e calcolo del lavoro .....	25
5.3 Tipo di dati da campionare e collegamento con la centralina .....	28
5.4 Motore installato sul veicolo.....	29
6 Elaborazione dei dati.....	29
6.1 Allineamento .....	29
6.2 Selezione degli eventi validi del ciclo .....	30
6.3 Calcolo del fattore di conformità .....	31
7 PEMS n°1 .....	35
7.1 Taratura da 75 kW .....	35
7.1.1 Confronto tra il ciclo reale e omologativo.....	39
7.2 Taratura da 100 kW .....	45

7.2.1	Confronto tra il ciclo reale e omologativo.....	48
7.3	Consistenza dei dati.....	54
7.4	Precisione delle misure .....	57
7.4.1	Test 75 kW .....	57
7.4.2	Test 100 kW .....	59
7.5	Valutazione delle emissioni durante la partenza a freddo.....	60
8	PEMS n°2 .....	64
8.1	Taratura da 75 kW .....	64
8.1.1	Confronto tra il ciclo reale e omologativo.....	67
8.2	Taratura da 100 kW .....	72
8.2.1	Confronto tra il ciclo reale e omologativo.....	75
9	Conclusioni .....	81
	Appendice A .....	82
10	Bibliografia.....	85

## Elenco dei simboli e acronimi

<b>BSFC</b>	Brake Specific Fuel Consumption
<b>CAN</b>	Controller Area Network
<b>CO</b>	Monossido di carbonio
<b>CO<sub>2</sub></b>	Anidride carbonica
<b>CF</b>	Conformity factor
<b>DOC</b>	Diesel Oxidation Catalyst
<b>ECU</b>	Electronic Control Unit
<b>EFM</b>	Exhaust Flow Meter
<b>FID</b>	Flame Ionization Detector
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>ISM</b>	In Service Monitoring
<b>MAW</b>	Moving Average Window
<b>N<sub>2</sub></b>	Azoto
<b>NDIR</b>	Non-Dispersive Infra-Red
<b>NO</b>	Ossido di azoto
<b>NO<sub>2</sub></b>	Diossido di azoto
<b>NRMM</b>	Non-Road Mobile Machinery
<b>NRTC</b>	Non-Road Transient Cycle
<b>PEMS</b>	Portable Emission Measurement System
<b>ppm</b>	Parti Per Milione
<b>RDE</b>	Real Driving Emission
<b>SCR</b>	Selective Catalytic Reduction
<b>THC</b>	Total Hydrocarbon

## 1 Introduzione

I gas di scarico dei motori a combustione interna danno un notevole contributo all'inquinamento atmosferico. In particolare, quelli dei motori utilizzati in applicazioni non stradali contribuiscono a circa il 15% delle emissioni di ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>) e 5% di quelle di particolato (PM) nell'Unione europea [1]. Per poter omologare un motore bisogna eseguire cicli, definiti in base alla tipologia di motore, all'interno di una cella per rilevare le emissioni inquinanti. Tuttavia, esiste un divario tra la quantità di inquinanti misurati durante un ciclo omologativo e quelli realmente emessi durante l'utilizzo reale.

Infatti, durante un ciclo reale il motore può trovarsi a funzionare in condizioni di carico anche molto diverse rispetto a quelle di un ciclo omologativo. Oltre a ciò le emissioni reali sono influenzate anche dalle condizioni ambientali di temperatura e umidità che, a differenza di un test in cella dove è possibile controllare queste grandezze, dipenderanno dalle condizioni climatiche nella zona dove verrà effettuato il test.

A partire dal 2019, in Europa, verrà applicato il Regolamento 2016/1628 per i motori della categoria NRE. Questo prevede il rispetto della normativa Stage V per l'immissione sul mercato di motori utilizzati in macchine mobili non stradali (NRMM) con potenze sotto i 56 kW e sopra i 130 kW. Mentre per taglie di potenza tra i 56 e 130 kW la norma entrerà in vigore nel 2020. La categoria NRMM (non-road mobile machinery) include una grande varietà di macchine come ad esempio attrezzature da giardino (tagliaerba, tagliasiepi, motoseghe etc.), generatori di corrente, sollevatori telescopici, escavatori, bulldozer etc.

Questa tesi è stata svolta presso l'azienda KOHLER Engines di Reggio Emilia che produce motori per applicazioni non stradali.

Con la nuova norma inizierà anche la fase di "In service monitoring" (ISM), durante la quale, ciascun costruttore di motori sarà tenuto a misurare le emissioni durante un ciclo reale. Inizialmente non ci saranno limiti sugli inquinanti emessi durante il ciclo reale ma i dati raccolti dovranno essere comunicati all'ente preposto per la redazione delle normative. Infatti, la raccolta dei dati sulle emissioni, provenienti da diversi costruttori, permetterà di emanare una normativa che fissi dei limiti realisticamente applicabili.

Il campionamento dei dati di emissioni in un ciclo reale verrà fatto utilizzando uno strumento portatile per la misura delle emissioni (PEMS). Sono stati quindi fatti dei test in cella motore per confrontare le misure di tale strumento con quelle del banco analisi per poter capire l'accuratezza di tali sistemi nell'utilizzo nei motori di piccola taglia.

Si esporrà la metodologia di calcolo che viene adottata per ottenere il fattore di conformità, un indice che dà una misura delle emissioni sul ciclo reale rispetto ai limiti imposti dalla normativa per il ciclo omologativo.

Verranno misurate le emissioni di un motore diesel, installato su una pala gommata, durante un ciclo reale e si cercherà di capire quali sono i punti di lavoro più critici per le emissioni degli  $\text{NO}_x$ .

I test verranno eseguiti con due tarature diverse del motore e si confronteranno le emissioni specifiche di inquinanti per le due potenze, pur conoscendo i limiti di un tale tipo di analisi.

Per poter fare un confronto tra i dati delle due diverse tarature si è cercato di eseguire lo stesso tipo di ciclo mantenendo inalterato il percorso. Tuttavia, per quanto il ciclo reale sia ripetitivo ci sono diversi fattori, non controllabili, che possono influenzare i risultati del test come ad esempio: stile di guida del driver, quantità di materiale caricato ad ogni giro, condizioni ambientali.

## 2 Descrizione del set up sperimentale

Il dispositivo PEMS, montato direttamente a bordo veicolo, permette la misura in tempo reale delle concentrazioni [ppm] di: CO, CO<sub>2</sub>, HC, NO<sub>x</sub>.

Il sistema è composto da diversi analizzatori: un rilevatore a ionizzazione di fiamma (FID) per la misurazione delle concentrazioni di THC; un rilevatore NDIR per la misura del CO e CO<sub>2</sub>; un analizzatore a raggi ultravioletti per la misura di NO e NO<sub>2</sub>; un misuratore di portata dei gas di scarico (EFM).

### 2.1 Rilevatore a ionizzazione di fiamma

Il rilevatore a ionizzazione di fiamma misura la concentrazione in ppm degli idrocarburi. Come si può vedere in figura n. 2.1 esso è costituito da un bruciatore nel quale viene convogliato il flusso di gas da analizzare; quest'ultimo passa attraverso la fiamma prodotta da aria e da una miscela di gas al 40% di idrogeno e 60% di elio. La combustione degli idrocarburi presenti nel gas da analizzare produce particelle ionizzate quindi misurando la corrente elettrica che scorre nel circuito (grazie alla differenza di potenziale tra i due elettrodi) è possibile rilevare il passaggio degli ioni.

La misura viene riportata in termini di parti per milione di carbonio ppmC<sub>1</sub> poiché non viene fatta alcuna distinzione sul tipo di idrocarburo.

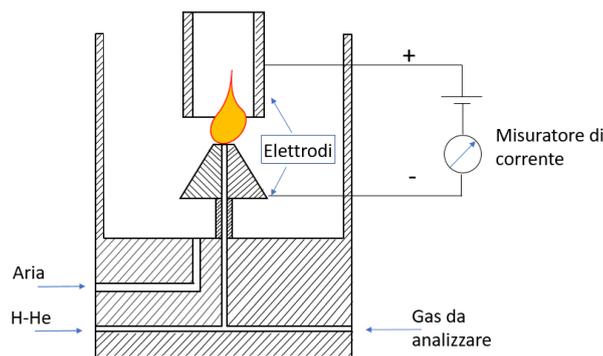


Figura 2.1 Schema del rilevatore a ionizzazione di fiamma

In particolare, per un idrocarburo C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> la corrente misurata dallo strumento è espressa da:

$$I = r[C_n H_m]Q$$

Equazione 2.1 Corrente misurata dall'analizzatore FID

Dove:

- Q è la portata in volume del campione di gas che attraversa il sensore;
- [C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>] è la concentrazione molare dell'idrocarburo;
- r è la risposta del FID.

## 2.2 Analizzatore UV

L'analizzatore a raggi ultravioletti consente la misura diretta dell'ossido di azoto (NO) e del diossido di azoto (NO<sub>2</sub>), a differenza dell'analizzatore a chemiluminescenza (CLD), utilizzato dal banco analisi, che misura direttamente solo l'ossido di azoto. Il principio su cui si basa è l'assorbimento, da parte dell'NO e dell'NO<sub>2</sub>, di radiazioni nel range di lunghezze d'onda compreso tra 200 nm e 500 nm. Prima di passare all'interno dell'analizzatore viene rimosso il vapore acqueo presente nel campione di gas, quindi la misura che si ottiene è su base secca.

In figura n. 2.2 è mostrato lo schema dei componenti per la misura dell'NO. Esso è costituito da una lampada UV che emette radiazioni specifiche per l'ossido di azoto e dai rilevatori di NO.

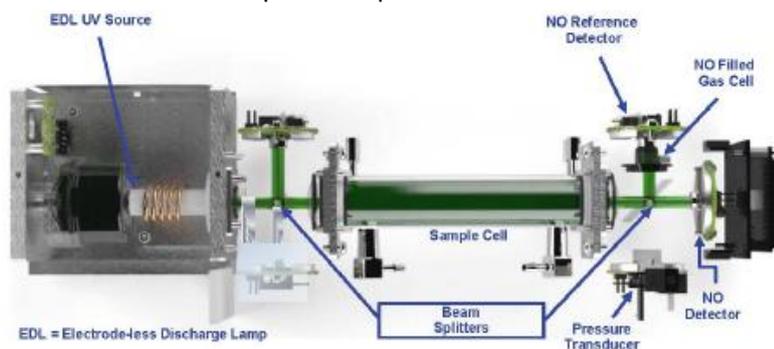


Figura 2.2 Schema dell'analizzatore NDUV per il rilevamento dell'NO

In figura 2.3 è sono rappresentati i componenti utilizzati per rilevare l'NO<sub>2</sub>. In questo caso la fonte di UV utilizzata emette luce ultravioletta ad una specifica lunghezza d'onda.

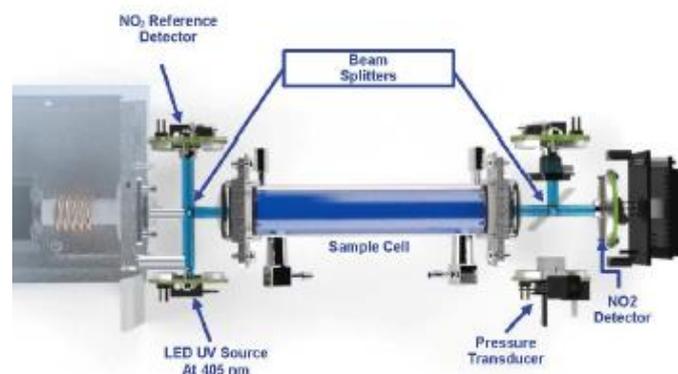


Figura 2.3 Schema dell'analizzatore NDUV per il rilevamento dell'NO<sub>2</sub>

### 2.3 Sensore NDIR

L'analizzatore NDIR viene utilizzato per la misura del monossido di carbonio (CO) e dell'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) sfruttando il fatto che la maggior parte delle molecole assorbono la radiazione infrarossa (nel range 1-100  $\mu\text{m}$ ) convertendola in calore.

Com'è possibile vedere in figura n. 2.4, il dispositivo è formato da una sorgente a infrarossi, che investe le celle di riferimento e di campionamento, e da una cella di misura. La cella di riferimento è riempita con azoto o aria mentre il gas da analizzare passa attraverso la cella di campionamento. La cella di misura contiene invece lo stesso gas che vogliamo analizzare.

I raggi infrarossi attraversano prima le celle di riferimento e di campionamento per poi arrivare alla cella di misura. Quindi è possibile, ad esempio, rilevare la concentrazione di CO<sub>2</sub> presente nel gas da analizzare, poiché la quantità di energia che riesce ad arrivare alla cella di misura dipende dalla quantità di CO<sub>2</sub> nei gas in ingresso alla cella 3. Infatti, la radiazione UV che segue il percorso di sinistra, nella figura n. 2.4, passa attraverso la cella 1 e arriva pressoché integralmente alla camera A mentre quella che attraversa la cella 3 viene in parte assorbita dalla CO<sub>2</sub> qui presente e solo una frazione raggiunge la camera B. Come conseguenza il gas contenuto nella cella B si scalderà meno di quello nella cella A. Quindi la diversa temperatura causerà anche una diversa pressione delle due camere e la membrana posta tra le due si deformerà. Misurando quindi tale deformazione è possibile calcolare la concentrazione della CO<sub>2</sub> nel gas. [2]

Il dispositivo è composto anche da un disco a settori (chopper) che gira a una certa velocità e da un filtro. Il chopper serve per creare un segnale alternato che permette di discriminare la radiazione infrarossa prodotta dalla sorgente da quella proveniente da altre fonti.

Il filtro invece viene riempito con il gas di interferenza (CO se si vuole misurare la CO<sub>2</sub> e viceversa) ed è necessario per ridurre l'interferenza derivante dal fatto che ad una particolare lunghezza d'onda la radiazione infrarossa viene assorbita in egual modo dall'anidride carbonica e dal monossido di carbonio.

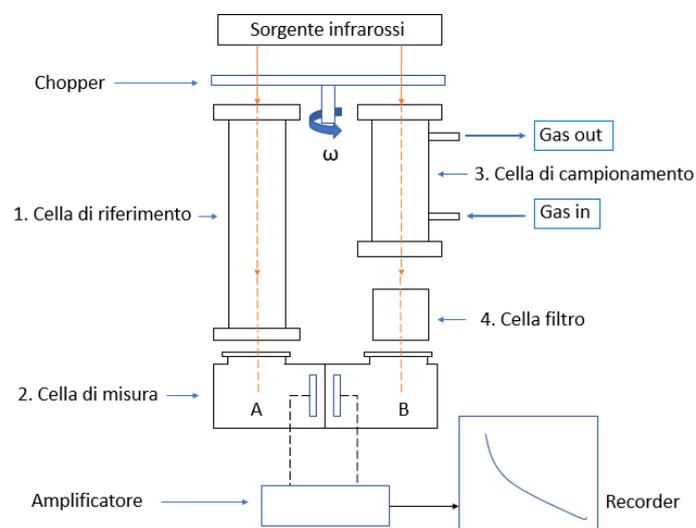


Figura 2.4 Schema dell'analizzatore NDIR

In particolare, la concentrazione  $C$  del gas è calcolata con l'equazione n. 2.2:

$$C = \frac{1}{\varepsilon} \log A$$

*Equazione 2.2 Concentrazione del gas in un analizzatore NDIR*

Dove:

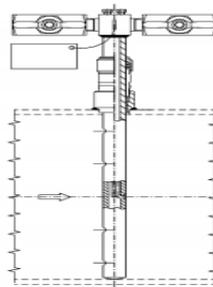
- $\varepsilon$  è il coefficiente di estinzione;
- $A$  è l'assorbanza

## 2.4 Misuratore di portata

Per determinare la portata dei gas di scarico i misuratori mostrati in figura n. 2.5 utilizzano il tubo di Pitot visibile nella figura n. 2.6. Quest'ultimo è immerso nel flusso da misurare e attraverso dei fori a monte e a valle dello stesso viene rilevata rispettivamente la pressione dinamica e quella statica. La differenza tra queste due è proporzionale alla portata.



*Figura 2.5 Misuratori di portata dei gas di scarico*



*Figura 2.6 Sezione del misuratore di portata che mostra il tubo di Pitot*

### 3 Taratura strumentazione

Un'operazione importante che permette di conoscere l'errore, e quindi di definire la precisione delle misure, è la taratura dello strumento. Questa viene eseguita utilizzando un campione di riferimento, in questo caso bombole di gas con concentrazione nota dei componenti. Il confronto tra la grandezza letta e quella effettiva (concentrazione di gas nella bombola) permette di tarare lo strumento. In particolare, prima di ogni test viene fatto lo *zero* e lo *span*.

In figura n. 3.1 è mostrato l'errore di zero. Le ascisse rappresentano la grandezza in ingresso allo strumento (input) mentre le ordinate il valore letto dallo stesso (output). Si può vedere come l'errore sia costante indipendentemente dal range di misura. La calibrazione dello zero sposta quindi la curva input-output, senza variarne l'inclinazione. [3]

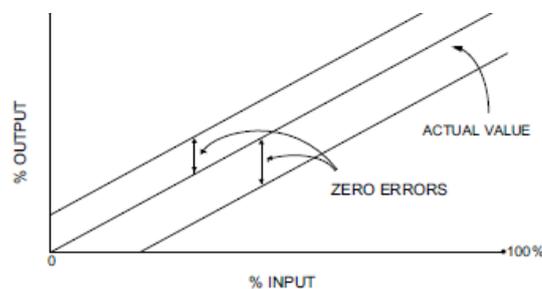


Figura 3.1 Errore di Zero

In figura n. 3.2 è rappresentato l'errore di span. In questo caso l'errore è tanto più alto quanto più è alto il valore da misurare (input). La calibrazione, in tal caso, regola la pendenza della curva input-output.

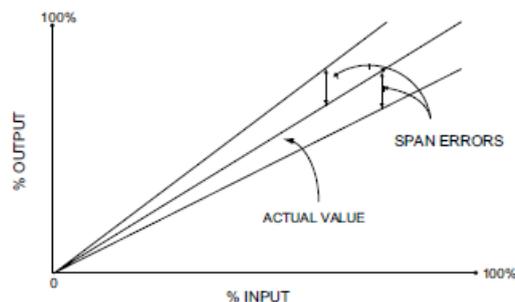


Figura 3.2 Errore di Span

L'errore di span e di zero si possono presentare simultaneamente. Si verifica allora la situazione raffigurata in figura n. 3.3 dove si vede come l'errore di misura sia dovuto alla combinazione dei due.

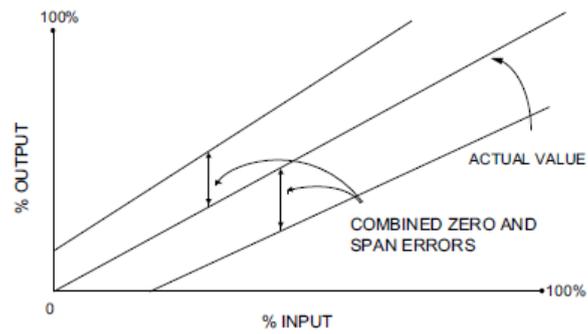


Figura 3.3 Errore combinato di zero e span

Un'altra controllo importante è la linearità dello strumento poiché esiste un certo scostamento della curva di taratura dall'andamento rettilineo di riferimento. L'errore di linearizzazione viene valutato rilevando la lettura dello strumento (output) per diversi valori in ingresso (input).

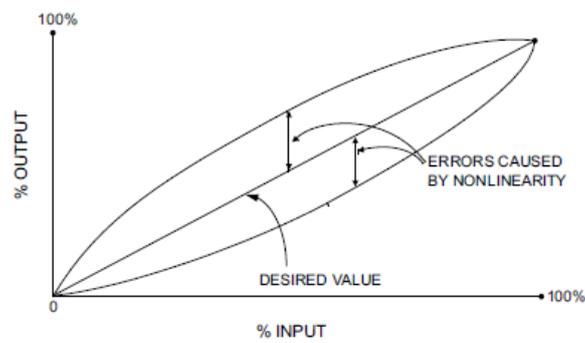


Figura 3.4 Errore di linearità

## 4 Introduzione del PEMS per motori di piccola taglia

L'introduzione del PEMS per applicazioni non stradali prevede una fase iniziale chiamata 'monitoraggio in servizio'. Come accennato nell'introduzione, lo scopo di tale fase è di raccogliere i dati di emissioni di inquinanti, provenienti da diversi costruttori, per poter fissare un limite normativo.

### 4.1 Confronto delle misure su un monocilindrico effettuate da PEMS e banco analisi

Attualmente l'utilizzo di strumentazione PEMS è previsto per motori con potenze maggiori di 19 kW. Tuttavia, si sta spingendo per estenderne l'utilizzo anche a potenze inferiori, pertanto si sta cercando di capire quali possono essere i principali vincoli nell'utilizzo di motori di piccola taglia.

A tal proposito sono stati fatti dei test su un motore monocilindrico a comando meccanico montato sul supporto all'interno di una cella motore eseguendo un ciclo omologativo 6 modi. Quindi sono stati confrontati i valori delle concentrazioni lette dal banco analisi con quelle del PEMS.

#### **Motore utilizzato**

In tabella 4.1 vengono mostrate alcune informazioni del motore utilizzato per i test.

<b>Motore KOHLER 15 LD 350</b>	
Cilindri	1
Potenza @ 3000 rpm (kW)	4,7
Cilindrata (cm <sup>3</sup> )	349
Tipo d'iniezione	Diretta
Sistema d'iniezione	meccanico
Conformità normativa emissioni	EPA TIER 4
Aftertreatment	-

*Tabella 4.1 Specifiche tecniche del motore monocilindrico 15 LD 350*

#### 4.1.1 Ciclo 6 modi stazionario

Il ciclo 6 modi è un ciclo omologativo che viene eseguito all'interno di una cella collegando il motore a un freno dinamometrico. Viene definito stazionario poiché il motore "staziona" in ciascun modo, caratterizzato da una certa richiesta di potenza e valore del numero di giri.

La tabella 4.2 riassume il ciclo. La coppia erogata in ciascun modo è espressa come percentuale rispetto alla massima coppia che il motore può erogare in quel determinato regime.

Modo	Giri	Coppia [%]
1		100
2		75
3	Velocità nominale	50
4		25
5		10
6	Low idle	0

*Tabella 4.2 Ciclo 6 modi tipo G2 - ISO 8178 [4]*

In figura 4.1 è rappresentata la concentrazione di CO<sub>2</sub> (blu) misurata allo scarico del motore. Si può vedere come la percentuale di anidride carbonica diminuisce man mano che si passa al modo successivo. Infatti, la quantità di CO<sub>2</sub> emessa è proporzionale al consumo di combustibile e questo è massimo nel modo 1, dove è massima la potenza, e decresce passando a quelli successivi.

Il rosso è un segnale digitale del tipo 0/1, utilizzato per distinguere con maggior precisione il passaggio da un modo all'altro. Infine, in verde è raffigurato l'intervallo di tempo utilizzato per calcolare i valori medi di emissioni in ogni modo.

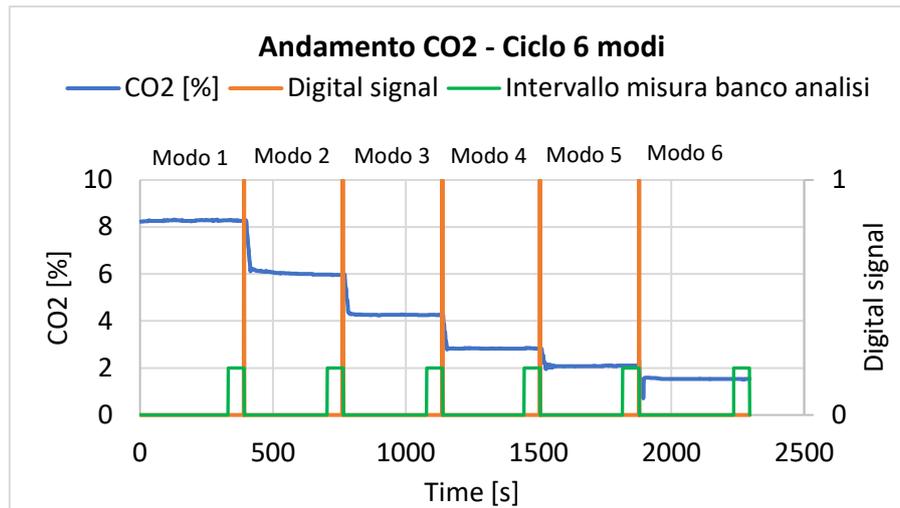


Figura 4.1 Emissioni di CO<sub>2</sub> di un motore monocilindrico in un ciclo 6 modi

#### 4.1.2 Esecuzione test

Lo schema di figura n. 4.2 mostra la configurazione utilizzata per eseguire tali test. Il motore è collegato al freno dinamometrico all'interno di una cella motore. La bilancia gravimetrica permette di misurare la quantità di combustibile inviata al motore. I gas di scarico vengono prelevati e analizzati dai due sistemi: il PEMS e il banco analisi della cella.

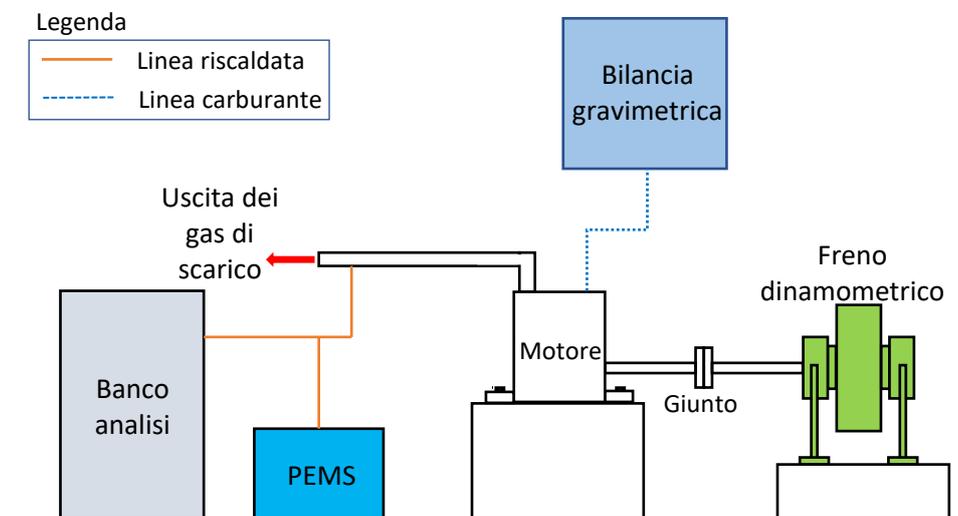


Figura 4.2 Schema di prova

Il PEMS misura le emissioni in continuo ad una frequenza di 1Hz mentre il banco analisi, per permettere al motore di stabilizzarsi, tiene conto solo degli ultimi 60 secondi di ciascun “modo”. Pertanto, il confronto è stato fatto con i valori medi di emissioni calcolati in tale intervallo di tempo sia per il PEMS che per il banco.

Lo scostamento è stato calcolato come:

$$s = \frac{V_{pems} - V_{banco}}{V_{banco}}$$

dove:

- $s$  è lo scostamento percentuale dei valori del PEMS rispetto a quelli misurati dal banco analisi [%];
- $V_{pems}$  è il valore misurato dal PEMS (per CO, NO<sub>x</sub> [ppm], THC [ppmC], per CO<sub>2</sub> [%], per portata dei gas di scarico [kg/h]);
- $V_{banco}$  è il valore misurato dal banco analisi (per CO, NO<sub>x</sub> [ppm], THC [ppmC], per CO<sub>2</sub> [%], per portata dei gas di scarico [kg/h]).

Il PEMS rileva la portata dei gas di scarico attraverso un misuratore a pressione differenziale quindi il calcolo del flusso di gas viene fatto misurando la pressione nel condotto di scarico.

Invece la portata di gas rilevata dal banco analisi si ottiene con l’equazione 4.1:

$$G_{exh} = G_{air,wet} + G_b$$

*Equazione 4.1 Portata dei gas di scarico - banco analisi*

Dove:

- $G_{exh}$  è la portata dei gas di scarico [g/s];
- $G_{air,wet}$  è la portata di aria umida in ingresso al motore [g/s];
- $G_b$  è la portata di combustibile [g/s].

La portata di combustibile  $G_b$  viene misurata in modo diretto attraverso una bilancia gravimetrica (vedere figura n. 4.2) che pesa il combustibile inviato, in un certo intervallo di tempo, al motore.

La portata di aria umida invece è calcolata con l’equazione 4.2:

$$G_{air,wet} = G_{air,dry} * \left(1 + \frac{H_a}{1000}\right)$$

*Equazione 4.2 Portata di aria umida*

Dove:

- $H_a$  è l’umidità assoluta [g/kg/].

La portata di aria secca è calcolata con l’equazione 5.3:

$$G_{air,dry} = G_{fuel} * AFR$$

*Equazione 4.3 Portata di aria secca*

Dove:

- $G_{air,dry}$  è la portata di aria secca [g/s];
- $G_{fuel}$  è la portata di combustibile [g/s];
- $AFR$  è il rapporto aria combustibile [-].

$$AFR = f(HTCRAT, fl_{stoich}, THC[ppm], CO [ppm], CO_2 [%])$$

Equazione 4.4 Rapporto aria combustibile

Dove:

- $HTCRAT = 1,82$  è il rapporto idrogeno/carbonio del combustibile, in questo caso gasolio;
- $fl_{stoich} = \frac{1}{AFR_{stoich}}$  è il rapporto stechiometrico tra la massa di combustibile e di aria;
- $THC, CO$  e  $CO_2$  sono rispettivamente le concentrazioni di idrocarburi totali, monossido di carbonio e anidride carbonica misurati allo scarico.

Sono stati eseguiti 4 test. In figura 4.3 si mostrano gli scostamenti della portata dei gas di scarico misurata dal PEMS (rispetto a quella del banco analisi) per ciascun modo in ogni test. Si può vedere come l'errore di misura, pur seguendo un andamento simile per tutti i 4 test (linee tratteggiate), è molto elevato. Infatti, il valore minimo rilevato è pari al 45% circa nel modo 4 mentre arriva a più del 155% nel modo 6, quando il motore è al minimo.

È chiaro che tali valori siano inaccettabili, infatti la portata in massa delle emissioni viene ottenuta attraverso quella dei gas di scarico con la formula 4.5 [5] quindi anche se la misura delle concentrazioni degli inquinanti allo scarico fosse molto precisa si otterrebbero comunque risultati non plausibili.

$$q_{mgas} = u_{gas} * c_{gas} * q_{mew}$$

Equazione 4.5 Calcolo del flusso di emissioni a partire dalla concentrazione del componente

Dove:

- $q_{mgas}$  è la portata in massa del singolo gas [g/h];
- $u_{gas}$  è il rapporto tra la densità del componente allo scarico e la densità dei gas di scarico;
- $c_{gas}$  è la concentrazione del componente nei gas di scarico grezzi [ppm];
- $q_{mew}$  è il flusso in massa dei gas di scarico [kg/h].

Si riportano in tabella 3 i valori di  $u_{gas}$  per i gas analizzati [5]:

Carburante e densità corrispondente $\rho_e$ [kg/m <sup>3</sup> ]		Gas				
		NO <sub>x</sub>	CO	HC	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
		$P_{gas}$ [kg/m <sup>3</sup> ]				
		2,053	1,250	<sup>a</sup>	1,9636	1,4277
		<b>Coefficiente <math>u_{gas}</math> <sup>b</sup></b>				
Diesel	1,2943	0,001 586	0,000 966	0,000 479	0,001 517	0,001 103

<sup>a</sup> Dipende dal combustibile.

<sup>b</sup> per  $\lambda=2$ , aria secca, 273 K, 101,3 kPa

Tabella 4.3 Coefficiente  $u_{gas}$  e parametri specifici del carburante per gas di scarico grezzi

Nei motori monocilindrici le fluttuazioni di pressione e portata allo scarico sono molto elevate quindi tale errore di misura potrebbe dipendere da ciò.

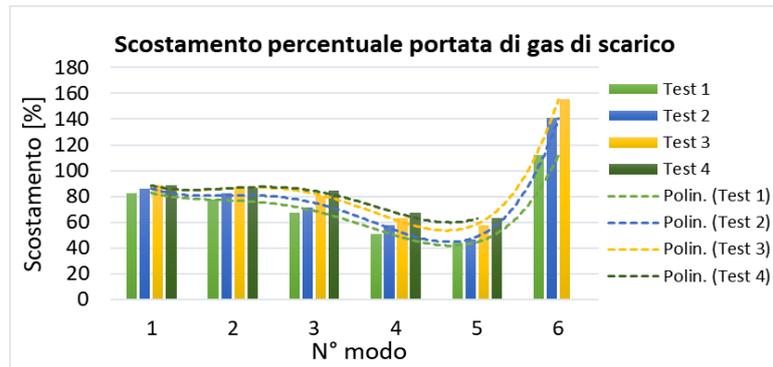


Figura 4.3 Scostamenti [%] della portata dei gas di scarico del PEMS rispetto al banco analisi

In figura 4.3 è rappresentata la portata dei gas di scarico misurata dal PEMS con campionamento alla frequenza di 1 Hz. Si nota che nel modo 6, dove si registra l'errore di misura maggiore, si hanno anche le oscillazioni più ampie nella portata. Tuttavia, le oscillazioni che si vedono nel grafico hanno una frequenza di 1Hz, quindi sarebbe facile tenerle in considerazione mentre quelle che, con molta probabilità, causano l'errore di misura hanno una frequenza più elevata. Infatti, per poter risolvere tale problema si sta attualmente lavorando sulla frequenza di campionamento. Scegliendo in modo appropriato un valore per quest'ultima sarebbe possibile contare tutti i picchi di pressione e quindi calcolare con più precisione la portata.

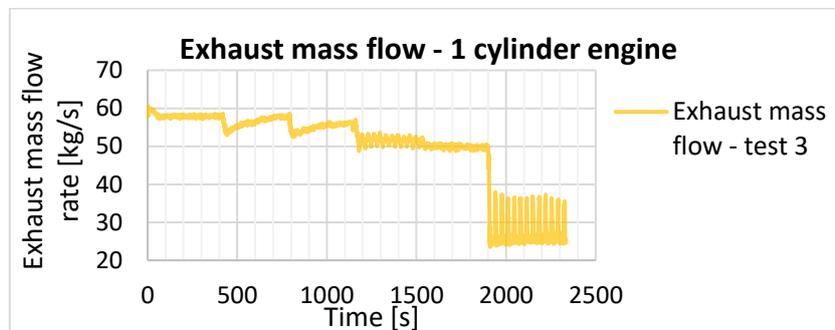


Figura 4.4 Portata dei gas di scarico rilevata con il PEMS nel ciclo 6 modi - test 3

#### 4.1.3 Misure di inquinanti gassosi

Nelle figure 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 sono messi a confronto gli scostamenti delle misure di emissioni gassose per ogni test. Si fa notare che a causa di alcuni problemi non è stato possibile rilevare i dati del modo 6 nel test 4, pertanto la relativa barra non comparirà nei grafici.

Dalla figura 4.4 si può vedere che lo scostamento sia negativo in tutti i modi, ciò vuol dire che la concentrazione di CO<sub>2</sub> misurata dal PEMS è minore rispetto a quella del banco analisi.

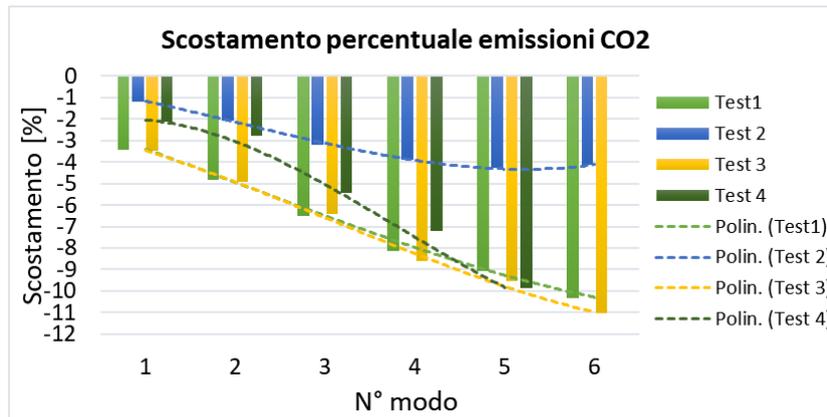


Figura 4.5 Scostamento delle emissioni di CO2 rilevate dal PEMS rispetto al banco analisi per motore monocilindrico

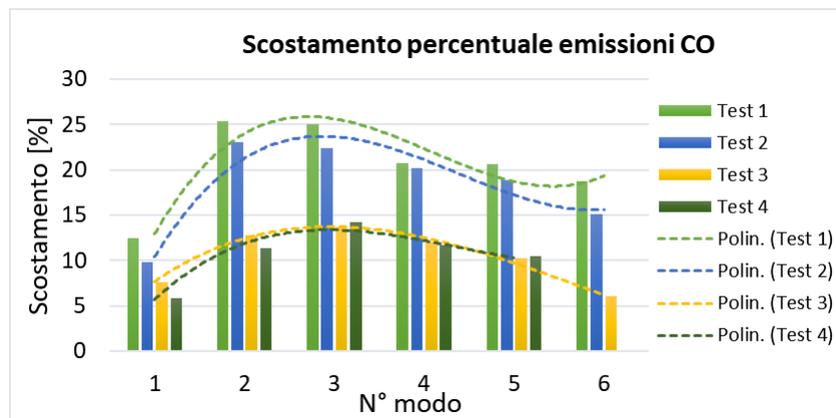


Figura 4.6 Scostamento delle emissioni di CO rilevate dal PEMS rispetto al banco analisi per motore monocilindrico

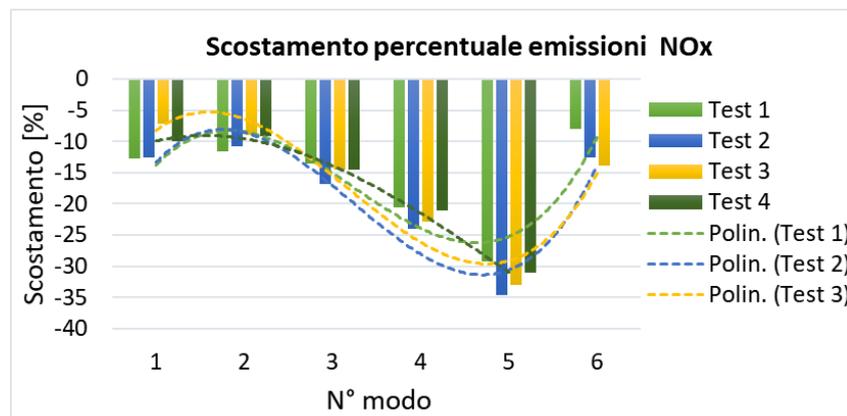


Figura 4.7 Scostamento delle emissioni di NOx rilevate dal PEMS rispetto al banco analisi per motore monocilindrico

Le misure degli idrocarburi allo scarico (THC) relativi ai test 1 e 2 (colonne tratteggiate nella figura 4.7) sono state scartate perché il PEMS era stato tarato con una concentrazione di HC non appropriata per tale motore. Da questo punto di vista esiste una grande differenza rispetto al banco analisi. Quest'ultimo infatti è collegato a più bombole con diverse concentrazioni ed è in grado di adeguarsi in modo automatico. Invece nel caso del PEMS occorre conoscere in anticipo il valore della

concentrazione del componente che ci si aspetta allo scarico poiché, in base a questa, verrà fatta taratura.

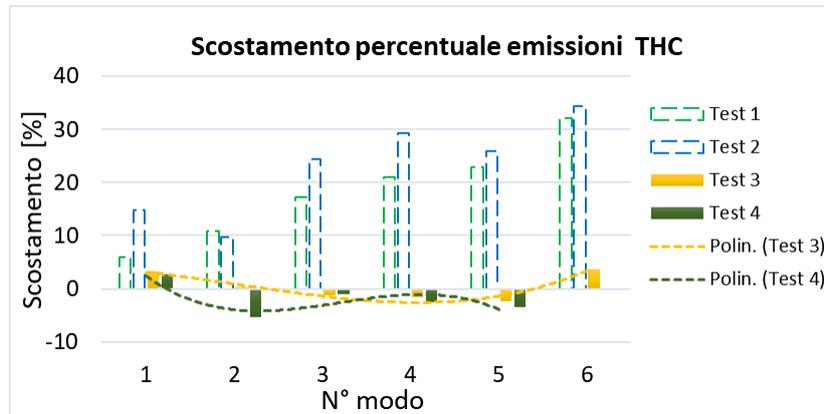


Figura 4.8 Scostamento delle emissioni di THC rilevate dal PEMS rispetto al banco analisi per motore monocilindrico

Sebbene non sia un inquinante in figura 4.9 si mostrano anche gli scostamenti per le misure sulla concentrazione di ossigeno rilevata allo scarico.

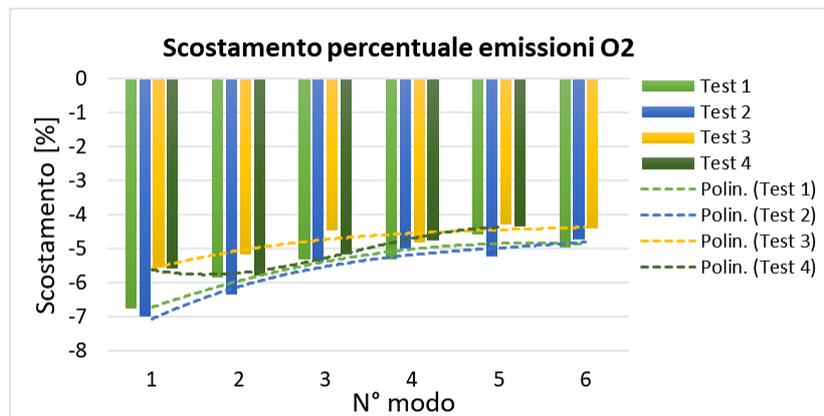


Figura 4.9 Scostamento delle emissioni di O<sub>2</sub> rilevate dal PEMS rispetto al banco analisi per motore monocilindrico

I valori, in modulo, di scostamento rilevati oscillano:

- per la CO<sub>2</sub> tra l'1 % e l'11 % circa;
- per la CO tra il 6 % e il 25 % circa;
- per gli NO<sub>x</sub> tra il 7 % e il 35 % circa;
- per i THC tra l'1 % e il 6 %;
- per l'O<sub>2</sub> tra il 6 % e 7 % circa.

#### 4.1.4 Allineamento dei dati

Per analizzare la correlazione tra le misure effettuate con il PEMS e con il banco analisi sono stati considerati solo i dati relativi agli ultimi 60s di ogni modo, come per l'analisi degli scostamenti.

Nella figura n. 4.9 vengono mostrati i dati di emissioni rilevate dal banco analisi per far vedere come questi siano allineati tra loro mentre in figura n. 4.10 quelli rilevati dal PEMS.

Questa è una verifica importante infatti, a causa del differente percorso fatto dal gas per arrivare ai diversi analizzatori, esiste un diverso ritardo temporale tra l'istante in cui avviene il prelievo del campione da analizzare e la misura. Per tenere conto di ciò e allineare le misure dei diversi componenti, viene applicato un certo sfasamento temporale.

Le misure fatte dal banco analisi avvengono in modo discontinuo (come si vede dalla figura n. 4.10), infatti il banco comincia il campionamento 180 s prima della fine di ogni modo e di questi vengono considerati solo gli ultimi 60s (linea verde tratteggiata).

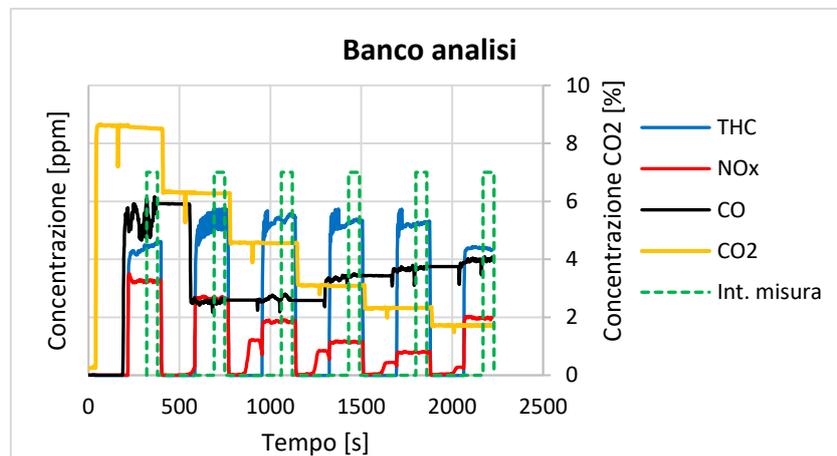


Figura 4.10 Concentrazione emissioni allo scarico rilevate dal banco analisi - Test 1

Le misure effettuate dal PEMS avvengono invece in modo continuo come è facile vedere dalla figura n. 4.11 dove sono rappresentati gli andamenti delle concentrazioni delle emissioni.

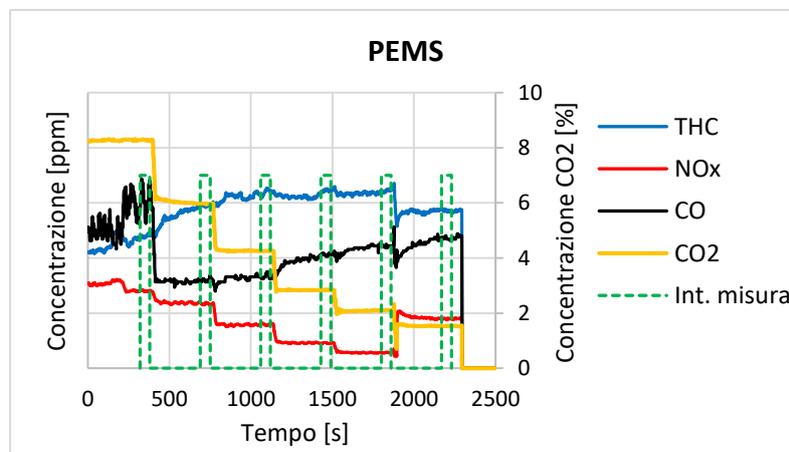


Figura 4.11 Concentrazione emissioni allo scarico rilevate dal PEMS - Test 1

Per poter allineare i dati provenienti dal PEMS e dal banco analisi è stata utilizzata la percentuale di anidride carbonica allo scarico. Infatti, come è possibile vedere in figura n. 4.11 il suo andamento presenta un cambiamento quasi netto nel passaggio da un modo all'altro.

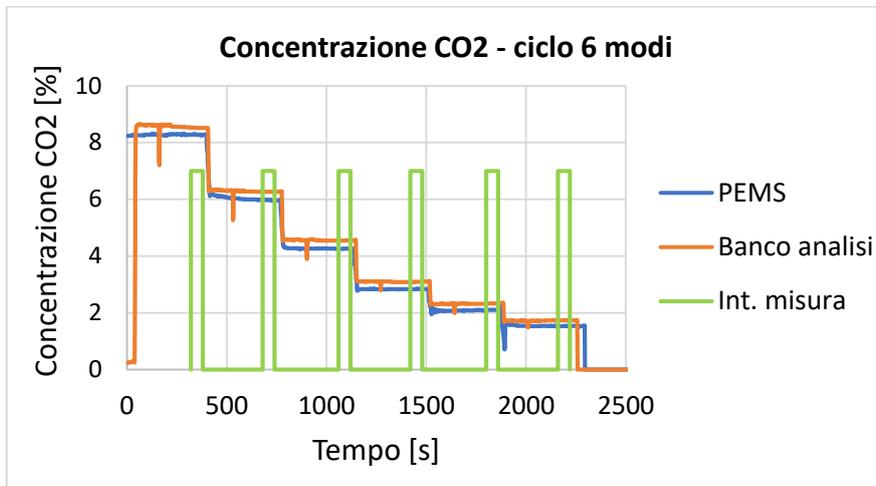


Figura 4.12 Andamento della concentrazione di CO2 per il test 6 modi rilevate da PEMS e banco analisi - Test 1

In figura n. 4.13 è rappresentata la concentrazione degli NO<sub>x</sub> rilevata durante il test 1 da entrambe i sistemi. È facile notare il passaggio da un modo all'altro sia grazie alla misura discontinua del banco analisi sia all'andamento a scalino della concentrazione di NO<sub>x</sub>. Quest'ultima decresce fino al modo n° 5 per poi risalire nel modo n° 6, quando il motore è al minimo.

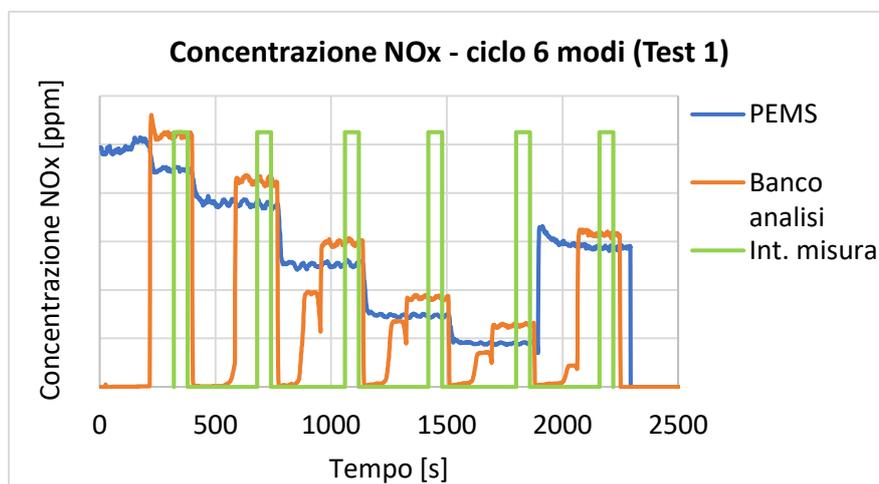


Figura 4.13 Andamento della concentrazione di NOx per il test 6 modi rilevate da PEMS e banco analisi - Test 1

Nella figura n. 4.14 si mostra l'andamento della concentrazione di THC, rilevata dal PEMS e dal banco analisi. Si nota che il segnale rilevato dal banco analisi ha delle oscillazioni molto ampie nel modo n° 2. Guardando l'andamento della curva relativa al PEMS (blu) si può vedere che la concentrazione di THC cresce fino al modo n° 3 per poi rimanere quasi costante fino al modo n° 5 e infine ridursi nell'ultimo modo.

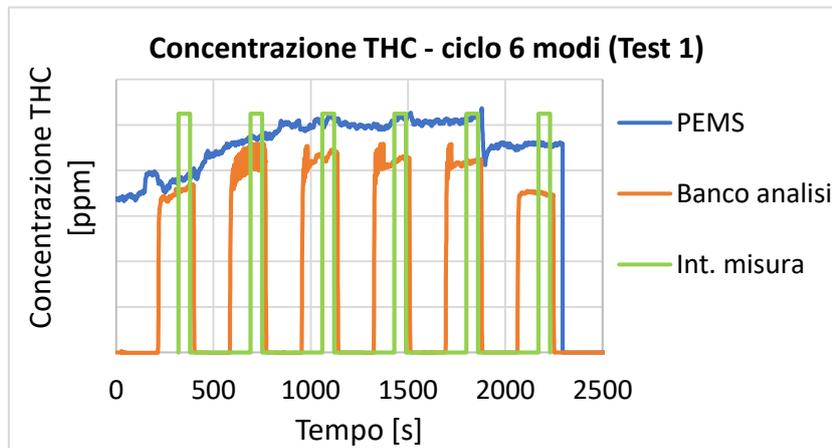


Figura 4.14 Andamento della concentrazione di THC per il test 6 modi rilevate da PEMS e banco analisi - Test 1

In figura n. 4.15 è mostrata la concentrazione del CO allo scarico. Questa risulta essere molto elevata quando il motore eroga la massima potenza (modo n° 1) poi si riduce e rimane quasi stabile nel modo n° 2 e n° 3 infine dal modo n° 4 in poi cresce in modo non costante.

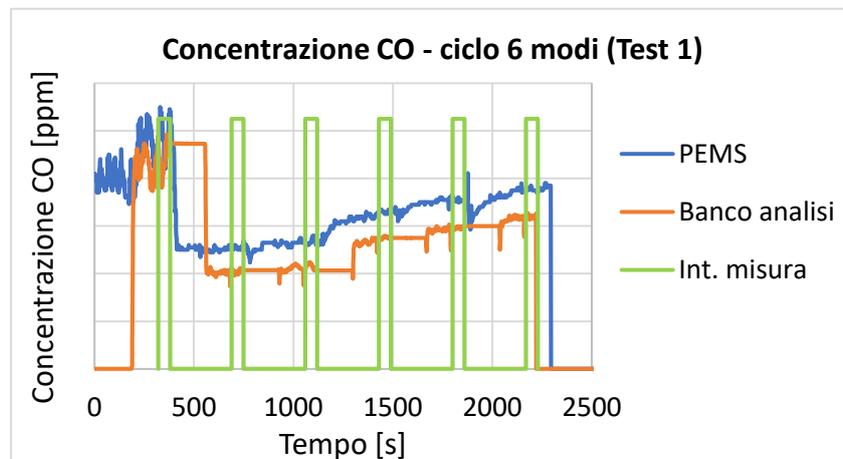


Figura 4.15 Andamento della concentrazione di CO per il test 6 modi rilevate da PEMS e banco analisi - Test 1

#### 4.1.5 Analisi della correlazione dei dati

Per vedere la correlazione tra i dati rilevati dal PEMS e dal banco analisi, questi sono stati normalizzati rispetto alla concentrazione massima rilevata dal banco. Sull'asse delle ordinate ci sono le emissioni rilevate dal PEMS e su quello delle ascisse quelle rilevate dal banco. I valori utilizzati sono, come prima, quelli relativi agli ultimi 60 secondi di ogni modo.

In figura n. 4.15 sono rappresentate le due serie di dati e la retta di regressione. Sebbene i valori rilevati di scostamento per gli NO<sub>x</sub> fossero molto elevati esiste una correlazione molto buona tra questi e quelli del banco analisi, come indica l'elevato valore del coefficiente di determinazione R<sup>2</sup>.

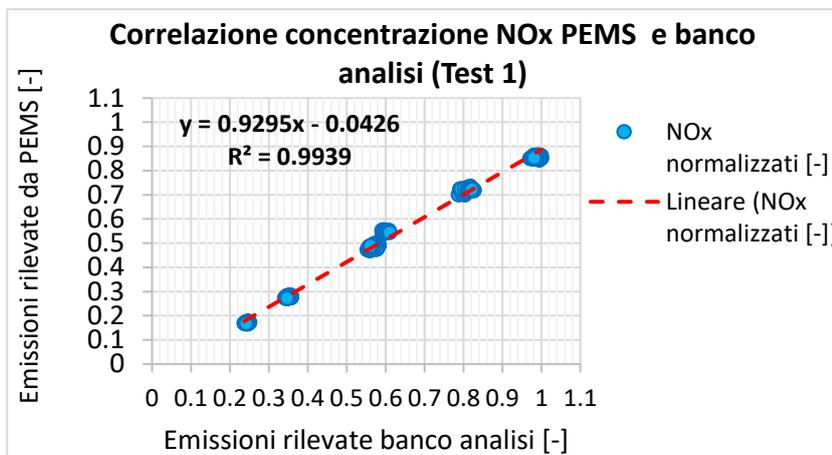


Figura 4.16 Correlazione concentrazione di NO<sub>x</sub> rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 1

Per il test 1 e 2 non verranno rappresentati i grafici per la correlazione dei dati relativi ai THC in quanto, come detto precedentemente, la concentrazione della bombola utilizzata per la taratura dello strumento non era adeguata.

Anche i dati di emissioni del CO hanno una correlazione abbastanza buona (figura n. 4.17) anche se si nota una zona con maggiore dispersione. Questa è dovuta ai dati campionati nel modo n° 1 infatti escludendoli si può vedere in figura n. 4.18 che la retta di regressione rappresenta abbastanza bene la dispersione di punti.

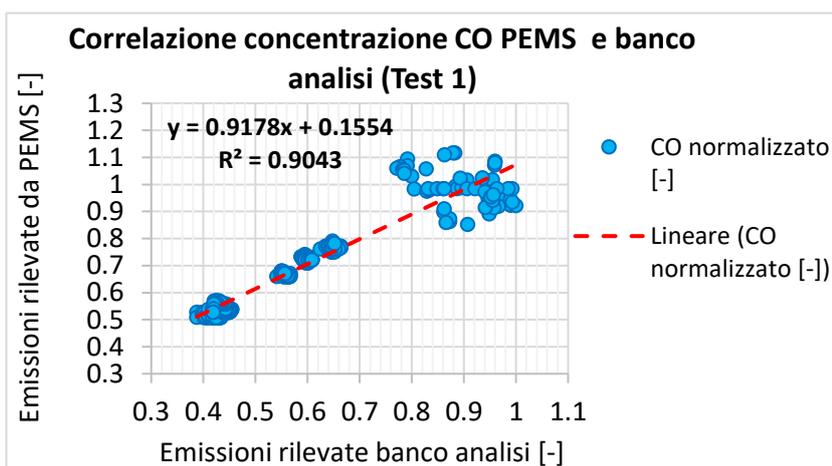


Figura 4.17 Correlazione concentrazione di CO rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 1

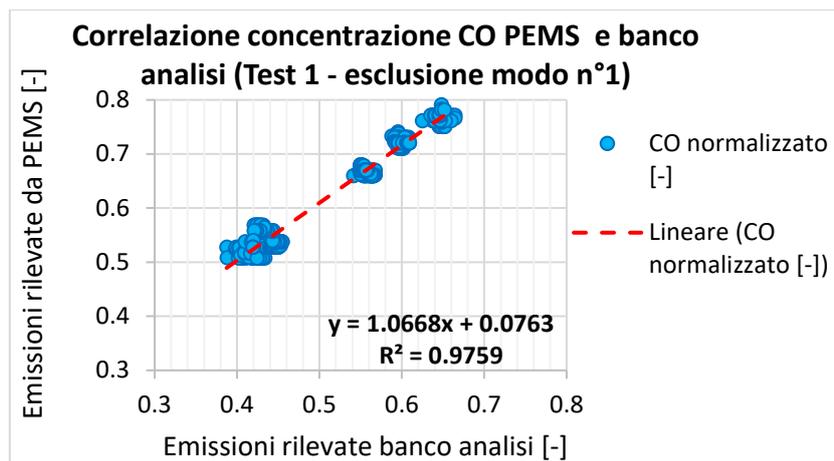


Figura 4.18 Correlazione concentrazione di CO rilevata dal PEMS e dal banco analisi con esclusione dei dati relativi al modo n° 1- Test 1

Anche per la CO<sub>2</sub> si può vedere in figura n. 4.18 una forte correlazione tra i dati del PEMS e del banco analisi.

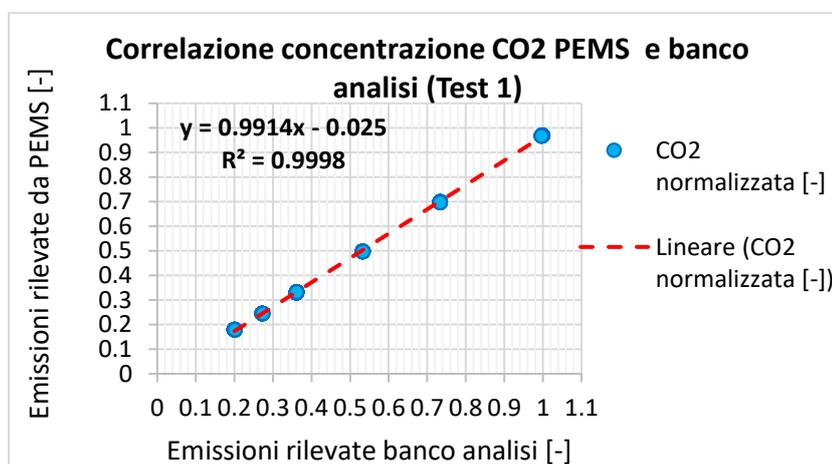


Figura 4.19 Correlazione concentrazione di CO<sub>2</sub> rilevata dal PEMS e dal banco analisi con esclusione dei dati relativi al modo n° 1- Test 1

Per questo tipo di test il sistema è settato in modo da fornire direttamente il valore medio relativo agli ultimi 60 secondi di ogni modo, mentre i valori dei singoli dati campionati non vengono di norma acquisiti. A causa di un problema con il recorder, che registra i singoli dati, per il test n° 3 è stato possibile ottenere, per tutti i modi, solo i valori medi di emissioni mentre si hanno quelli relativi agli ultimi 60 s solo per il modo 1 e 2. Nelle figure n. 4.20, n. 4.21, n. 4.22 e n. 4.23 viene mostrata la correlazione tra i valori medi del PEMS e del banco.

In figura n. 4.20 si può notare come la correlazione dei valori medi, relativi alle misure degli NO<sub>x</sub>, sia molto buona.

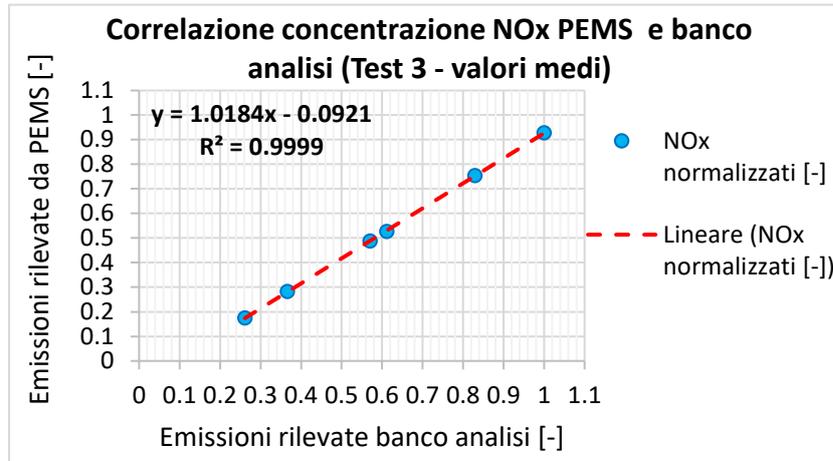


Figura 4.20 Correlazione concentrazione di NO<sub>x</sub> rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 3

Anche per il monossido di carbonio e l'anidride carbonica si ha una buona correlazione tra i dati come si vede dalle figure n. 4.21 e n. 4.22.

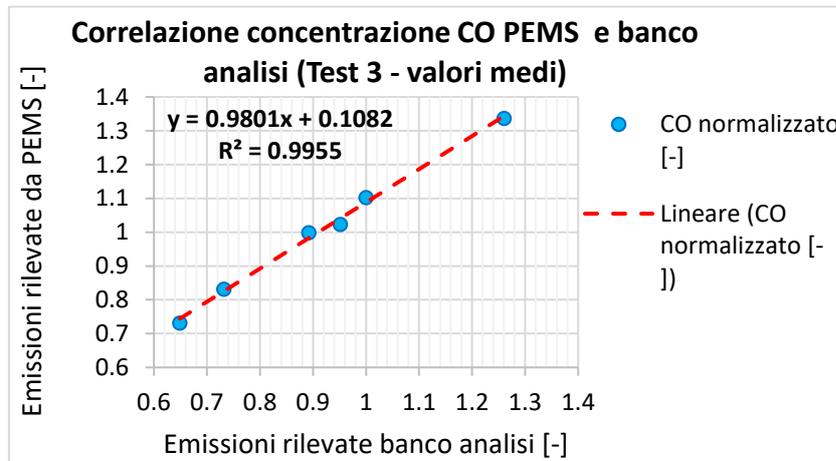


Figura 4.22 Correlazione concentrazione di CO rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 3

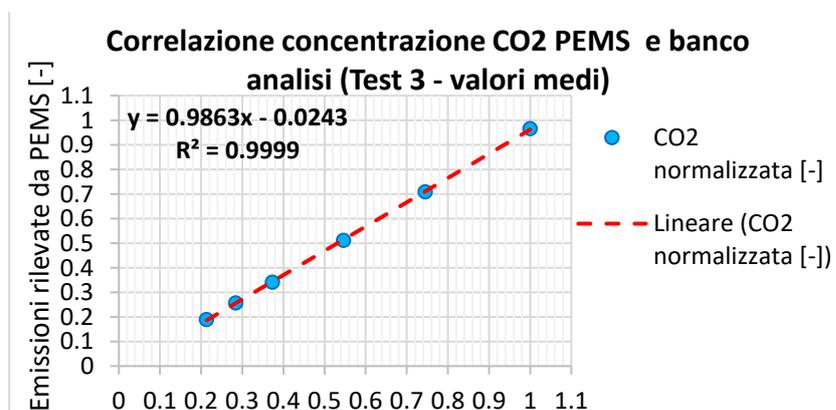


Figura 4.21 Correlazione concentrazione di CO<sub>2</sub> rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 3

Per gli idrocarburi incombusti si vede, in figura 4.23, una correlazione meno forte ma tuttavia buona.

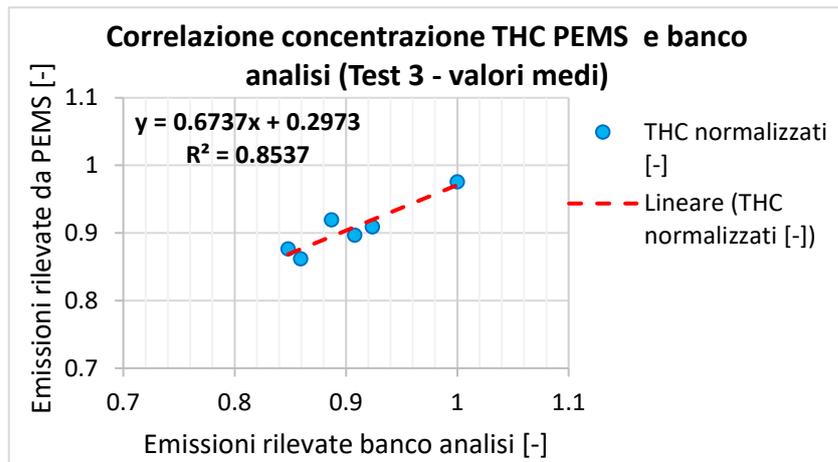


Figura 4.23 Correlazione concentrazione di THC rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 3

In appendice A vengono mostrate le figure della correlazione dei dati per gli altri test. Si può quindi concludere che i valori di correlazione sono molto elevati per gli  $\text{NO}_x$  e la  $\text{CO}_2$ . Per la  $\text{CO}$  sono molto buoni eccetto che nel modo 1 dove (in tutti i test), si nota un segnale molto variabile (sia del PEMS che del banco) come si può vedere dalla figura n. 4.18. Infine, anche per i THC c'è una buona correlazione anche se si nota una maggiore dispersione dei dati.

## 5 Real driving emission

Lo scopo delle prove con il PEMS è di misurare la quantità di inquinanti quando la macchina esegue un ciclo reale. Pertanto, è necessario definire un ciclo che sia il più possibile rappresentativo delle condizioni della normale attività della macchina.

### 5.1 Installazione di PEMS su veicolo: fasi preliminari

Per poter installare il PEMS sulla macchina occorre scegliere la posizione e il modo in cui verranno disposti gli strumenti e i rispettivi accessori. Per i test è stata utilizzata una pala gommata con la cabina in metallo e ciò ha consentito di disporre tutti gli strumenti su una pedana che successivamente è stata fissata sopra la cabina. Il generatore di corrente è invece stato posizionato sul passaruota posteriore come si vede dalla figura n. 5.1.



*Figura 5.1 Veicolo usato per i test RDE dotato di strumentazione PEMS (sopra la cabina)*

In figura n. 5.2 è rappresentato uno schema semplificato che mostra i componenti e come questi sono collegati tra loro. Per evitare che i gas di scarico si raffreddino e condensino, durante il tragitto verso gli analizzatori, dopo essere stati prelevati dal tubo di scarico passano attraverso la linea riscaldata che è mantenuta a una temperatura di 191°C. L'EFM legge i dati di temperatura e portata dei gas e li comunica al sistema di controllo, lo stesso fanno gli analizzatori con i dati relativi alle concentrazioni di emissioni. La corrente per alimentare tutti i componenti è fornita da un generatore da 2,2 kW di potenza massima. Le batterie servono per non interrompere la corrente quando ad esempio si passa dalla presa elettrica al generatore o se il generatore si spegne durante il test. In questo caso permettono di rimetterlo in moto evitando lo spegnimento della strumentazione o, a seconda dell'autonomia, di portare a termine la prova con il generatore spento. L'unica bombola a bordo del veicolo è quella di H<sub>2</sub>-He, come accennato precedentemente, per alimentare il FID.

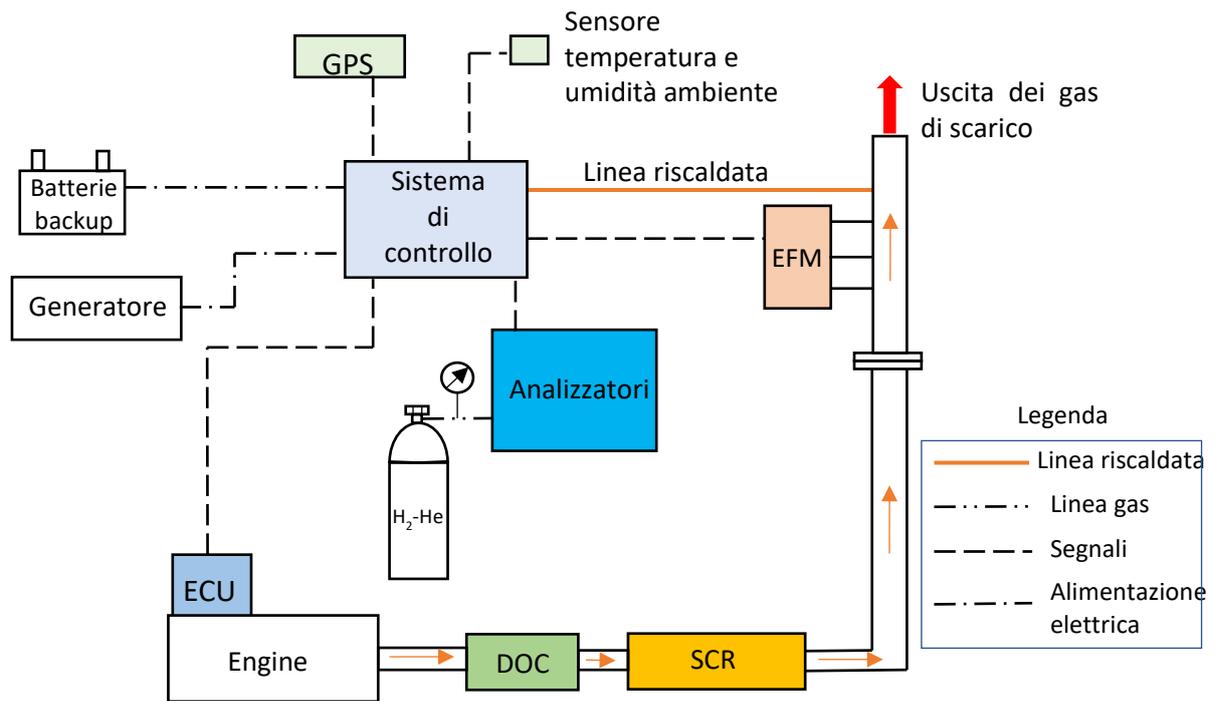


Figura 5.2 Schema dei collegamenti tra i componenti

## 5.2 Definizione del ciclo tipico e calcolo del lavoro

La durata del test viene definita in base alla quantità di lavoro nel ciclo NRTC quindi come prima cosa è stato calcolato il lavoro del parent engine<sup>1</sup> del motore.

Il ciclo NRTC è un ciclo transitorio per motori diesel mobili non stradali eseguito sul banco motore e con una durata di 1238 secondi. Nei grafici di figura 5.2 vengono mostrati i valori normalizzati di coppia e numero di giri motore nel ciclo NRTC. I valori di regime pari a 0% e 100% corrispondono rispettivamente al numero di giri minimo e massimo del motore. [6]

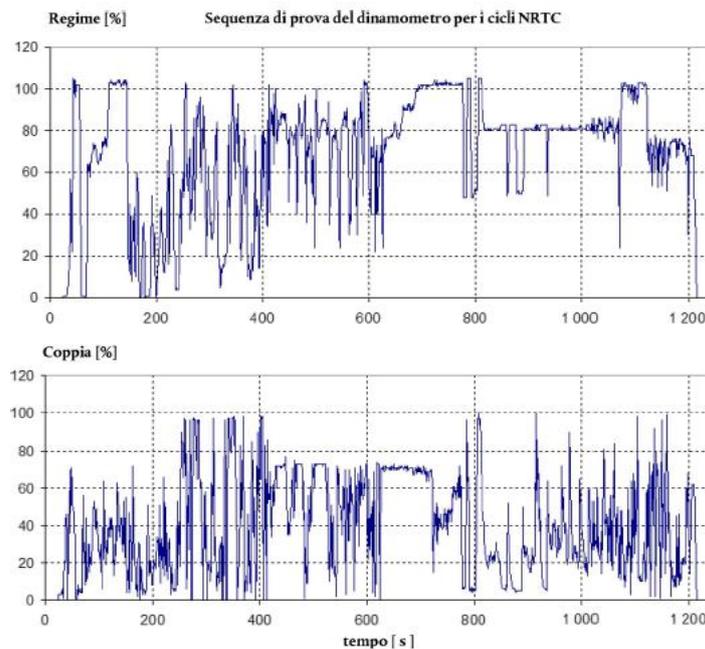


Figura 5.3 Sequenza di prova per ciclo NRTC

Il lavoro del ciclo NRTC è stato calcolato con l'equazione 5.3 ed è pari a 12,1 kWh.

Prima di iniziare il test occorre fare una stima della durata in funzione del tipo di lavoro che verrà svolto. Pertanto, sono state definite alcune attività tipiche della macchina:

- Roothing: la macchina segue un percorso senza carico;
- Re-handling: la macchina si avvicina a un mucchio di ghiaia, carica la benna e dopo alcune manovre la scarica;
- Idling: la macchina staziona al minimo;
- Idle with load: la macchina staziona al minimo azionando solo la benna.

Successivamente tali attività sono state eseguite con la macchina e dalla centralina è stata letta la quantità di combustibile iniettato, quindi per poter calcolare la coppia è stata utilizzata la formula

---

<sup>1</sup> "Parent engine" è un motore selezionato da una famiglia di motori in modo che le sue caratteristiche di emissione siano rappresentative per questa famiglia di motori [9].

empirica in equazione 5.1, valida per il motore in uso, che permette di calcolare la coppia nota la quantità di carburante immessa in camera:

$$T = f(Qfin)$$

*Equazione 5.1 Formula empirica per il calcolo della coppia motore*

Dove:

- $T$  è la coppia [Nm]
- $Qfin$  è la quantità di combustibile introdotta in camera di combustione [mm<sup>3</sup>/hub].

La potenza è stata calcolata come:

$$P = \frac{T * \omega}{1000}$$

*Equazione 5.2 Potenza del motore*

Dove:

- $P$  è la potenza del motore [kW];
- $T$  è la coppia [Nm];
- $\omega$  è la velocità angolare del motore [rad/s].

Infine, il lavoro è stato calcolato con l'equazione 5.3:

$$W = \frac{1}{f} * \frac{1}{3,6 * 10^3} * \sum_{i=k}^n P_i * \Delta t$$

*Equazione 5.3 Lavoro motore*

Dove:

- $W$  è il lavoro fatto nell'intervallo di lavoro k-n [kWh];
- $f$  è la frequenza di campionamento [Hz];
- $k$  e  $n$  sono rispettivamente l'istante di inizio e fine dell'intervallo di tempo;
- $P_i$  è la potenza del motore all'istante  $i$ -esimo [kW];
- $\Delta t$  è il tempo tra un dato e l'altro [s].

La tabella 3 riassume i dati delle operazioni e il lavoro accumulato in ciascuna di esse.

Tipo operazione	Durata operazione [s]	Lavoro [kWh]
Roding	794	1,27
Re-Handling	754	8,43
Idle	221	0,091
Idle with load	193	0,120

*Tabella 5.1 Fasi di lavoro della macchina*

A questo punto, note le operazioni base e la rispettiva quantità di lavoro, è stato possibile studiare un ipotetico ciclo di lavoro.

Per fare ciò sono state “assemblate”, via software, le singole operazioni per ottenere un unico ciclo. Nella tabella 5.2 si mostrano le singole operazioni, la loro durata e il numero di volte che verranno ripetute nel ciclo.

Tipo operazione	Durata [s]	Numero di volte
Roading	1800	3
Re-Handling	1800	
Idle	600	
Idle with load	600	
Re-Handling	1500	1
Idle with load	600	
<b>Durata totale</b>	<b>16500</b>	

Tabella 5.2 Possibile ciclo per il test RDE

In figura 5.3 si può vedere l'andamento della potenza percentuale del motore con la taratura da 75kW in funzione del tempo, per il ciclo in tabella 5.2.

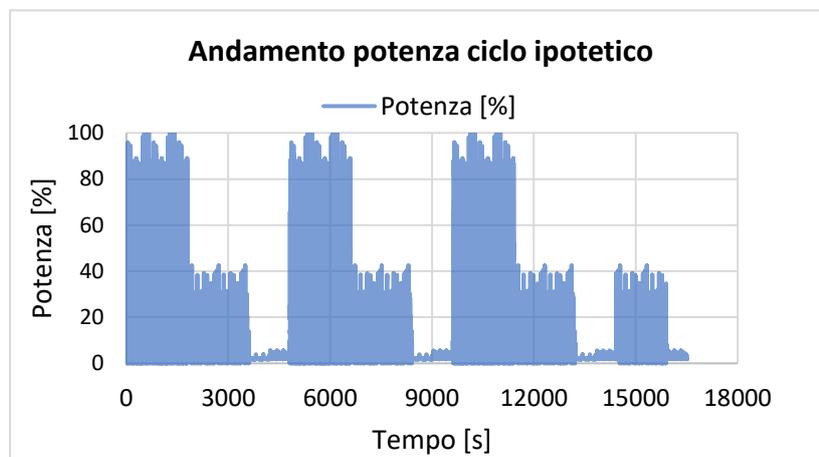


Figura 5.4 Andamento della potenza nel tempo del ciclo ipotizzato

Tale ciclo ha una durata di 4,5 ore e la quantità totale di lavoro è pari a 74 kWh, sufficiente a coprire 6 volte il lavoro del ciclo NRTC.

### 5.3 Tipo di dati da campionare e collegamento con la centralina

Durante i test di 'In-service monitoring' vengono misurate le concentrazioni allo scarico in [ppm] dei seguenti inquinanti: anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), monossido di carbonio (CO), idrocarburi totali (HC) e ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>). [7]

Nella tabella n. 4 vengono mostrati quali dati vengono registrati durante la prova e la rispettiva fonte. In particolare, le concentrazioni di HC, CO, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> devono essere misurate o corrette su base umida.

La portata di gas di scarico viene misurata grazie ad un misuratore di portata, a tubo di Pitot, collegato con il tubo di scappamento.

Parametri	Unità di misura	Fonte
Concentrazione di HC <sup>(1)</sup>	ppm	Analizzatore
Concentrazione di CO <sup>(1)</sup>	ppm	Analizzatore
Concentrazione di NO <sub>x</sub> <sup>(1)</sup>	ppm	Analizzatore
Concentrazione di CO <sub>2</sub> <sup>(1)</sup>	ppm	Analizzatore
Portata dei gas di scarico	kg/h	EFM
Temperatura dei gas di scarico	K	EFM o ECU o Sensore
Temperatura ambiente	K	Sensore
Pressione ambiente	kPa	Sensore
Umidità relativa	%	Sensore
Coppia motore	Nm	ECU o Sensore
Numero di giri motore	rpm	ECU o Sensore
Portata di combustibile	g/s	ECU o Sensore
Temperatura del fluido refrigerante	K	ECU o Sensore
Temperatura aria aspirata dal motore	K	ECU or Sensore
Latitudine della macchina	gradi	GPS (optional)
Longitudine della macchina	gradi	GPS (optional)

*Note:*  
<sup>(1)</sup> Misurate o corrette su base umida

Tabella 5.3 Dati acquisiti durante test 'In service monitoring' [7]

Per rilevare la posizione, la temperatura, l'umidità dell'aria e la pressione atmosferica sono stati utilizzati un GPS e un sensore esterni al PEMS.

I dati della centralina motore (ECU) sono stati acquisiti direttamente dal PEMS utilizzando un collegamento tramite CAN (protocollo SAE J1939).

## 5.4 Motore installato sul veicolo

In tabella 5.4 vengono mostrate alcune informazioni del motore utilizzato per i test.

<b>Motore KOHLER KDI 3404 TCR-SCR</b>	
Cilindri	4
Alesaggio (mm)	96
Corsa (mm)	116
Cilindrata (cm <sup>3</sup> )	3359
Tipo d'iniezione	Diretta
Sistema d'iniezione	Common rail (2000 bar)
Conformità normativa emissioni	US TIER 4 Final / EU STAGE IV
Aftertreatment	DOC + SCR

Tabella 5.4 Specifiche tecniche del motore KDI 3404 TCR-SCR montato sul veicolo

Il sistema di postrattamento dei gas di scarico utilizza un catalizzatore ossidante (DOC) e il sistema SCR per la riduzione delle emissioni di NO<sub>x</sub>.

## 6 Elaborazione dei dati

### 6.1 Allineamento

I dati che vengono registrati possono essere divisi in 3 categorie principali [8]:

1. Categoria 1: concentrazioni di THC, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> misurate dagli analizzatori;
2. Categoria 2: temperatura e portata in massa dei gas di scarico rilevate dal misuratore di portata;
3. Categoria 3: dati della centralina motore (coppia e numero di giri motore, portata di carburante, velocità del veicolo etc.).

Dal momento che i dati provengono sostanzialmente da 3 fonti diverse (PEMS, ECU, EFM) occorre verificare che questi siano allineati temporalmente. Per poter fare ciò il software cerca la massima correlazione tra ciascuna coppia di dati, in un intervallo di +/- 30 s, calcolando il coefficiente di Pearson con l'equazione 6.1:

$$\text{Correl}(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 * \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Equazione 6.1 Coefficiente di correlazione di Pearson

Dove:

- X e Y sono le due serie di dati;
- n è la lunghezza del campione di dati;
- $x_i$  e  $y_i$  sono i punti di campionamento i-esimi;
- $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$  è la media per il campione X;
- $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$  è la media per il campione Y.

La procedura di allineamento dei dati eseguita dal software avviene in 4 step allineando rispettivamente:

1. velocità rilevata dal GPS e dalla ECU (se presenti entrambe): l'attuale proposta per la futura normativa prevede di acquisire la velocità in uno dei due modi ma non obbligatoriamente entrambe. Per tali test la velocità è stata rilevata solo con il GPS.
2. ECU e GAS PEMS, attraverso i dati di coppia del motore [Nm] e concentrazione percentuale di CO<sub>2</sub> allo scarico;
3. GAS PEMS e EFM tramite la concentrazione percentuale di CO<sub>2</sub> e la portata in volume dei gas di scarico [m<sup>3</sup>/s];
4. EFM e ECU utilizzando la portata in volume dei gas e la portata di combustibile [g/s].

In figura n. 6.1 si mostra l'ultima fase dell'allineamento per uno dei test.

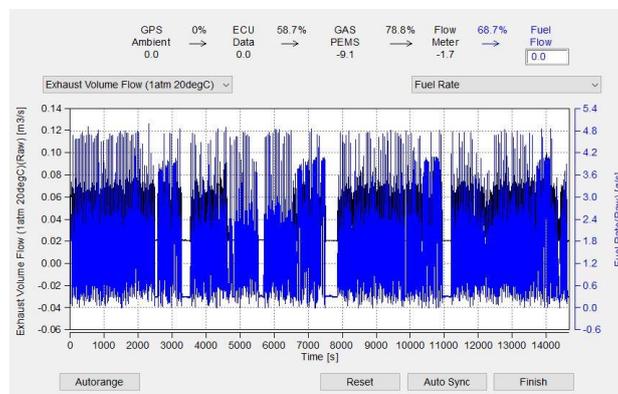


Figura 6.1 Esempio di allineamento dei dati - EFM e ECU

## 6.2 Selezione degli eventi validi del ciclo

Dopo che i dati sono stati allineati è possibile passare alla valutazione degli eventi validi per il successivo calcolo delle finestre mobili. Infatti, per evitare che le emissioni specifiche nelle fasi di minimo possano falsare il risultato del test, viene fornito un criterio per poterle escludere, dividendo il ciclo in "eventi lavorativi e non lavorativi". [8] In particolare, per fare ciò, vengono definite 4 durate:

1. D<sub>0</sub> definisce la durata minima dell'evento lavorativo;
2. I primi D<sub>1</sub> minuti di tutti gli eventi non lavorativi sono validi;
3. D<sub>2</sub> serve per definire gli eventi lavorativi brevi (<D<sub>2</sub>) o lunghi (>D<sub>2</sub>);
4. D<sub>3</sub> è il tempo massimo che può essere escluso dopo una fase di minimo.

In tabella n. 6.1 si mostrano le durate:

Parametro	Durata
D <sub>0</sub>	2 minuti
D <sub>1</sub>	2 minuti
D <sub>2</sub>	10 minuti
D <sub>3</sub>	4 minuti

Tabella 6.1 Durate per il calcolo degli eventi validi

### 6.3 Calcolo del fattore di conformità

Per eseguire tale calcolo viene utilizzata il metodo della finestra mobile (MAW) che prevede di calcolare la media delle emissioni all'interno di ciascuna finestra. La lunghezza della finestra dipende dalla quantità di riferimento [8]:

- Lavoro: in questo caso la finestra ha una lunghezza tale da raggiungere, nell'intervallo considerato, il lavoro del ciclo omologativo NRTC del 'parent engine';
- Massa di CO<sub>2</sub>: in questo caso l'ampiezza della finestra è calcolata per raggiungere la quantità di CO<sub>2</sub> totale emessa nel ciclo NRTC.

La prima finestra parte dall'inizio del test<sup>2</sup> e la sua lunghezza cresce finché non viene raggiunta la quantità di riferimento (lavoro o CO<sub>2</sub>), successivamente la finestra avanza di 1 secondo e la sua lunghezza viene ricalcolata fino a raggiungere nuovamente la quantità di lavoro di riferimento. Questo procedimento continua fino a che l'ultima finestra arriva alla fine del ciclo. Quindi ci sarà un certo numero di finestre, ciascuna con la propria lunghezza e per ognuna viene calcolato il fattore di conformità (CF<sub>Window</sub>).

In figura 6.2 è mostrato un esempio del procedimento appena descritto. Sull'asse delle ordinate è indicata la quantità di riferimento, in questo caso il lavoro. La linea blu rappresenta la cumulata del lavoro in funzione del tempo. Si può notare che nell'intervallo di ciascuna finestra la quantità di lavoro è pari a quella di riferimento  $W_{ref}$  mentre la loro durata è diversa. La finestra n-esima parte da un tempo pari a  $n*\Delta t$  in quanto, come detto prima, la finestra si sposta con step pari a  $\Delta t$ .

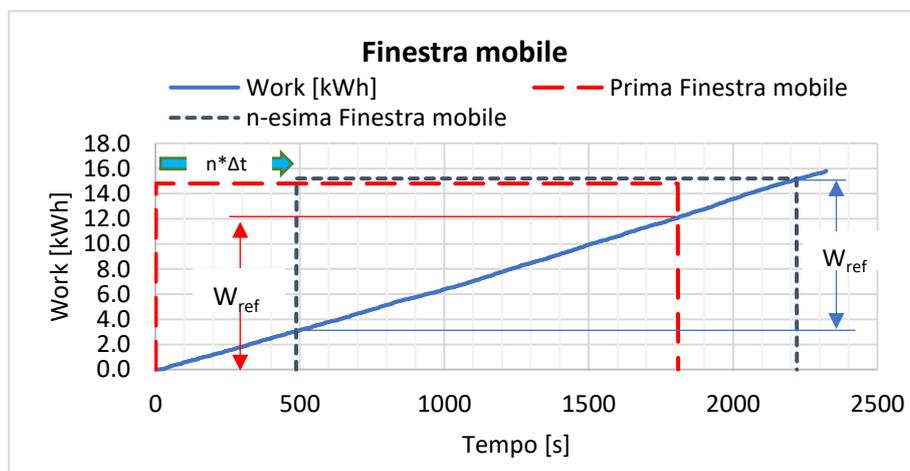


Figura 6.2 Illustrazione del calcolo della finestra mobile

#### ➤ Metodo basato sul lavoro

La durata dell'i-esima finestra è calcolata in modo che sia verificata l'equazione 6.2:

$$W(t_{2,i} - \Delta t) - W(t_{1,i}) < W_{ref} \leq W(t_{2,i}) - W(t_{1,i})$$

Equazione 6.2 Limiti per il lavoro accumulato all'interno della finestra

<sup>2</sup> Nota: a livello di calcolo in realtà avviene l'esatto opposto. La prima finestra parte dalla fine del ciclo e si sposta a ritroso, con step di 1 secondo, verso l'inizio.

Dove:

- $W(t_{j,i})$  è il lavoro motore misurato tra l'istante,  $t_{1,i}$ , in cui inizia la finestra e quello in cui termina  $t_{2,i}$  [kWh];
- $W_{ref}$  è il lavoro del ciclo NRTC [kWh];
- $\Delta t$  è l'intervallo di campionamento [s] (in questo caso 1s).

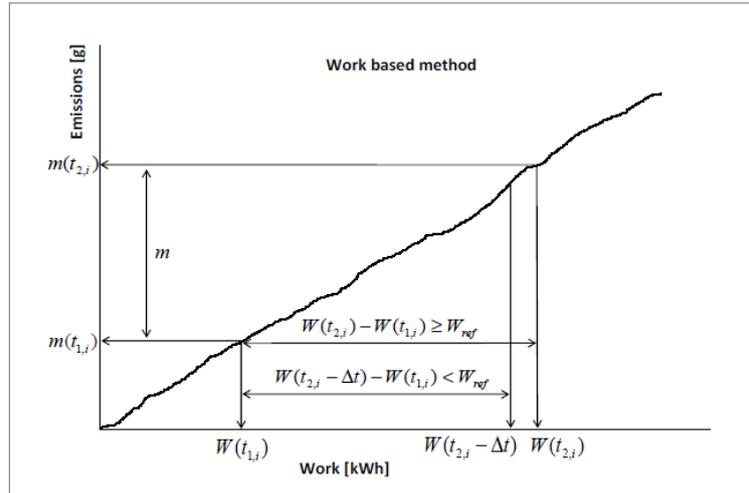


Figura 6.3 Durata finestra mobile - metodo basato sul lavoro

Se si utilizza il metodo basato sul lavoro, il CF di ogni finestra si ottiene dall'equazione 6.3:

$$CF_{Window} = \frac{e_{gas}}{L}$$

Equazione 6.3 Conformity Factor della finestra mobile – metodo basato sul lavoro

con:

$$e_{gas} = \frac{m}{W_{ref}}$$

Equazione 6.4 Quantità specifica di inquinante nella finestra mobile

dove:

- $e_{gas}$  è l'emissione specifica di inquinante [g/kWh];
- $L$  è il limite per l'inquinante definito dalla normativa [g/kWh];
- $m$  è la quantità di inquinante emessa nella finestra [g/window];
- $W_{ref}$  è il lavoro del ciclo NRTC [kWh];

Sono considerate valide le finestre in cui la potenza media è maggiore del 20% della massima potenza del motore.

➤ Metodo basato sulla massa di CO<sub>2</sub>

Analogamente al metodo basato sul lavoro la durata dell'i-esima finestra deve essere tale da soddisfare l'equazione 6.5:

$$m_{CO_2}(t_{2,i} - \Delta t) - m_{CO_2}(t_{1,i}) < m_{CO_2,ref} \leq m_{CO_2}(t_{2,i}) - m_{CO_2}(t_{1,i})$$

Equazione 6.5 Limiti per la massa di CO<sub>2</sub> all'interno di una finestra

Ciò equivale a dire che la durata della finestra dev'essere calcolata in modo tale che contenga una quantità di CO<sub>2</sub> che rimanga nell'intorno della massa di CO<sub>2</sub> di riferimento,  $m_{CO_2,ref}$ .

In figura 6.4 si mostra che per il calcolo delle emissioni specifiche di inquinante occorre considerare la massa dello stesso, emessa all'interno di ciascuna finestra.

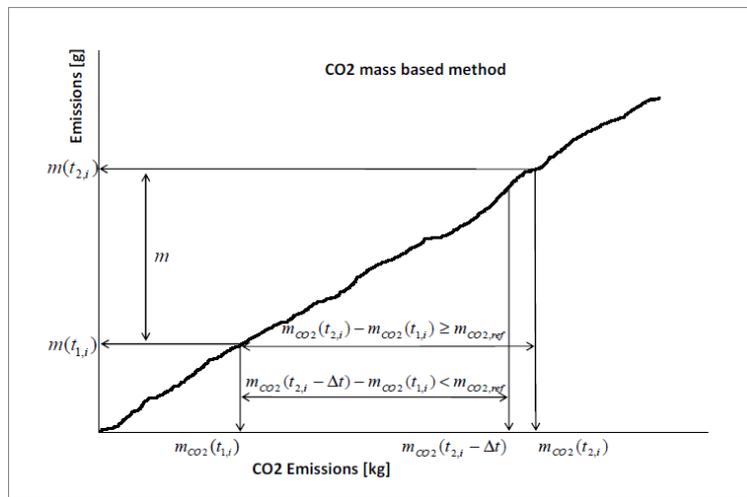


Figura 6.4 Durata finestra mobile - metodo basato sulla massa di CO<sub>2</sub>

Tale metodo prevede di calcolare il conformity factor, per ogni finestra, tramite l'equazione 6.6:

$$CF_{Window} = \frac{CF_I}{CF_C}$$

Equazione 6.6 Conformity Factor della finestra mobile – metodo basato sulla massa di CO<sub>2</sub>

Con  $CF_I = \frac{m}{m_{CO_2,ref}}$  (rapporto in servizio) e  $CF_C = \frac{m_L}{m_{CO_2,ref}}$  (rapporto di certificazione)

Dove:

- $m$  è la massa di inquinante emessa in ogni finestra [g/window];
- $m_{CO_2,ref}$  è la quantità di CO<sub>2</sub> emessa nel ciclo NRTC o calcolata come:
- $m_{CO_2,ref} = 3,172 * BSFC * W_{ref}$
- $m_L = L * W_{ref}$  è l'emissione in massa del componente corrispondente al limite, espresso in grammi, applicabile sul ciclo NRTC [g].

Per tale metodo le finestre sono considerate valide se la loro durata è inferiore alla soglia  $D_{max}$ , ossia se si riesce a raggiungere la quantità di riferimento  $m_{CO2,ref}$  entro un tempo  $D_{max}$  calcolato con l'equazione 6.7:

$$D_{max} = 3600 * \frac{W_{ref}}{0,2 * P_{max}}$$

*Equazione 6.7 Durata massima ammissibile per la finestra mobile - metodo basato sulla massa di CO2*

Dove:

- $D_{max}$  è la durata massima ammissibile per la finestra [s];
- $P_{max}$  è la potenza massima del motore [kW].

La massa di inquinante  $m$  emessa nella finestra viene calcolata integrando le emissioni istantanee in quell'intervallo di tempo.

Per entrambe i metodi il 'conformity factor' dell'inquinante è il 90° percentile dei  $CF_{Window}$  calcolati per ogni singola finestra. Quindi è quel valore per il quale il 90% dei valori di  $CF_{Window}$  sono al di sotto di esso.

## 7 PEMS n°1

In questo capitolo si parlerà dei test RDE eseguiti con il PEMS n°1. Il ciclo fatto dalla macchina è simile a quello precedentemente esposto nel capitolo 5.2. Per limitare il tempo della prova si è deciso di ridurre le fasi con il motore al minimo dando maggior importanza all'attività di carico e scarico della ghiaia (Re-Handling).

Appena prima di iniziare il test e subito dopo viene fatta la taratura della strumentazione. Quella eseguita alla fine del test serve per poter correggere la deriva (drift) dello zero e dello span.

In tabella n. 7.1 vengono mostrate le concentrazioni e i gas utilizzati per tarare lo zero e lo span.

Componente	Gas Span	Concentrazione	Gas Zero
HC	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (Propano)	30 ppm (equivalenti a 90 ppmC)	Aria ambiente
NO	NO	2800 ppm	
NO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	900 ppm	N <sub>2</sub>
CO	CO	4,5 M%	
CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	16,2 M%	

Tabella 7.1 Concentrazioni dei gas di span e zero

### 7.1 Taratura da 75 kW

In figura 7.1 viene mostrata la velocità del veicolo durante il test e la durata delle diverse fasi. Gli intervalli con velocità maggiore di 8 km/h circa corrispondono alla fase di Roding, quelli con velocità inferiore alla fase di Re-Handling e quelli con velocità nulla alla fase di idle.

In tabella n. 7.2 si mostra la corrispondenza tra il numero di fase indicata nel grafico n. 7.1 e l'attività svolta.

Fase	Attività
0	Motore spento
1	Idle (macchina ferma con motore al minimo)
2	Re-Handling (movimentazione della ghiaia con la benna).
3	Roding (veicolo che segue un percorso senza portare materiale)

Tabella 7.2 Attività eseguita dalla macchina

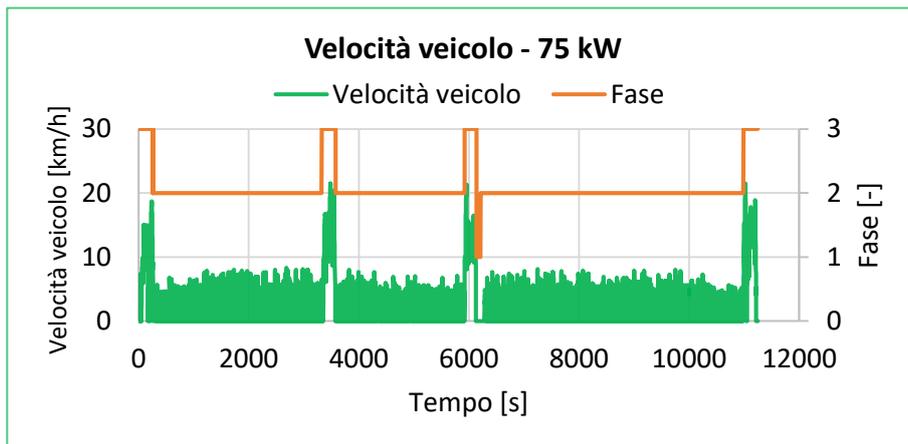


Figura 7.1 Velocità del veicolo durante il test - 75kW

In figura n. 7.2 è raffigurata la percentuale di potenza del motore (blu) nel test eseguito con il PEMS n°1. La linea rossa rappresenta invece gli intervalli di tempo validi per il calcolo delle finestre mobili. Si può vedere che i primi 108 s del ciclo vengono esclusi poiché il motore era freddo. La partenza a freddo verrà trattata in modo dettagliato più avanti.

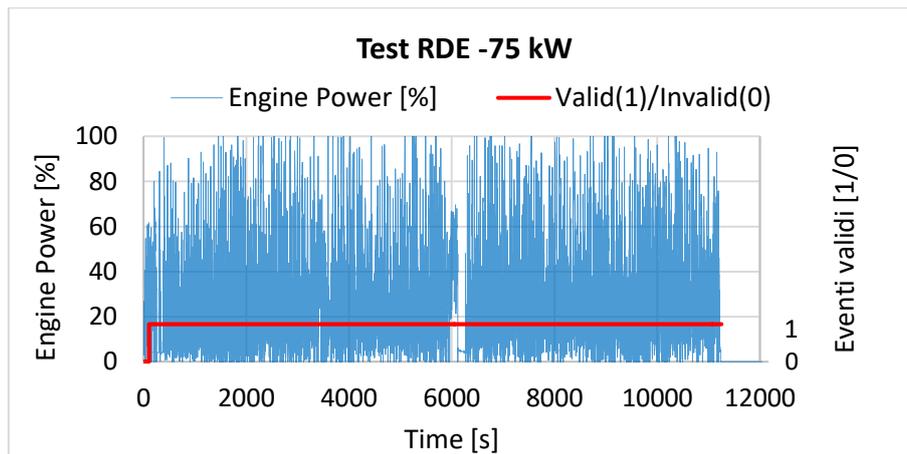


Figura 7.2 Potenza del motore in funzione del tempo nel test RDE ed eventi validi - Taratura 75 kW (PEMS n°1)

In figura n. 7.3 si mostra il valore percentuale di potenza media (linea verde) all'interno di ciascuna finestra, calcolata utilizzando il metodo del lavoro. La potenza media rimane sempre al di sopra della soglia (linea rossa tratteggiata) quindi tutte le finestre calcolate sono valide.

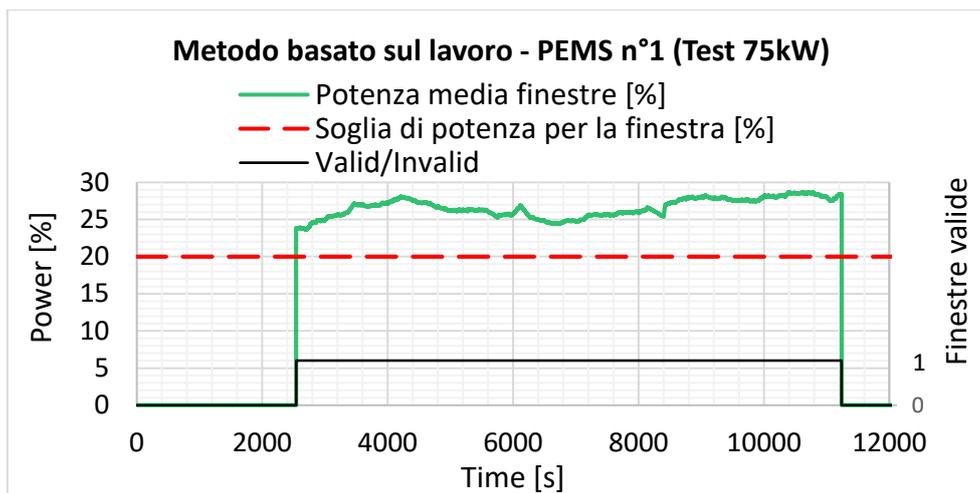


Figura 7.3 Potenza media nelle finestre calcolate con il metodo basato sul lavoro e finestre valide – Taratura 75 kW (PEMS n°1)

Nella tabella n. 7.1 si possono vedere alcuni dati del test e del calcolo delle finestre mobili.

Metodo basato sul lavoro – PEMS n°1 (Test 75 kW)		
Ciclo di lavoro	Unità di misura	
Durata totale test	s	11133
Lavoro totale ciclo	kWh	60,90
<b>Finestre mobili</b>		
Quantità di riferimento		Lavoro
Valore quantità di riferimento	kWh	12,07
Soglia di potenza	%	20,00
$\frac{Lavoro_{test\_RDE}}{Lavoro_{ciclo\_NRTC}}$	[5 - 7]	5
Potenza minima nelle finestre	%	23,60
Potenza massima nelle finestre	%	28,70
Numero totale di finestre	-	8698
Numero di finestre valide	-	8698
Percentuale di finestre valide	%	100

Tabella 7.3 Dati delle finestre mobili - Metodo basato sul lavoro (PEMS n°1, taratura 75 kW)

In figura n. 7.3 si mostra la durata temporale di ogni finestra (linea verde) e la relativa soglia (linea rossa tratteggiata). La durata di tutte le finestre è inferiore alla soglia quindi tutte le finestre sono valide per il calcolo.

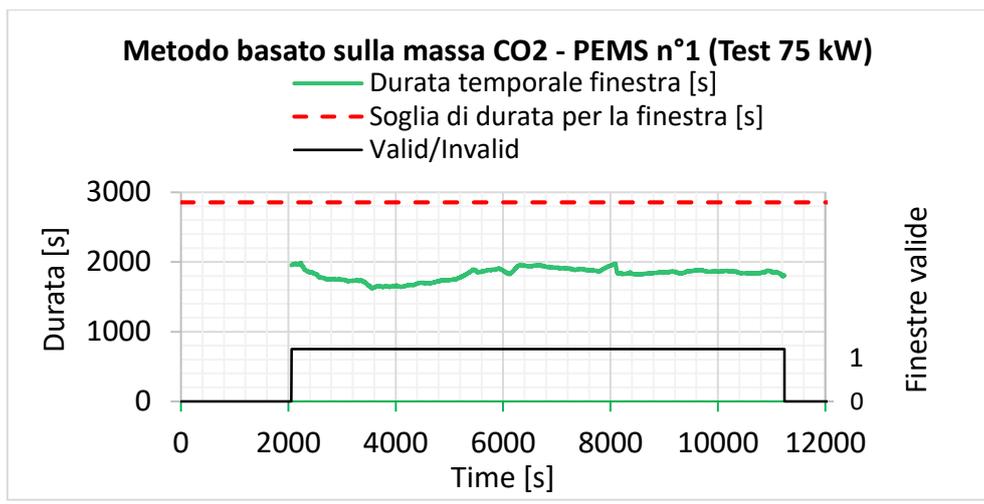


Figura 7.4 Durata delle finestre calcolate con il metodo basato sulla massa di CO<sub>2</sub> e finestre valide - PEMS n°1 (Taratura 75 kW)

Nella tabella n. 7.4 sono riassunti i valori relativi al calcolo effettuato con il metodo basato sulla massa di CO<sub>2</sub>.

<b>Metodo basato sulla massa di CO<sub>2</sub> – PEMS n°1 (Test 75 kW)</b>		
<b>Ciclo di lavoro</b>	<b>Unità di misura</b>	
Durata totale test	s	11133
Massa CO <sub>2</sub> totale ciclo	kg	57,03
<b>Finestre mobili</b>		
Quantità di riferimento		CO <sub>2</sub>
Massa CO <sub>2</sub> di riferimento	kg	9,41
Soglia di durata	s	2856
$\frac{Massa\ CO_2_{test\_RDE}}{Massa\ CO_2_{ciclo\ NRTC}}$	[5 - 7]	6,06
Durata massima finestre	s	1988
Durata minima finestre	s	1619
Numero totale di finestre	-	9182
Numero di finestre valide	-	9182
Percentuale di finestre valide	%	100

Tabella 7.4 Dati delle finestre mobili - Metodo basato sulla massa di CO<sub>2</sub> - PEMS n°1 (Taratura 75 kW)

In tabella n. 7.5 sono riassunti i valori del fattore di conformità calcolati con i due metodi.

Taratura 75 kW – PEMS n° 1	Software di calcolo: EMROAD©	
	Metodo basato sul <i>lavoro</i>	Metodo basato sulla <i>massa di CO2</i>
Conformity factor NOx	5,03 <sup>(1)</sup>	5,58 <sup>(2)</sup>
Conformity factor CO	0,00 <sup>(3)</sup>	0,00 <sup>(4)</sup>
Conformity factor THC	0,05 <sup>(5)</sup>	0,05 <sup>(6)</sup>

(1) Limite NOx utilizzato per il calcolo= 0,4 g/kWh

(2) Limite NOx utilizzato per il calcolo= 3,78 g

(3) Limite CO utilizzato per il calcolo = 5 g/kWh

(4) Limite CO utilizzato per il calcolo = 47,25 g

(5) Limite THC utilizzato per il calcolo = 0,19 g/kWh

(6) Limite THC utilizzato per il calcolo = 1,80 g

Tabella 7.5 Valori di conformity factor - PEMS n° 1 (75 kW)

### 7.1.1 Confronto tra il ciclo reale e omologativo

In figura n. 7.5 sono stati rappresentati, nel diagramma coppia-numero di giri, i punti in cui il motore lavora durante il ciclo reale. La curva di pieno carico (linea rossa) definisce il limite massimo della coppia erogabile dal motore. La zona con maggiore densità di punti, quella cioè dove il motore si trova a lavorare maggiormente, è quella ad alto numero di giri con carico intermedio. In figura 7.5 a sono rappresentati i punti di lavoro del motore neo test omologativo NRTC. Si può notare come in quest'ultimo ci sia una zona poco esplorata ad alto numeri di giri e coppia bassa. Mentre, nel test RDE, il motore si trova a lavorare maggiormente proprio in tale zona.

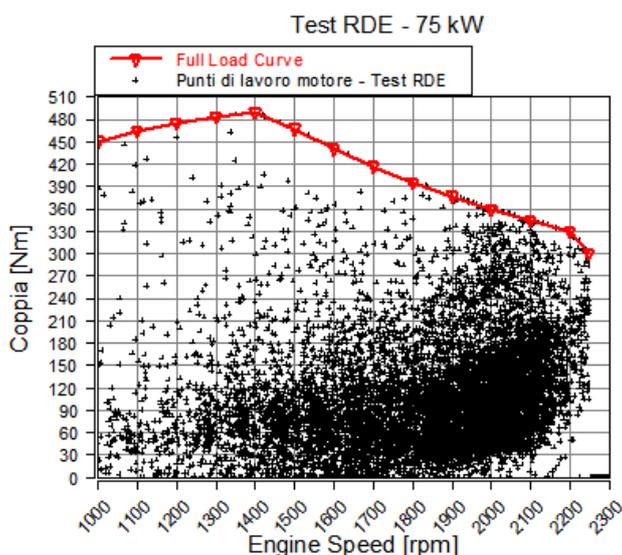


Figura 7.5 Punti di lavoro motore - Test RDE (PEMS n° 1 - taratura 75 kW)

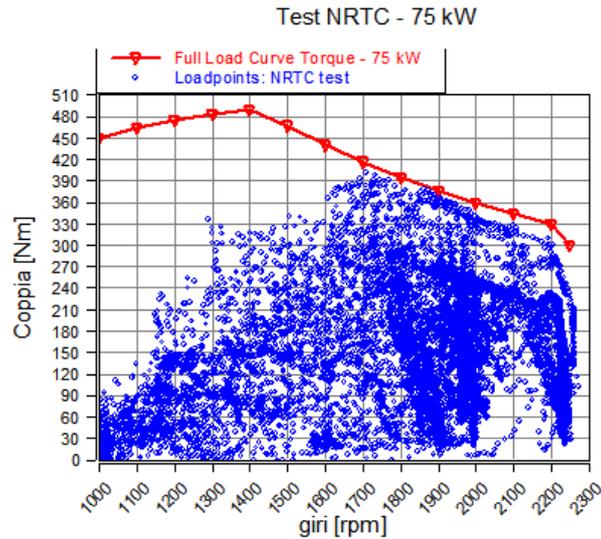


Figura 7.5 a Punti di lavoro motore - ciclo NRTC (taratura 75 kW)

Nelle figure n. 7.6 e n. 7.7 viene mostrata la portata di emissioni di  $\text{NO}_x$  [g/h] per il test reale e il test NRTC rispettivamente. Si ricorda che sebbene la colorazione del grafico sia continua i punti dove si conoscono i valori di emissioni sono solo quelli dove effettivamente è avvenuto il campionamento (punti neri). Inoltre, nella lettura di tali grafici occorre tenere in considerazione la diversa precisione della strumentazione PEMS rispetto al banco analisi.

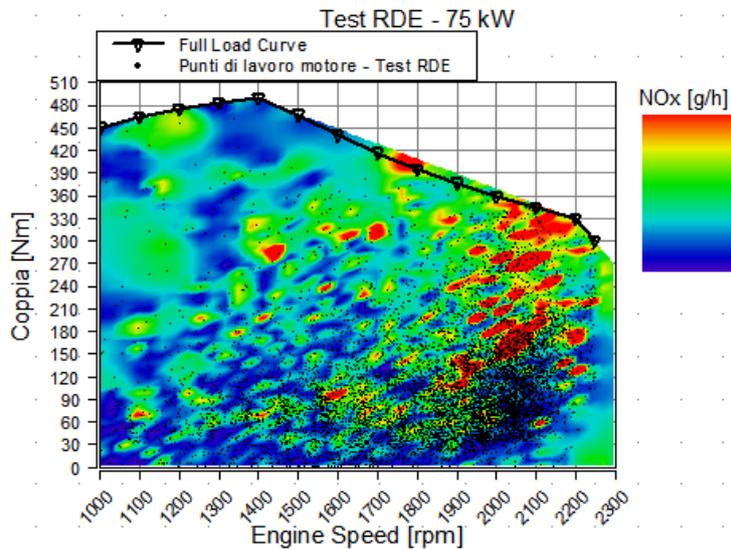


Figura 7.6 Livelli di emissione  $\text{NO}_x$  [g/h] - test RDE (PEMS n°1 - taratura 75 kW)

Si può notare che il livello di emissioni del ciclo reale sia mediamente più alto rispetto al ciclo NRTC. Nel grafico relativo a quest'ultimo (figura n. 7.7) infatti prevale il colore blu corrispondente al livello di emissioni più basso nella scala utilizzata. Nel ciclo reale i maggiori livelli di emissioni (zone rosse) vengono raggiunti nella zona tra i 1900 rpm e il regime massimo, per valori di coppia medio-alti.

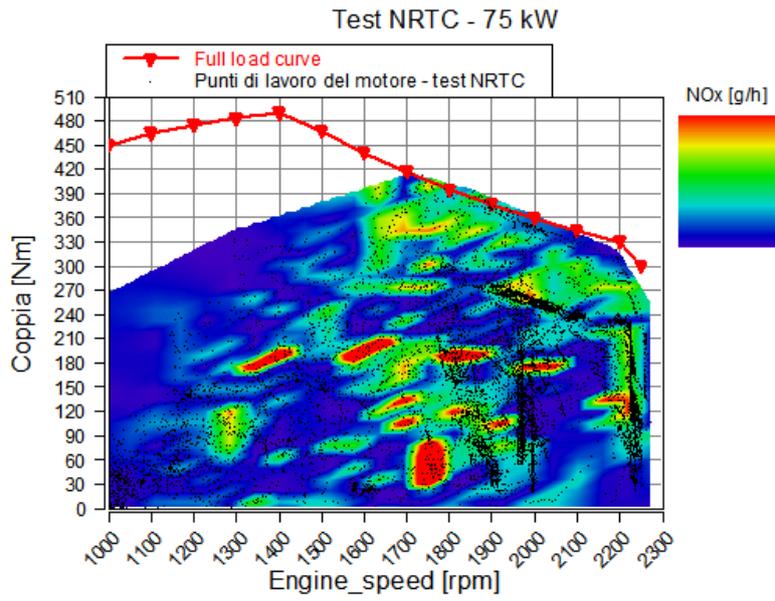


Figura 7.7 Livelli di emissione NOx [g/h] - test NRTC a caldo (PEMS n°1 - taratura 75 kW)

Nelle figure n. 7.8 e n. 7.9 sono rappresentate le emissioni specifiche di NO<sub>x</sub> [g/kWh].

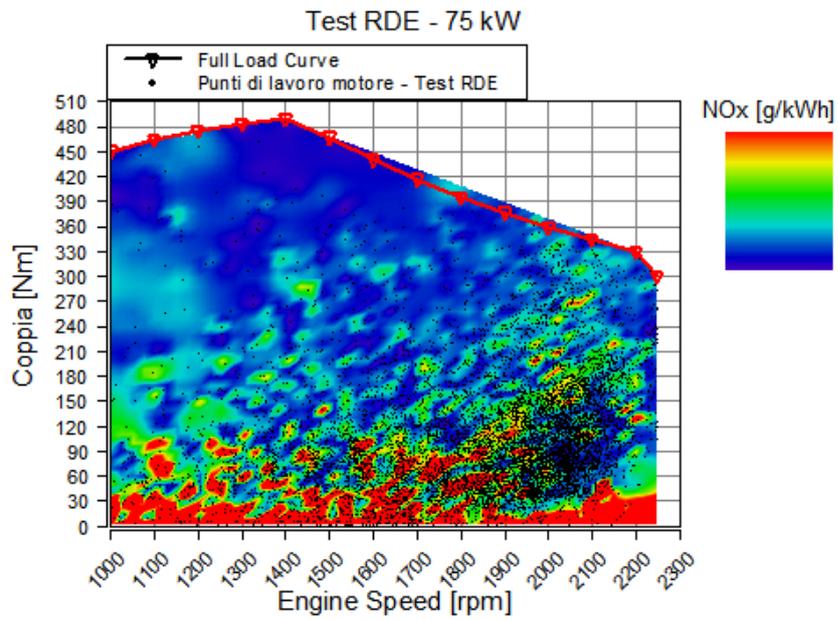


Figura 7.8 Emissioni specifiche NOx [g/kWh] - Test RDE (PEMS n°1 - taratura 75 kW)

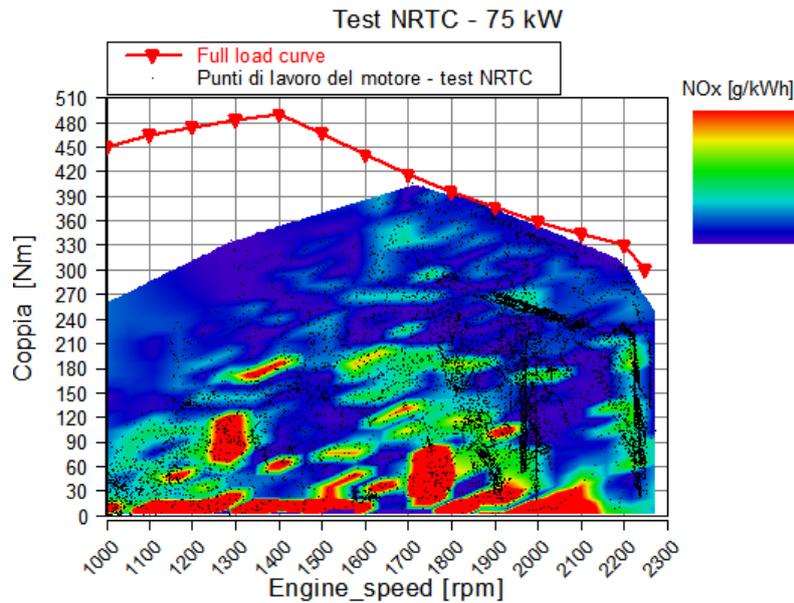


Figura 7.9 Emissioni specifiche NOx [g/kWh] - Test NRTC a caldo (PEMS n° 1 - taratura 75 kW)

Per poter meglio individuare le differenze tra il test RDE e il ciclo NRTC è stata calcolata la percentuale di potenza erogata dal motore rispetto alla potenza massima con l'equazione n. 7.1.

$$P_{engine} = \frac{P_{ist\_engine}}{P_{max\_engine}}$$

Equazione 7.1 Percentuale di potenza erogata dal motore

Dove:

- $P_{engine}$  è la percentuale di potenza erogata dal motore [%];
- $P_{ist\_engine}$  è la potenza istantanea erogata dal motore [kW];
- $P_{max\_engine}$  è la potenza massima del motore [kW].

Successivamente la potenza è stata suddivisa in 5 fasce, dalla minima (0-20%) alla massima (80-100%), quindi è stata calcolata la percentuale di tempo che il motore spende in ciascuna fascia così come la percentuale in massa delle emissioni (equazione 7.2).

$$m_{perc_{i-k}} = \frac{m_{fascia_{i-k}}}{m_{test}}$$

Equazione 7.2 Percentuale in massa di inquinante emessa nella fascia di potenza i-k

Dove:

- $m_{perc}$  è la percentuale di massa emessa nel range di potenza i-k [%];
- $m_{fascia_{i-k}}$  è la massa emessa nel range di potenza i-k [g];
- $m_{test}$  è la massa totale emessa nel test [g].

Nella figura n. 7.10 viene rappresentata la percentuale di massa, sul totale, delle emissioni in ogni fascia di potenza e la percentuale di tempo trascorsa dal motore in ciascuna di esse per il test RDE. Per

poter fare un confronto con il ciclo NRTC si può vedere il grafico analogo in figura n. 7.11. Per il grafico di figure n. 7.10 è stata esclusa la partenza a freddo quindi non sono state conteggiate le emissioni fino a che il fluido refrigerante non ha raggiunto la temperatura di 70° C.

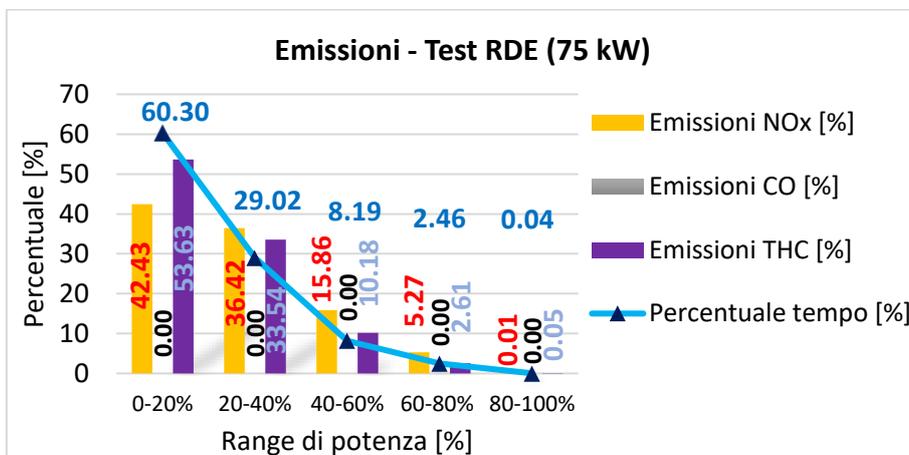


Figura 7.10 Percentuale di tempo e massa di inquinanti per fasce di potenza erogata dal motore – Test RDE: esclusione della partenza a freddo (PEMS n° 1 - 75 kW)

Nell’osservare tali dati è utile ricordare che per il ciclo NRTC le misurazioni sono state fatte in cella motore (condizione che permette un’elevata precisione e ripetibilità delle misure), diversamente dal ciclo RDE per il quale è stato utilizzato il PEMS. Si può vedere che nel ciclo NRTC la quantità di tempo che il motore passa nella fascia di potenza 0-40% è pari al 57% circa mentre nel range 60-80% è di circa il 20% contro solo il 3% del test RDE potenza. Nella fascia di potenza più elevata (60-80%) viene spesa circa la stessa percentuale di tempo per entrambe i test.

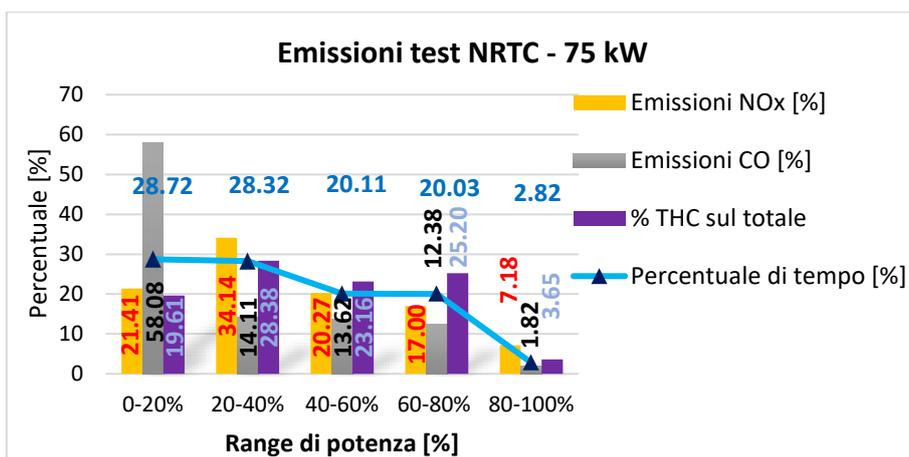


Figura 7.11 Percentuale di tempo e massa di NOx per fasce di potenza erogata dal motore – Test NRTC a caldo (75 kW)

I limiti normativi sulle emissioni di inquinanti riguardano le quantità specifiche degli stessi misurate in g/kWh. In figura n. 6.12 vengono rappresentati la percentuale di lavoro (linea rossa) che il motore accumula in ogni fascia di potenza e la quantità specifica di emissioni (barre) calcolate con l’equazione n. 7.3.

$$BS_{pollutant} = \frac{m_{fascia_{i-k}}}{W_{fascia_{i-k}}}$$

Equazione 7.3 Emissioni specifiche di inquinante nella fascia di potenza i-k

Dove:

- $BS_{pollutant}$  è l'emissione specifica di inquinante [g/kWh];
- $m_{fascia_{i-k}}$  è la massa di inquinante emessa nella fascia di potenza i-k [g];
- $W_{fascia_{i-k}}$  è il lavoro totale fatto dal motore nella fascia i-k [kWh].

In figura n. 7.12 vengono rappresentate le emissioni specifiche suddivise per fasce di potenza. Si nota che nella fascia più bassa i valori di emissioni sono più alti per tutti gli inquinanti; in questa zona infatti il lavoro prodotto dal motore è molto basso, pertanto le emissioni specifiche tendono a crescere. Questo è il motivo per il quale nell'analisi del conformity factor nono vengono considerati gli intervalli nei quali la potenza è inferiore al 10%; così facendo infatti si evita che il valore del CF sia falsato da questo effetto. Si può vedere che le emissioni specifiche di THC e CO siano molto inferiori a quelle di NO<sub>x</sub>.

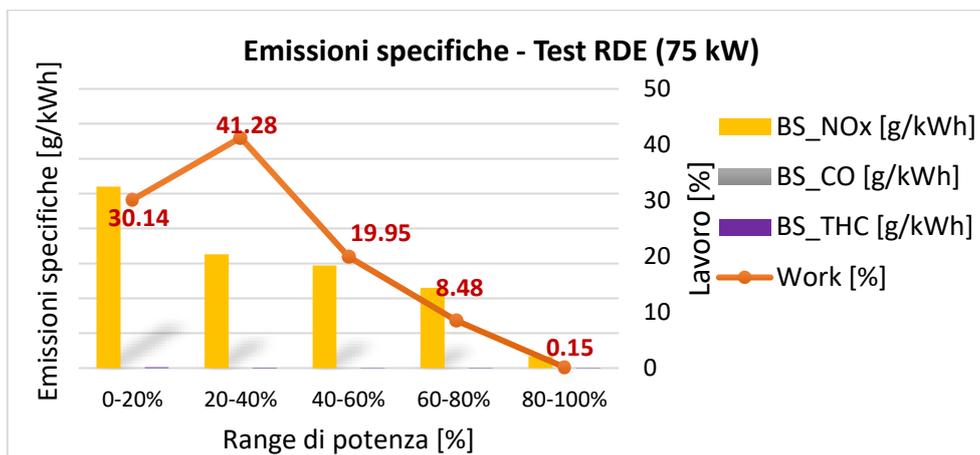


Figura 7.12 Percentuale di lavoro e valori delle emissioni specifiche medie per fasce di potenza erogata dal motore – Test RDE: esclusione della partenza a freddo (PEMS n° 1 - 75 kW)

Nella figura n. 7.13 si mostra il grafico relativo alle emissioni specifiche nel ciclo NRTC. Per permettere un confronto è stata utilizzata la stessa scala di figura n. 7.12. Si nota che le emissioni specifiche di NO<sub>x</sub> nel ciclo reale sono molto maggiori di quelle misurate nel ciclo NRTC per fasce di potenza 0-80% mentre nella fascia 80-100% le emissioni nel ciclo reale risultano, seppur di poco, inferiori a quelle del ciclo NRTC. Nel ciclo reale non sono state rilevate emissioni di CO poiché, come si vedrà nel paragrafo 7.5 che tratta la partenza a freddo, la maggior parte di esse avviene proprio durante tale fase mentre in questo caso il motore aveva già raggiunto una certa temperatura. Le emissioni specifiche di THC nel ciclo reale risultano essere inferiori a quelle del ciclo NRTC in tutte le fasce di potenza. Quindi queste rientrano pienamente nei limiti anche nel ciclo reale.

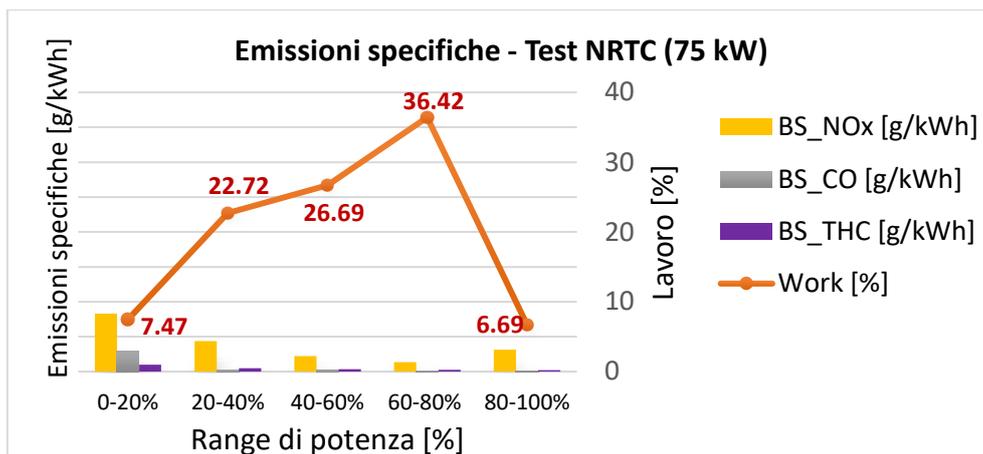


Figura 7.13 Percentuale di lavoro e valori delle emissioni specifiche medie per fasce di potenza erogata dal motore – Test NRTC a caldo (75 kW)

## 7.2 Taratura da 100 kW

In figura n. 7.14 si mostra la velocità del veicolo durante il test eseguito con la taratura da 100 kW. Relativamente al numero di fase le attività sono quelle indicate in tabella n. 7.2. Qui si vedono principalmente la fase 3 di Roothing e la fase 2 di Re-Handling.

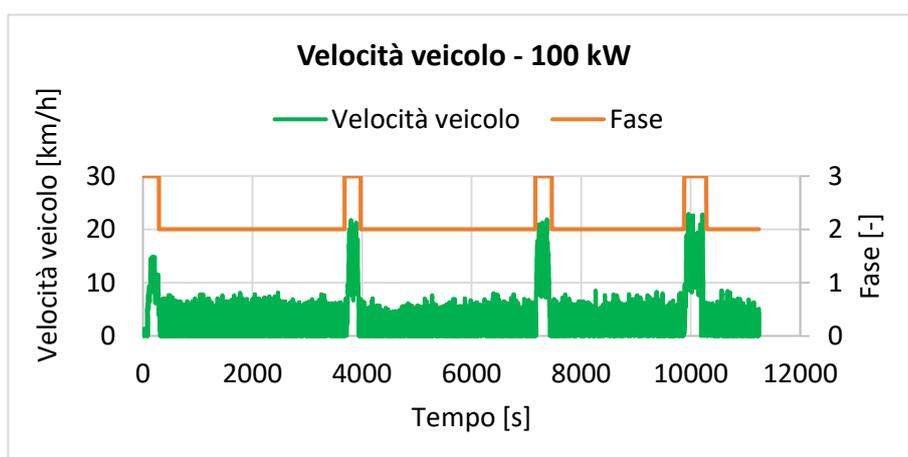


Figura 7.14 Velocità del veicolo durante il test - 100kW

In figura n. 7.15 è rappresentata la potenza percentuale del motore (blu) e gli eventi validi per il calcolo della finestra mobile (linea rossa). Come per la taratura da 75 kW si vede che tutto il ciclo è valido tranne i primi 380 s circa, relativi alla partenza a freddo.

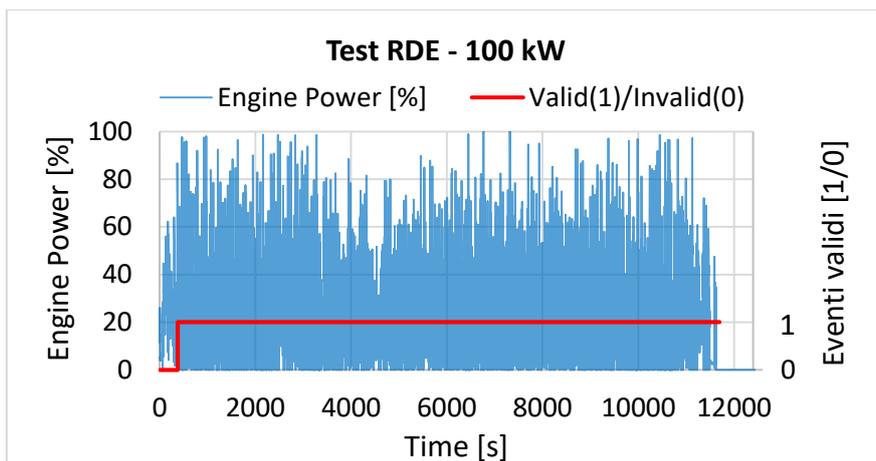


Figura 7.15 Potenza del motore in funzione del tempo nel test RDE ed eventi validi - Taratura 100 kW (PEMS n°1)

In figura n. 7.16 è rappresentata la potenza media nelle finestre. Si può vedere che tutte le finestre calcolate sono valide.

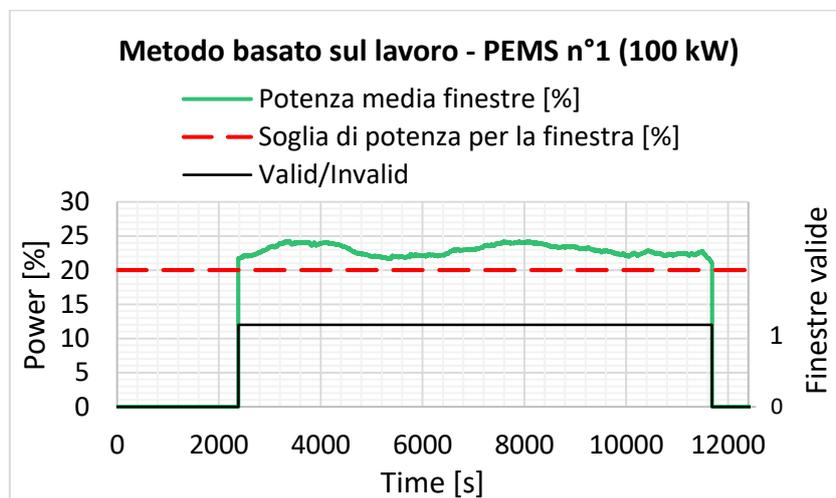


Figura 7.16 Potenza media nelle finestre calcolate con il metodo basato sul lavoro e finestre valide – Taratura 100 kW (PEMS n°1)

Nella tabella n. 8.4 sono presentati i dati relativi al test e alla post-elaborazione dei dati.

<b>Metodo basato sul lavoro – PEMS n°1 (Test 100 kW)</b>		
<b>Ciclo di lavoro</b>	<b>Unità di misura</b>	
Durata totale test	s	11686
Lavoro totale ciclo	kWh	70,77
<b>Finestre mobili</b>		
Quantità di riferimento		Lavoro
Valore quantità di riferimento	kWh	12,07
Soglia di potenza	%	20

$Lavoro_{test\_RDE}$	[5 - 7]	5,86
$Lavoro_{ciclo\_NRTC}$		
Potenza minima nelle finestre	%	21,04
Potenza massima nelle finestre	%	24,26
Numero totale di finestre	-	9305
Numero di finestre valide	-	9305
Percentuale di finestre valide	%	100

Tabella 7.6 Dati delle finestre mobili - Metodo basato sul lavoro (Taratura 100 kW)

In figura n. 7.17 è rappresentata la durata temporale (linea verde) delle finestre calcolate con il metodo della CO<sub>2</sub> e la soglia di durata (linea rossa tratteggiata) che serve per discriminare le finestre valide. In particolare, si vede che la durata temporale di tutte le finestre è sotto la soglia quindi sono tutte valide per il successivo calcolo del fattore di conformità.

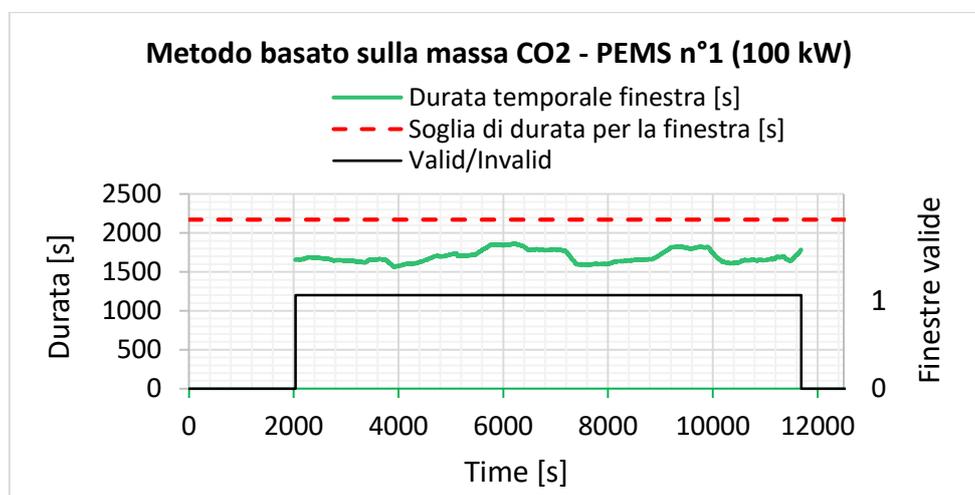


Figura 7.17 Durata delle finestre calcolate con il metodo basato sulla massa di CO<sub>2</sub> e finestre valide - Taratura 100 kW

Nella tabella n. 7.7 è possibile trovare i risultati ottenuti utilizzando il metodo di calcolo basato sulla massa di CO<sub>2</sub>.

Metodo basato sulla massa di CO <sub>2</sub> – PEMS n°1 (Test 100 kW)		
Ciclo di lavoro	Unità di misura	
Durata totale test	s	11686
Massa CO <sub>2</sub> totale ciclo	kg	62,04
<b>Finestre mobili</b>		
Quantità di riferimento		CO <sub>2</sub>
Massa CO <sub>2</sub> di riferimento	kg	9,41
Soglia di durata	s	2172
$Massa\ CO_2_{test\_RDE}$	[5 - 7]	6,59
$Massa\ CO_2_{ciclo\_NRTC}$		

Durata massima finestre	s	1868
Durata minima finestre	s	1562
Numero totale di finestre	-	9654
Numero di finestre valide	-	9654
Percentuale di finestre valide	%	100

Tabella 7.7 Dati delle finestre mobili - Metodo basato sul lavoro (PEMS n°1, taratura 100kW)

In tabella n. 7.8 si possono vedere i valori di conformità calcolati per la taratura da 100 kW.

Taratura 100 kW – PEMS n°1	Software di calcolo: EMROAD©	
	Metodo basato sul <i>lavoro</i>	Metodo basato sulla <i>massa di CO2</i>
Conformity factor NOx	3,71 <sup>(7)</sup>	4,04 <sup>(8)</sup>
Conformity factor CO	0,00 <sup>(9)</sup>	0,00 <sup>(10)</sup>
Conformity factor THC	0,04 <sup>(11)</sup>	0,04 <sup>(12)</sup>

<sup>(7)</sup> Limite NOx utilizzato per il calcolo= 0,4 g/kWh

<sup>(8)</sup> Limite NOx utilizzato per il calcolo= 4,83 g

<sup>(9)</sup> Limite CO utilizzato per il calcolo = 5 g/kWh

<sup>(10)</sup> Limite CO utilizzato per il calcolo = 60,34 g

<sup>(11)</sup> Limite THC utilizzato per il calcolo = 0,19 g/kWh

<sup>(12)</sup> Limite THC utilizzato per il calcolo = 2,29 g

Tabella 7.8 Valori di conformity factor - PEMS n°1 (100 kW)

### 7.2.1 Confronto tra il ciclo reale e omologativo

In modo analogo a prima si mostrano i punti di lavoro del motore durante il ciclo RDE per la taratura da 100 kW. Si ritrova una situazione molto simile alla taratura da 75 kW. Tuttavia, essendo aumentata la potenza massima del motore, il carico percentuale diminuisce. Infatti, nella zona di maggior densità dei punti (figura n. 7.18) la potenza erogata dal motore è inferiore al 40% di quella massima (zona tra 2000 rpm e 2200 rpm e tra 30 Nm e 180 Nm). La curva di pieno carico (linea rossa) viene raggiunta solo di rado così come tutta la zona al di sopra dei 270 Nm di coppia. In figura n. 7.18 a è possibile vedere i punti di lavoro motore, per la taratura da 100kW, nel test NRTC. Analogamente alla taratura da 75 kW si nota una grande differenza tra i due cicli tra i 2000 rpm e 2200 rpm e coppie medio basse.

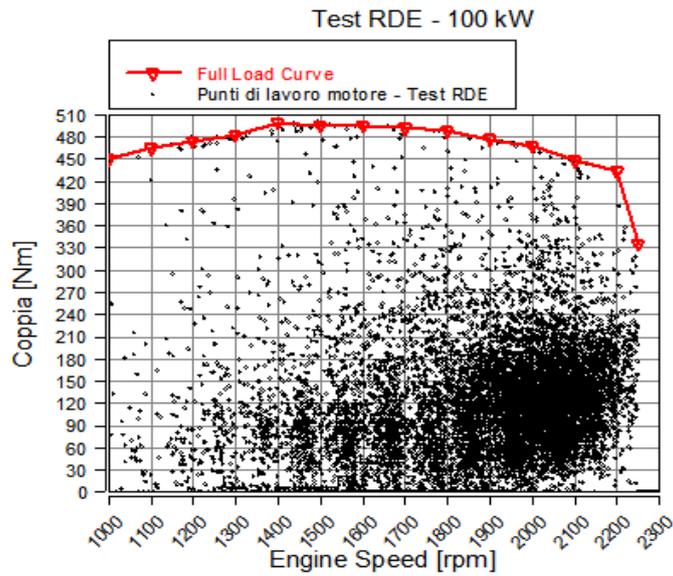


Figura 7.18 Punti di lavoro motore - Test RDE (PEMS n° 1 - taratura 100 kW)

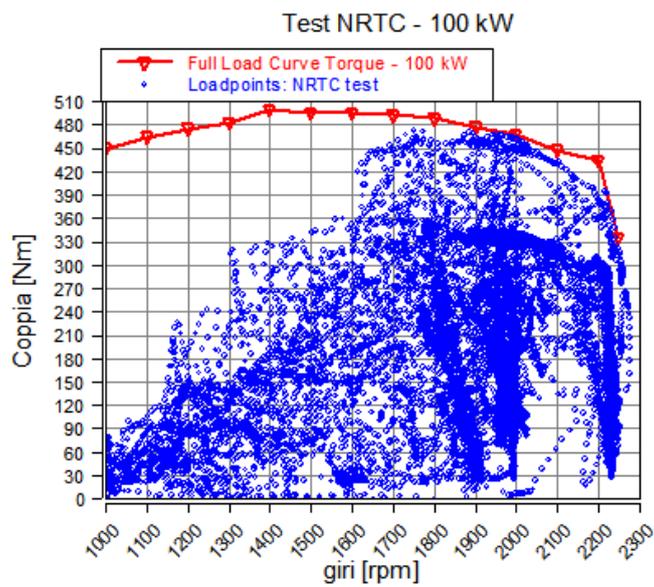


Figura 7.18 a Punti di lavoro motore - ciclo NRTC (taratura 100 kW)

Il grafico di figura n. 7.19 permette di vedere come si distribuisce la portata di NO<sub>x</sub> emessi [g/h] in funzione della coppia e giri del motore durante il ciclo RDE. La zona dove si ha il valore più alto di portata di NO<sub>x</sub> corrisponde a quella dove il motore si trova maggiormente a lavorare come si evince dalla densità dei punti di lavoro motore nella zona rossa.

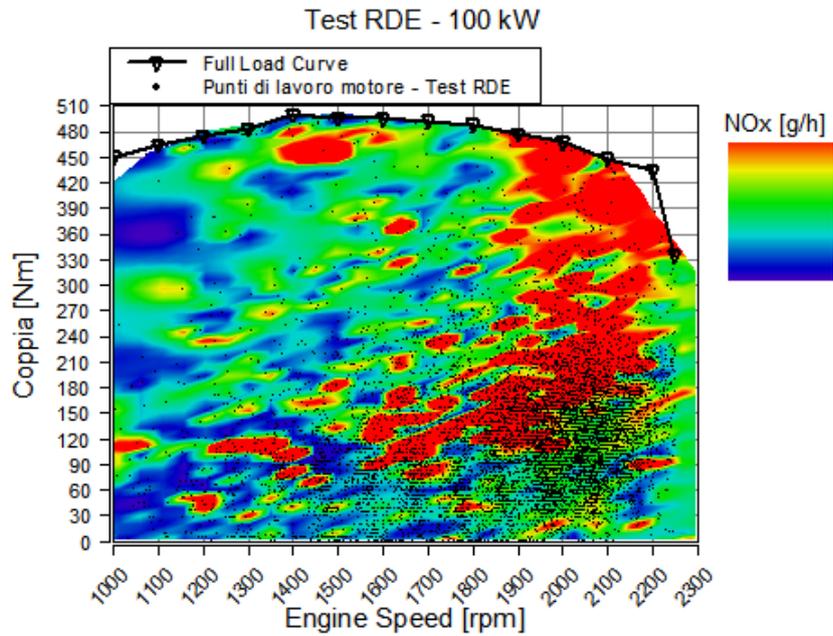


Figura 7.19 Livelli di emissione NOx [g/h] - test RDE (PEMS n°1 - taratura 100 kW)

È interessante confrontare i risultati del ciclo reale con quelli del ciclo omologativo NRTC, eseguito con la stessa taratura, presenti in figura n. 7.20. Si nota come la portata in [g/h] dell'inquinante in questione sia molto diversa nei due casi. Nel test NRTC prevale la colorazione blu corrispondente ad un flusso di inquinante medio basso (rispetto alla scala utilizzata). Al contrario nel test RDE di figura n. 7.19 a prevalere è la colorazione verde rossa corrispondente a valori medio alti e solo in poche zone si rilevano valori bassi.

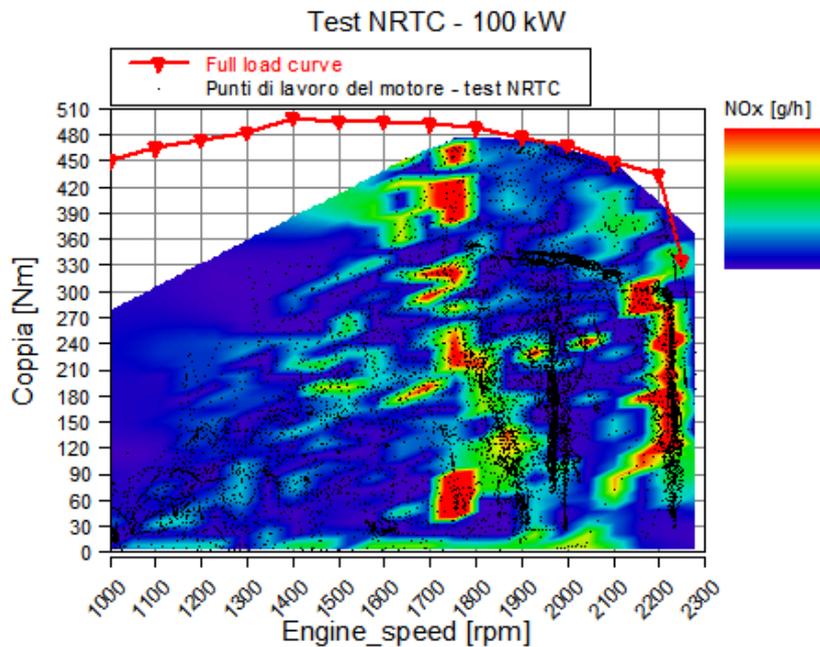


Figura 7.20 Livelli di emissione NOx [g/h] - test NRTC a caldo (PEMS n°1 - taratura 100 kW)

Nelle figure n. 7.21 e n. 7.22 si rappresentano le emissioni specifiche di NO<sub>x</sub> [g/kWh] relative ai test RDE e NRTC rispettivamente per la taratura da 100 kW. In entrambe i diagrammi la parte “bassa” (al di sotto dei 30 Nm circa), dove la potenza erogata dal motore è bassa, il livello specifico di emissioni di NO<sub>x</sub> è molto alto. Questo perché le emissioni specifiche si calcolano come rapporto tra la massa di inquinante emessa dal motore in un certo intervallo temporale e il lavoro svolto dal motore nello stesso intervallo; quando il motore è al minimo, quindi potenza erogata e lavoro sono pari a zero, l’emissione specifica di inquinanti tenderebbe a infinito. Motivo per il quale, come detto prima, nel calcolo del fattore di conformità vengono escluse le porzioni di ciclo dove il motore rimane per troppo tempo al di sotto del 10% della potenza massima.

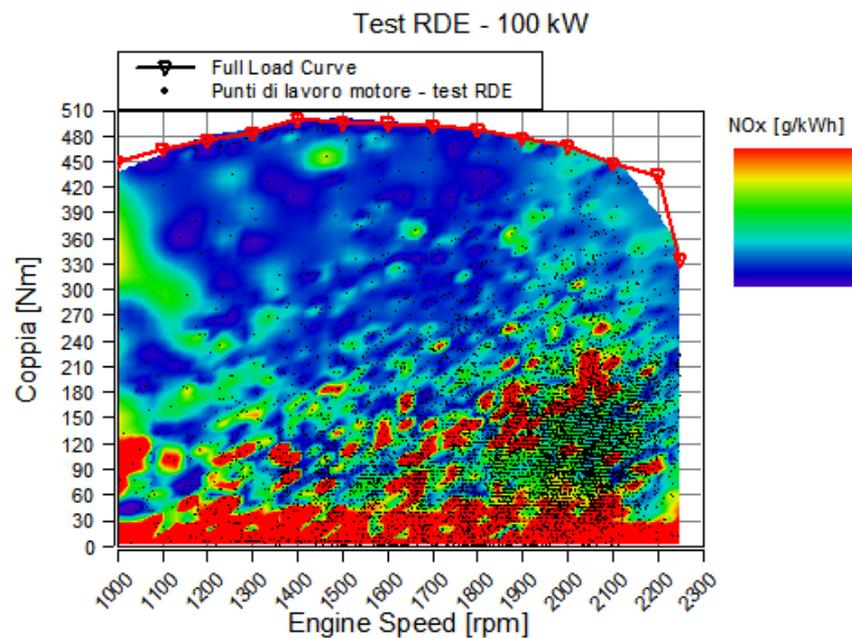


Figura 7.21 Emissioni specifiche NO<sub>x</sub> [g/kWh] - Test RDE (PEMS n°1 - taratura 100 kW)

La colorazione del diagramma in figura n. 7.22 per il test NRTC con taratura da 100 kW è molto simile al corrispondente con taratura da 75 kW in figura n. 7.9. Si può notare come nell’area di lavoro l’emissione specifica sia prevalentemente bassa (colore blu), relativamente alla scala in uso, e solo in poche zone si raggiungono livelli medi (zone verdi). Invece nel ciclo RDE di figura n. 7.21 i valori di emissioni risultano essere più alti del ciclo NRTC come si può vedere da una maggior distribuzione delle aree verdi (valore intermedio) e rosse (valore alto).

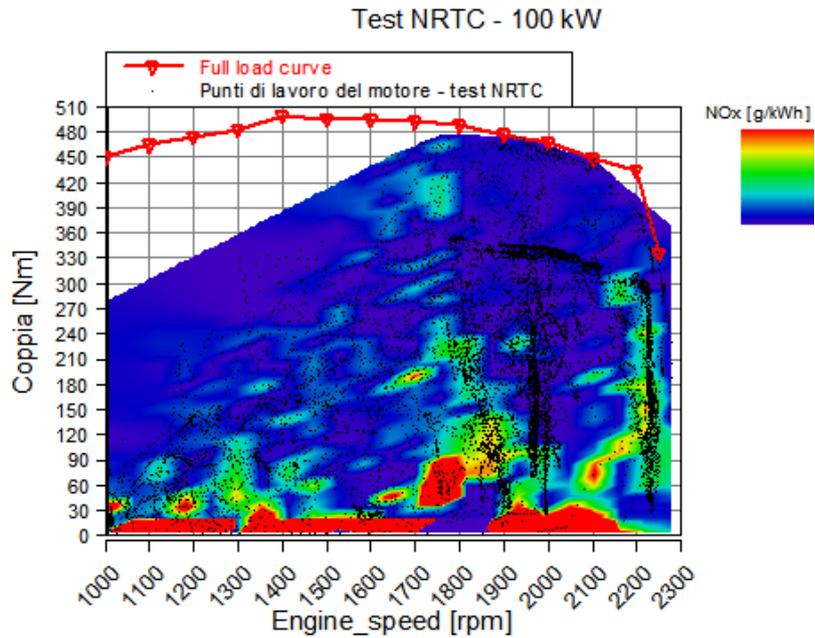


Figura 7.22 Emissioni specifiche NOx [g/kWh] - Test NRTC a caldo (PEMS n°1 - taratura 100 kW)

In figura n. 7.23 si riassume il calcolo del tempo trascorso dal motore in ogni fascia di potenza e il contributo che l'emissione di ciascun inquinante, in ogni fascia, ha sul totale nel ciclo reale, per la taratura da 100 kW. Per tale valutazione sono state escluse, come per la taratura da 75 kW, le emissioni relative alla partenza a freddo.

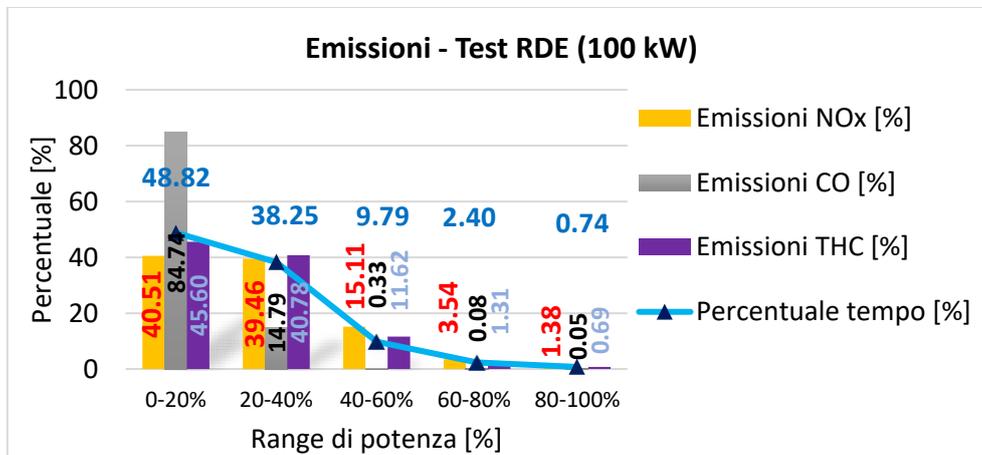


Figura 7.23 Percentuale di tempo e massa di inquinanti per fasce di potenza erogata dal motore – Test RDE: esclusione della partenza a freddo (PEMS n°1 - 100 kW)

In figura n. 7.24 è rappresentata la percentuale di lavoro fatta dal motore e la media delle emissioni specifiche di inquinanti in ciascuna fascia di potenza. Il 49% circa del lavoro totale viene fatto nella fascia di potenza tra il 20% e 40% di quella massima, una quantità pari a circa il 20% nelle fasce 0-20% e 40-60% e solo poco più del 10% nelle fasce di potenza superiore al 60%.

La scala utilizzata per le emissioni specifiche è la stessa della taratura da 75 kW è quindi possibile confrontare, almeno visivamente, le due situazioni. Si può vedere come le emissioni di CO e THC

rimangano, anche in questo caso, molto basse. Nella fascia di potenza 0-80% le emissioni specifiche di NO<sub>x</sub> per la taratura da 100 kW sono inferiori rispetto a quelle della 75 kW, vale invece il contrario se si guardano le fasce 0-20% e 80-100%.

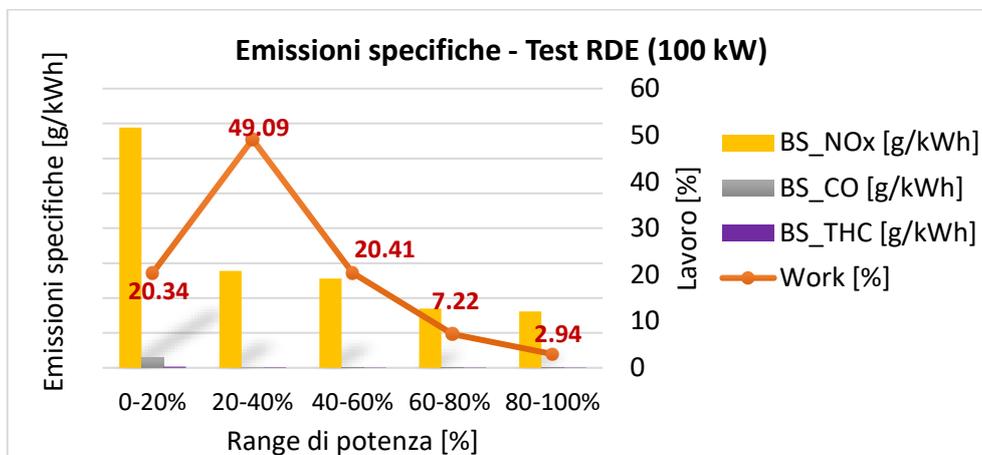


Figura 7.24 Percentuale di lavoro e valori delle emissioni specifiche medie per fasce di potenza erogata dal motore – Test RDE: esclusione della partenza a freddo (PEMS n°1 - 100 kW)

Anche per il grafico relativo al ciclo NRTC mostrato in figura n. 7.25 è stata utilizzata la stessa scala. Appare che le emissioni specifiche di THC e CO del ciclo reale siano leggermente superiori rispetto a quello omologativo rispettando comunque i limiti normativi relativi alla normativa Stage V. Si nota invece una differenza più marcata delle emissioni di NO<sub>x</sub>.

Un rapido confronto tra il ciclo NRTC con taratura da 75 kW e 100 kW (Figure 7.12 e n. 7.25) fa vedere come le emissioni specifiche di NO<sub>x</sub> siano molto simili: in entrambe i casi il valore decresce al crescere della potenza del motore per poi risalire nuovamente nella fascia di potenza più alta (80-100%).

Il test NRTC viene eseguito in cella e i valori di potenza e numero di giri vengono regolati attraverso il controllo elettronico. Tuttavia, dalle figure n. 7.12 e n. 7.25 si nota che i valori di lavoro nelle varie fasce presentano qualche differenza, ciò è dovuto al fatto che esiste sempre un certo scostamento tra la potenza che si desidera imporre al motore e quella reale.

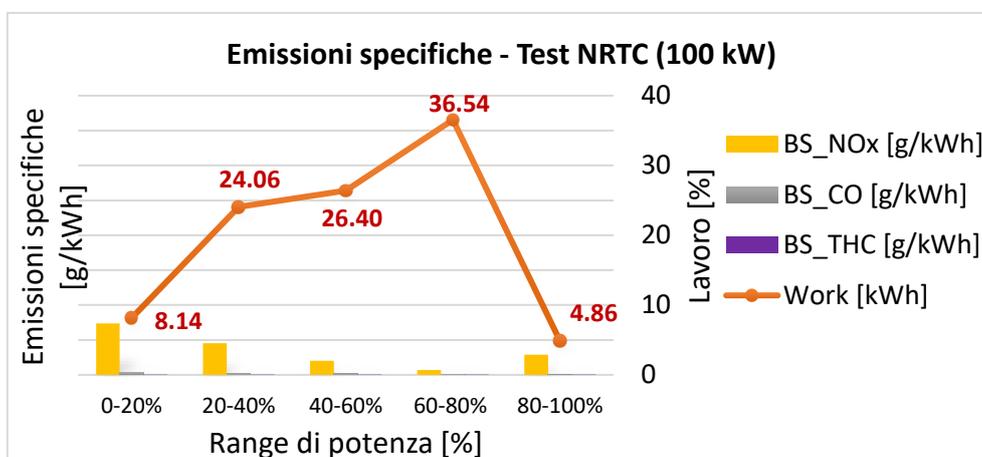


Figura 7.25 Percentuale di lavoro e valori delle emissioni specifiche medie per fasce di potenza erogata dal motore – Test NRTC a caldo (100 kW)

### 7.3 Consistenza dei dati

Per poter verificare la consistenza dei dati relativi alla portata di gas di scarico misurata dal misuratore di portata (EFM) e quelli relativi alla concentrazione di gas si confronta la portata di combustibile letta dalla ECU e quella calcolata utilizzando l'equazione n. 7.4 (equivalente all'equazione 28 del Regolamento UN/ECE n°49) [9].

$$q_{mf,i} = q_{mew,i} - q_{maw,i}$$

Equazione 7.4 Portata in massa di combustibile in funzione della portata d'aria in ingresso al motore e dei gas di scarico

Dove:

- $q_{mew,i}$  è la portata istantanea dei gas di scarico letta dall'EFM [kg/s];
- $q_{maw,i} = \frac{q_{mew,i}}{1 + \frac{A}{F_{st}} \lambda_i}$  è la massa d'aria istantanea in ingresso al motore [kg/s];

Con:

$$\frac{A}{F_{st}} = \frac{138,0 * \left(1 + \frac{a}{4} - \frac{\varepsilon}{4} + \gamma\right)}{12,011 + 1,00794 * a + 15,9994 * \varepsilon + 14,0067 * \delta + 32,065 * \gamma}$$

Equazione 7.5 Rapporto stechiometrico tra la massa di aria e di combustibile

Dove, per un combustibile con formula  $CH_\alpha O_\varepsilon N_\delta S_\gamma$ :

- $a$  è il rapporto molare tra idrogeno e carbonio (H/C);
- $\gamma$  è il rapporto molare tra zolfo e carbonio (H/S);
- $\delta$  è il rapporto molare tra azoto e carbonio (N/C);
- $\varepsilon$  è il rapporto molare tra ossigeno e carbonio (O/C).

$$\lambda_i = \frac{\left(100 - \frac{c_{COd} * 10^{-4}}{2} - c_{HCw} * 10^{-4}\right) + \left(\frac{a}{4} * \frac{1 - \frac{2 * c_{COd} * 10^{-4}}{3,5 * c_{CO2d}} - \frac{\varepsilon}{2} - \frac{\delta}{2}}{1 + \frac{c_{CO} * 10^{-4}}{3,5 * c_{CO2d}}}\right) * (c_{CO2d} + c_{COd} * 10^{-4})}{4,764 * \left(1 + \frac{a}{4} - \frac{\varepsilon}{2} + \gamma\right) * (c_{CO2d} + c_{COd} * 10^{-4} + c_{HCw} * 10^{-4})}$$

Equazione 7.6 Dosatura relativa istantanea in funzione delle caratteristiche del combustibile e delle concentrazioni di CO, CO2, HC allo scarico

Dove:

- $\frac{A}{F_{st}}$  è il rapporto stechiometrico tra la massa d'aria e di combustibile [kg/kg];
- $\lambda_i = \frac{A/F}{(A/F)_{stech}}$  è la dosatura relativa;
- $c_{CO2d}$  è la concentrazione di CO<sub>2</sub> su base secca [%];
- $c_{COd}$  è la concentrazione di CO su base secca [ppm];
- $c_{HCw}$  è la concentrazione di HC su base su base umida [ppm].

Viene poi utilizzato il metodo dei minimi quadrati per ricavare l'equazione n. 7.7 della retta che interpola la dispersione di punti.

$$y = mx + q$$

Equazione 7.7 Equazione della retta interpolatrice

Dove:

- $y$  è la portata di combustibile calcolata [g/s];
- $m$  è la pendenza della retta;
- $x$  è la portata di combustibile letta dall' ECU [g/s];
- $q$  è l'intercetta della retta di regressione.

La retta di regressione è stata calcolata prendendo in considerazione i dati nel range che va dal 15% del valore massimo di portata fino al valore massimo. I dati sono stati campionati alla frequenza di 1Hz e per poter considerare il test valido il Regolamento UN/ECE No. 49 fissa i valori in tabella n. 8.8.

Pendenza della retta di regressione, $m$	Valore raccomandato: da 0,9 a 1,1
Coefficiente di determinazione: $R^2$	Valore minimo obbligatorio: 0,90

Tabella 7.9 Valori di  $m$  e  $R^2$  per poter considerare il test RDE valido

In figura n. 7.26 vengono mostrati i valori di portata di carburante, entrambe normalizzati rispetto al valore massimo letto dalla ECU, per il test con taratura da 75 kW. L'equazione della retta di regressione e il coefficiente di determinazione sono:

$$y = 0,7364x + 0,1092 ; R^2 = 0,778$$

Equazione 7.8 Retta di regressione e coefficiente di determinazione (75 kW)

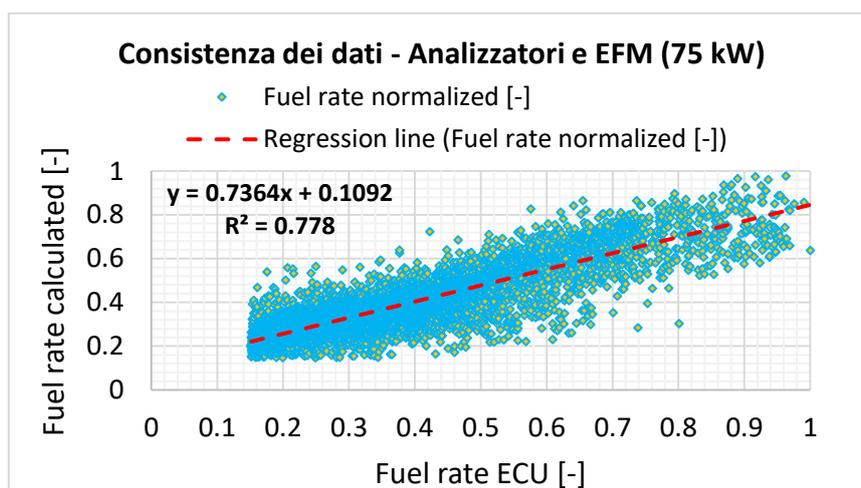


Figura 7.26 Regressione lineare per i dati di portata di combustibile – PEMS n°1 (75 kW)

In figura n. 7.27 si possono vedere i risultati relativi al test con taratura da 100 kW. L'equazione della retta di regressione e il coefficiente di determinazione sono:

$$y = 0,7243x + 0,0939; R^2 = 0,7441$$

Equazione 7.9 Retta di regressione e coefficiente di di determinazione per il test n° 9 (100 kW)

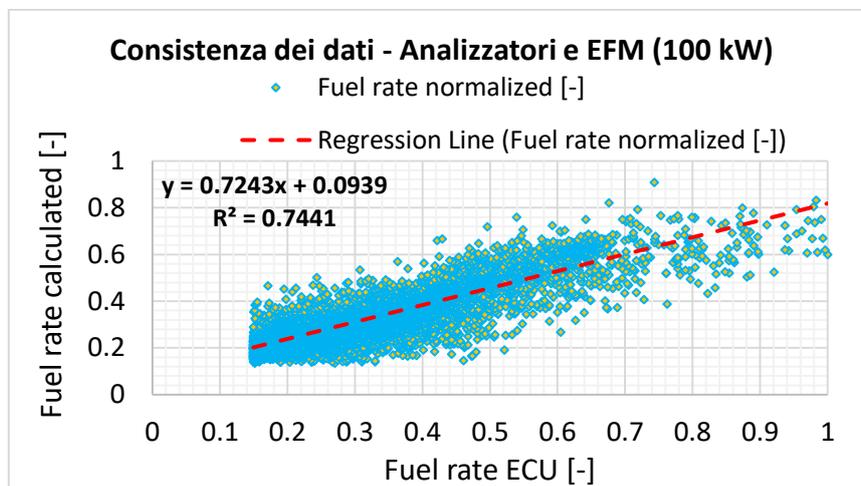


Figura 7.27 Regressione lineare per i dati di portata di combustibile – PEMS n°1 (100 kW)

Per entrambe i test si può notare una buona correlazione tra i valori di portata di carburante calcolati e quelli misurati, tuttavia il valore della pendenza della retta  $m$  e del coefficiente di regressione  $R^2$  sono in entrambe i casi inferiori ai valori per ritenere il test valido (tabella n. 7.9).

## 7.4 Precisione delle misure

### 7.4.1 Test 75 kW

Nelle figure n. 7.28 e n. 7.29 vengono mostrate le concentrazioni di NO e di NO<sub>2</sub> rispettivamente, infatti i due componenti vengono misurati separatamente. Siccome i dati sono molto fitti, per visualizzare la precisione delle misure sono stati scelti solo alcuni intervalli del ciclo (linea arancione).

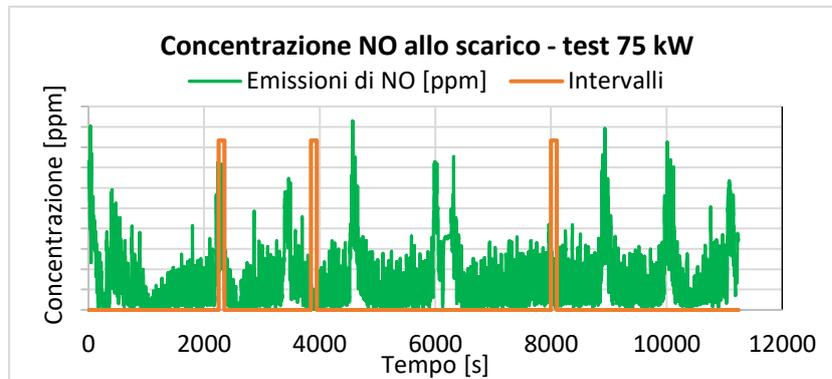


Figura 7.28 Concentrazione NO allo scarico - test RDE (75 kW)

Si può vedere come le concentrazioni di NO e NO<sub>2</sub> abbiano un andamento molto simile. Si notano alcuni punti del ciclo dove la concentrazione di emissioni ha dei picchi.

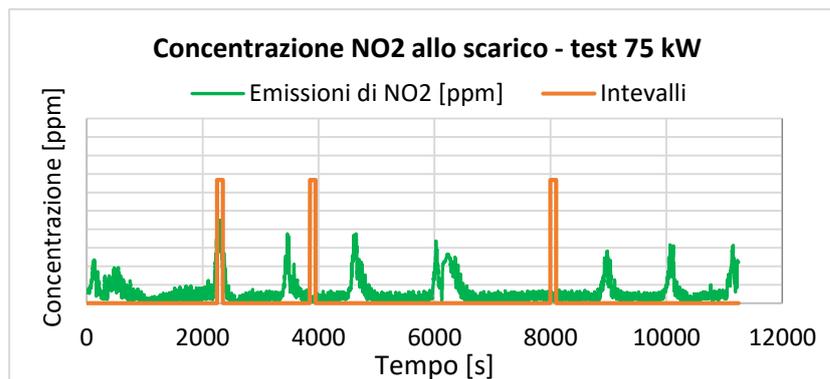


Figura 7.29 Concentrazione NO2 allo scarico - test RDE (75 kW)

Nelle figure n. 7.30, n. 7.32, n. 7.34 sono mostrate le barre di errore per l'NO e in figure n. 7.31 n. 7.33 n. 7.35 quelle per l'NO<sub>2</sub>. L'errore di misura relativamente alto soprattutto per l'NO ed è dovuto al fatto che è stata utilizzata una concentrazione di gas di span molto maggiore di quella delle emissioni da rilevare.

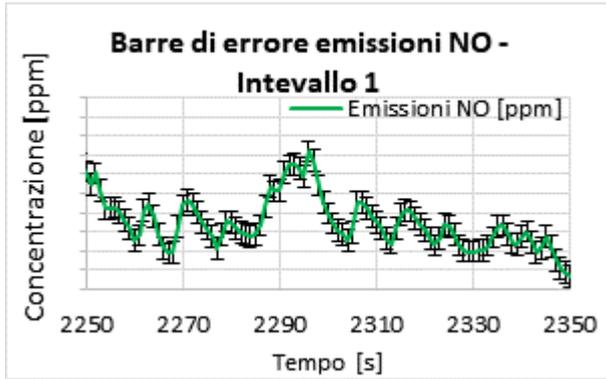


Figura 7.30 Barre di errore emissioni NO - Intervallo 1 (75 kW)

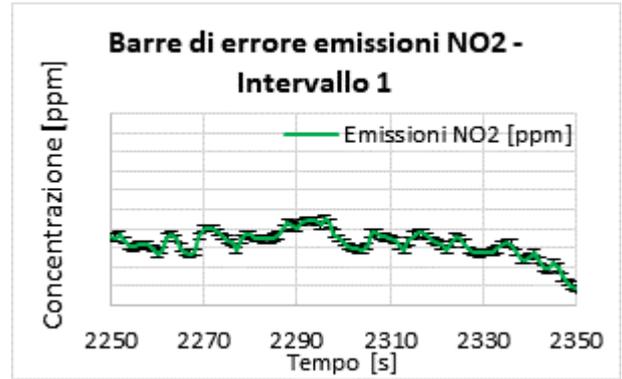


Figura 7.31 Barre di errore emissioni NO2 - Intervallo 1 (75 kW)

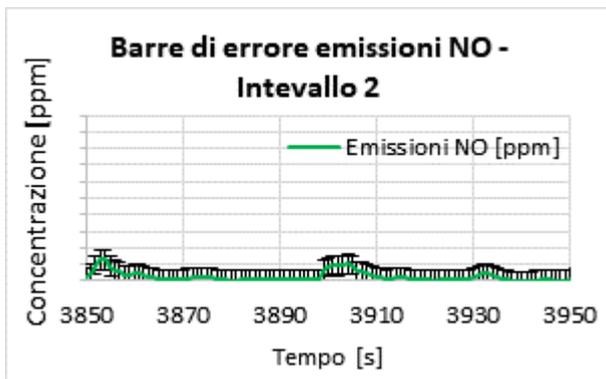


Figura 7.32 Barre di errore emissioni NO - Intervallo 2 (75 kW)

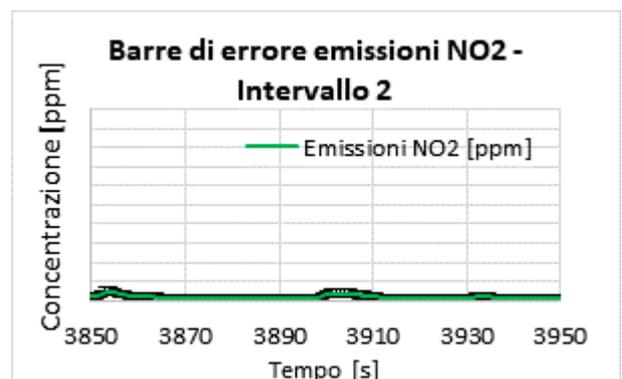


Figura 7.33 Barre di errore emissioni NO2 - Intervallo 2 (75 kW)

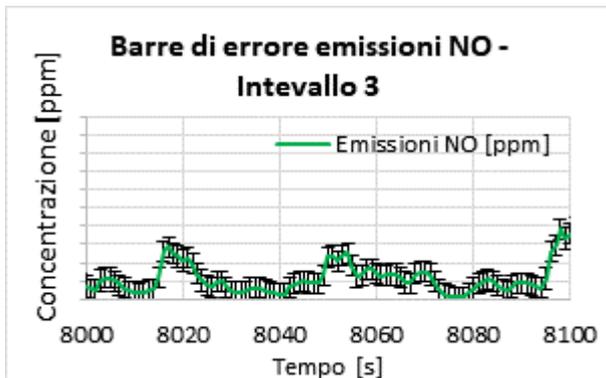


Figura 7.34 Barre di errore emissioni NO - Intervallo 3 (75 kW)

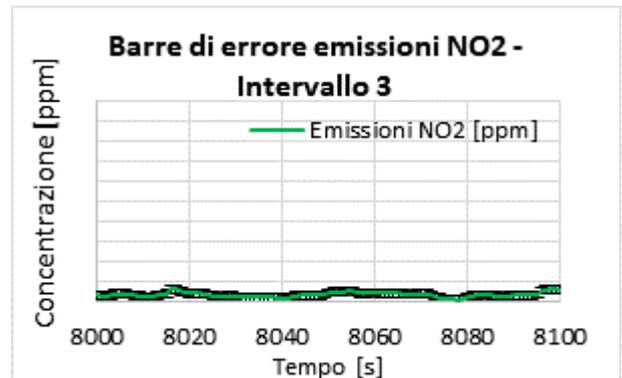


Figura 7.35 Barre di errore emissioni NO2 - Intervallo 3 (75 kW)

#### 7.4.2 Test 100 kW

In figura n. 7.36 e n. 7.37 si vedono gli andamenti della concentrazione di NO e NO<sub>2</sub> per il test con la taratura da 100 kW. Rispetto al caso precedente si può notare che non si hanno picchi importanti durante il test, infatti dopo una prima fase a inizio ciclo, con concentrazioni relativamente alte, queste si riducono e il loro valore massimo rimane al di sotto di una certa soglia.

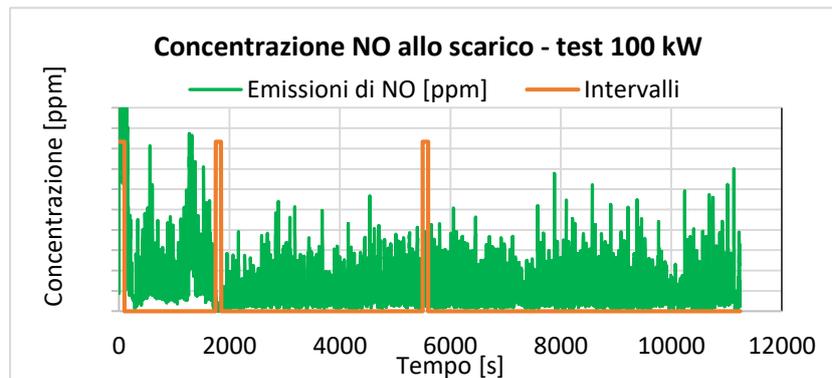


Figura 7.37 Concentrazione NO allo scarico - test RDE (100 kW)

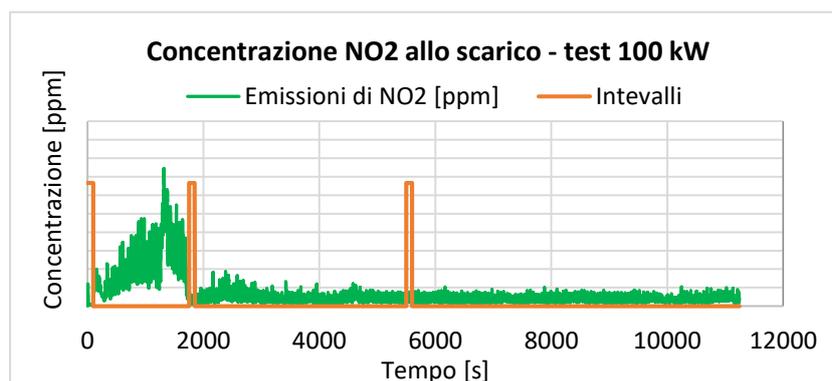


Figura 7.36 Concentrazione NO2 allo scarico - test RDE (100 kW)

Nelle figure n. 7.38, n. 7.40 e n. 7.42 sono mostrate le barre di errore per le misure di NO relativamente agli intervalli di figura n. 7.35 e n. 7.36. Nelle figure n. 7.39, n. 7.41 e n. 7.43 i grafici relativi agli stessi intervalli ma per le misure di NO<sub>2</sub>. Dal momento che i livelli di concentrazioni non sono molto differenti rispetto alla taratura da 75 kW vale quanto detto prima ossia che la precisione delle misure di NO potrebbe essere migliorata utilizzando una concentrazione più bassa del gas di taratura.

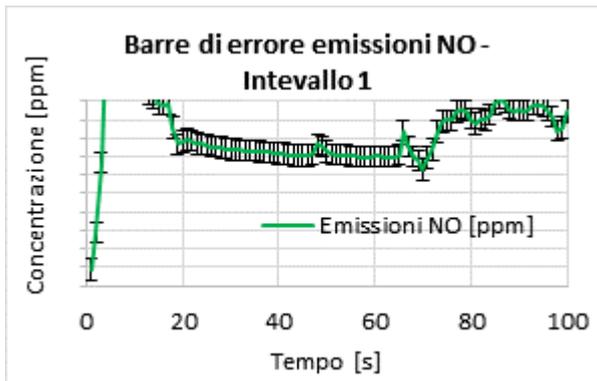


Figura 7.38 Barre di errore emissioni NO - Intervallo 1 (100 kW)

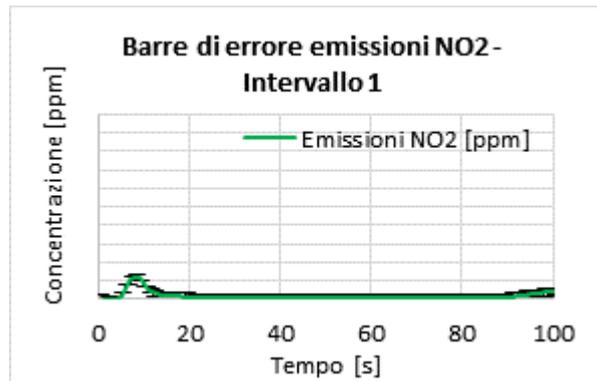


Figura 7.39 Barre di errore emissioni NO2 - Intervallo 1 (100 kW)

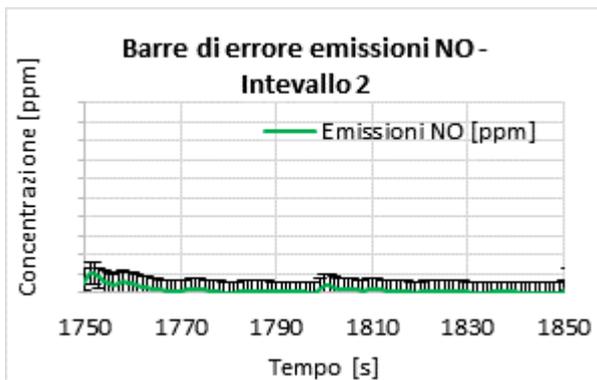


Figura 7.40 Barre di errore emissioni NO - Intervallo 2 (100 kW)

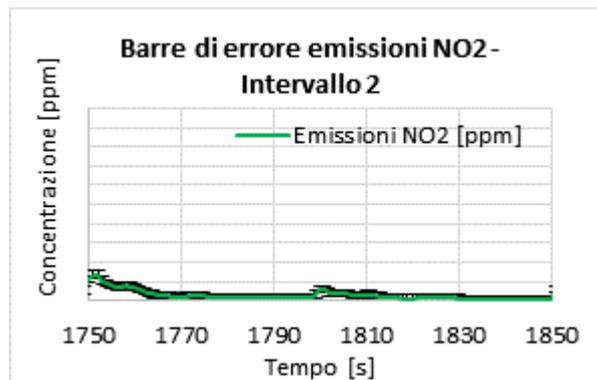


Figura 7.41 Barre di errore emissioni NO2 - Intervallo 2 (100 kW)

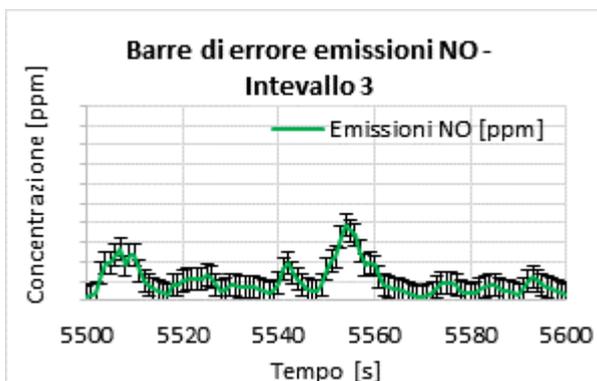


Figura 7.42 Barre di errore emissioni NO - Intervallo 3 (100 kW)

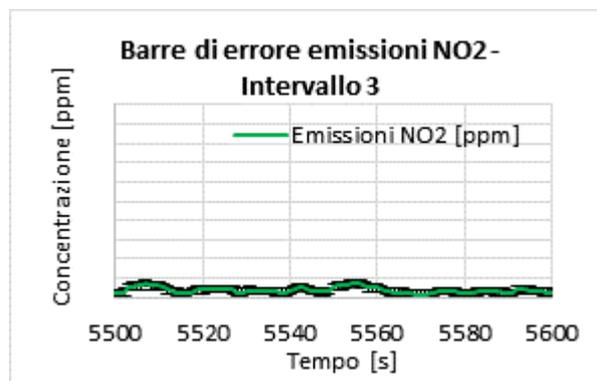


Figura 7.43 Barre di errore emissioni NO2 - Intervallo 3 (100 kW)

## 7.5 Valutazione delle emissioni durante la partenza a freddo

Per il calcolo del fattore di conformità vengono escluse le emissioni durante la partenza a freddo, ossia la fase iniziale del ciclo fino a che la temperatura del liquido di raffreddamento non abbia raggiunto 70°C.

Tuttavia, questa è la fase più critica per le emissioni di inquinanti poiché il DOC ha una scarsa efficienza quando la sua temperatura è bassa e il sistema SCR, al di sotto di una certa temperatura, non lavora perché non viene iniettata l'urea. Si è deciso quindi di calcolare l'impatto delle emissioni che

avvengono durante tale fase confrontando il valore percentuale della loro massa con quella totale emessa durante l'intero ciclo.

In figura n. 7.44 si mostra la cumulata di emissioni di NO<sub>x</sub> durante il ciclo RDE. Le curve blu e rossa rappresentano la massa cumulata di NO<sub>x</sub> per l'intero test includendo ed escludendo rispettivamente la partenza a freddo.

La durata della partenza a freddo per il test eseguito con la taratura da 75kW è di 108s. In realtà il motore era già caldo, come si può notare dalla temperatura del liquido di raffreddamento (curva verde) che parte da circa 61°C. Questo perché, prima di iniziare il test, era stato acceso per valutare il corretto funzionamento del sistema SCR e della taratura del motore stesso.

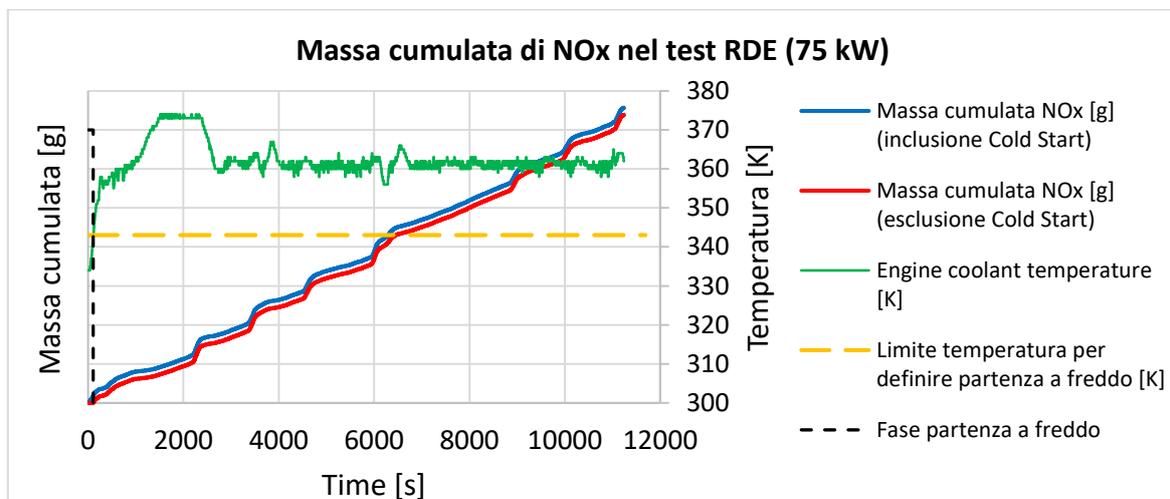


Figura 7.44 Massa cumulata NO<sub>x</sub> nel test RDE - 75 kW

In figura n. 7.45 si può vedere l'andamento della massa cumulata di THC durante il test. Si può notare che la pendenza della curva blu sia, nei primi 108 s, molto ripida a evidenza dell'alto livello di emissioni.

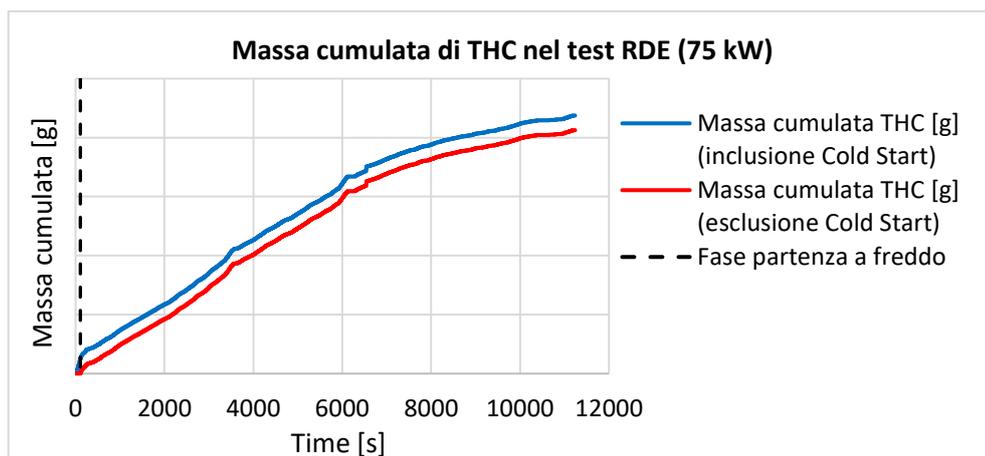


Figura 7.45 Massa cumulata THC nel test RDE - 75 kW

Le emissioni di CO nell'intero ciclo sono pari a zero come si vede in figura n. 7.46. Occorre tenere conto che il motore non era completamente freddo quindi anche il DOC aveva probabilmente raggiunto un livello di efficienza alto.

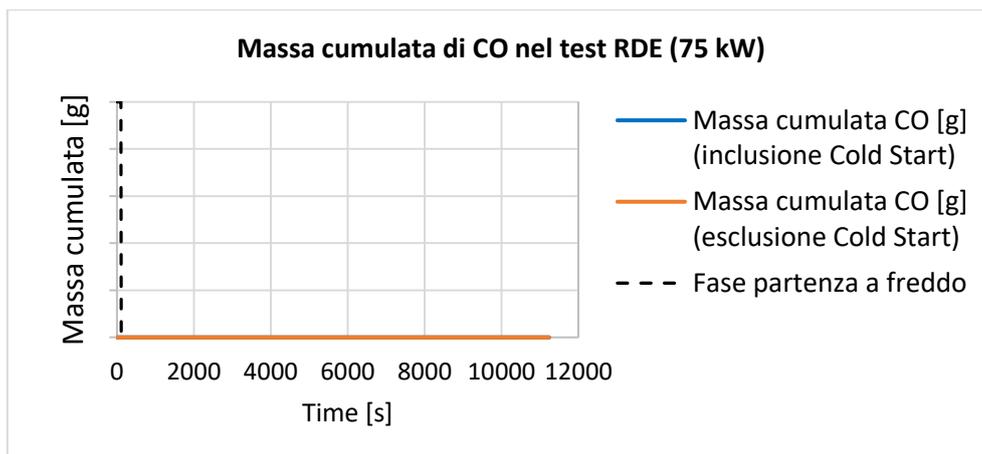


Figura 7.46 Massa cumulata CO nel test RDE - 75 kW

La tabella n. 7.10 riassume la percentuale in massa delle emissioni inquinanti, durante la partenza a freddo, rispetto a quella totale emessa nel test.

Componente	Contributo percentuale delle emissioni durante partenza a freddo – taratura 75 kW
NOx	2,46 %
CO	-
THC	5,67 %

Tabella 7.10 Contributo delle emissioni durante la partenza a freddo - 75kW

In figura n. 7.47 si mostra, la massa cumulata di NO<sub>x</sub> nel caso della taratura da 100kW includendo (linea blu) ed escludendo (linea rossa) la partenza a freddo che ha una durata complessiva di circa 380 s. Si può vedere che, nella fase a freddo, la curva blu ha una pendenza molto ripida, successivamente diminuisce e dopo circa 2000 s dall’inizio del test ha un andamento pressoché lineare.

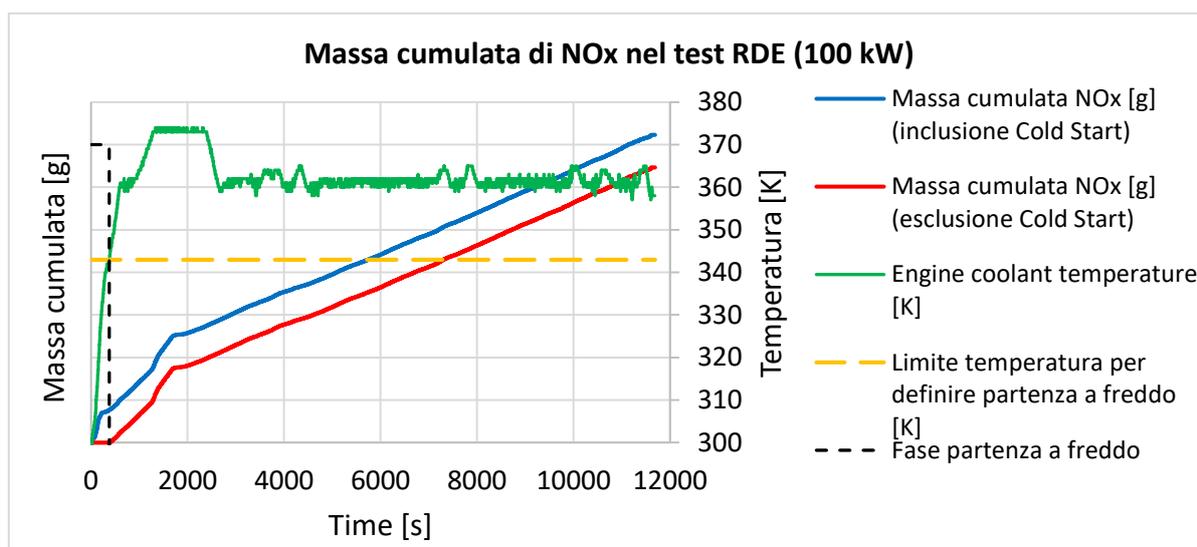


Figura 7.47 Massa cumulata NOx nel test RDE - 100 kW

Anche per gli idrocarburi incombusti si vede in figura n. 7.48 che un contributo relativamente alto alle emissioni totali proviene dalla fase a motore freddo. Dopo che la temperatura del liquido di

raffreddamento ha raggiunto 70°C le emissioni di THC crescono più lentamente fino a 4000 s e da qui si riducono ulteriormente come si vede dall'andamento della curva che si appiattisce notevolmente.

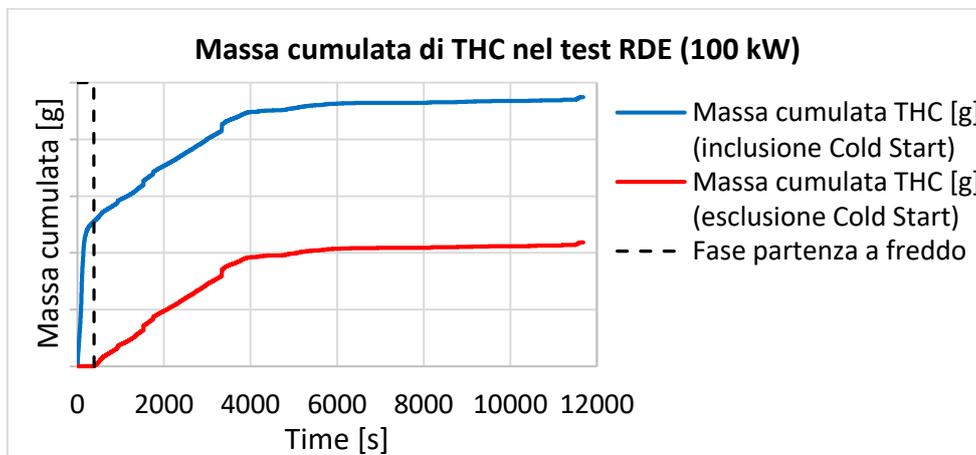


Figura 7.48 Massa cumulata THC nel test RDE - 100 kW

Come si vede in figura n. 7.49 la maggior parte delle emissioni di CO avvengono nei primi 90 s circa di accensione del motore. Infatti, prima ancora che finisca la fase considerata di riscaldamento, queste si riducono notevolmente tendendo a valori prossimi allo zero.

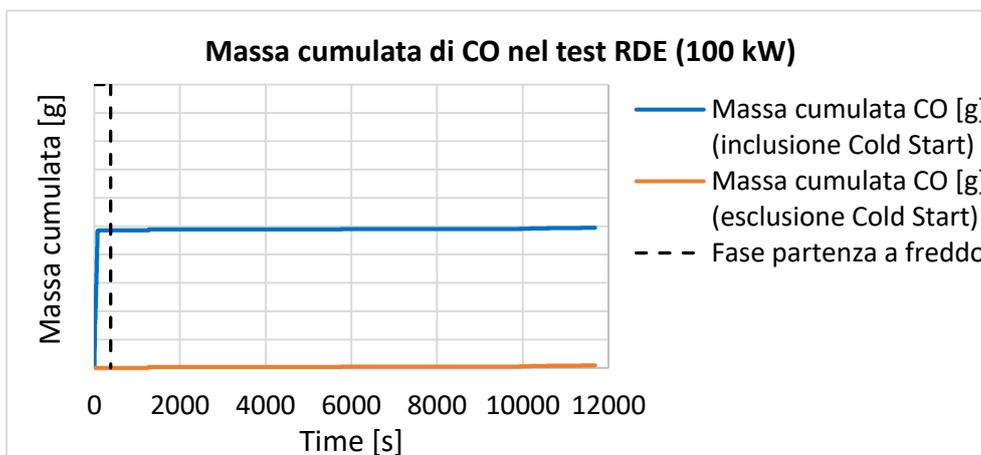


Figura 7.49 Contributo delle emissioni durante la partenza a freddo - 100kW

Nella tabella n. 7.11 è mostrata la percentuale di emissioni in massa rilevate nella partenza a freddo, rispetto alla massa totale nel ciclo, per la taratura da 100 kW. Questa è pari a più del 10% per gli NO<sub>x</sub> e a poco meno del 54% per i THC mentre per il CO è superiore al 98%.

Componente	Contributo percentuale delle emissioni durante partenza a freddo – taratura 100 kW
NO <sub>x</sub>	10,62 %
CO	98,26 %
THC	53,92 %

Tabella 7.11 Contributo delle emissioni durante la partenza a freddo - 100kW

## 8 PEMS n°2

Anche in questo caso i test sono stati fatti con le due potenze di 75 kW e 100 kW. Si anticipa che i valori di emissioni rilevati con il PEMS n°2 sono risultati essere molto diversi da quelli rilevati con il PEMS n°1. Ricercata la causa di tali scostamenti è stato visto che la strumentazione era starata. Da qui l'importanza di effettuare una procedura corretta e rigorosa per le operazioni di taratura.

I grafici relativi alle emissioni specifiche di NO<sub>x</sub> e alla loro portata hanno una scala diversa da quella utilizzata per i grafici relativi al PEMS n°1 quindi non sono direttamente confrontabili.

### 8.1 Taratura da 75 kW

In figura 8.1 è mostrata la percentuale di potenza, rispetto a quella massima, erogata dal motore durante il test RDE. Si è deciso di aggiungere alcune fasi di minimo più lunghe rispetto all'analogo eseguito con il PEMS n°1. Come si vede dalla figura, queste vengono solo in parte escluse infatti i primi D<sub>1</sub>= 2 minuti, come spiegato nel paragrafo 6.2, sono ritenuti validi. In rosso sono rappresentati gli intervalli nei quali viene calcolata la finestra mobile. Si può notare che i primi secondi del ciclo non sono stati esclusi poiché il motore era già caldo.

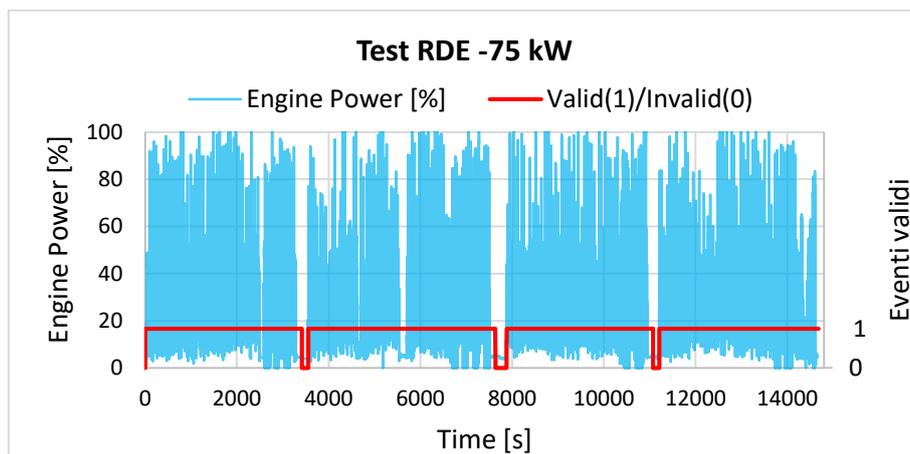


Figura 8.1 Potenza del motore in funzione del tempo nel test su strada ed eventi validi – Taratura 75 kW

In figura 8.2 è mostrata la potenza media calcolata per ogni finestra (linea verde), la soglia di potenza che ciascuna finestra deve superare per essere valida (linea tratteggiata rossa) e gli intervalli dove le finestre sono valide (linea nera). Si nota che tutte le finestre hanno una potenza superiore alla soglia quindi non viene fatta nessuna esclusione.

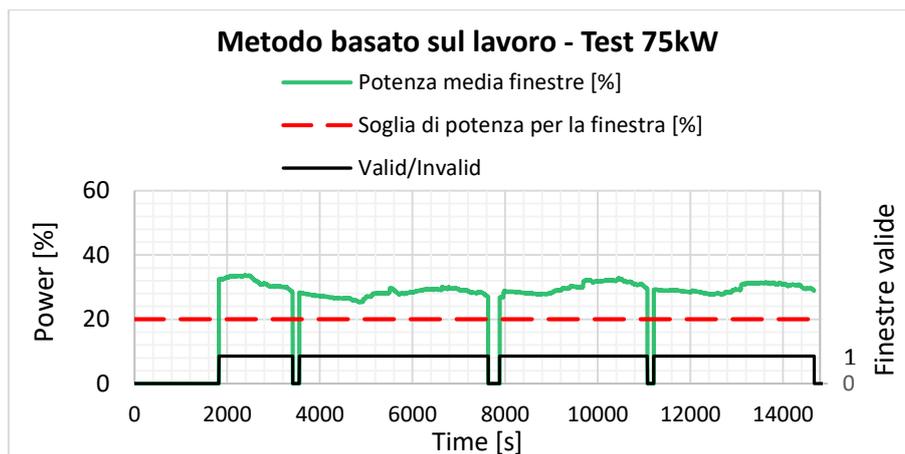


Figura 8.2 Potenza media nelle finestre calcolate con il metodo basato sul lavoro e finestre valide – Taratura 75 kW

In tabella 6.1 vengono riassunte alcune informazioni del test e i risultati del calcolo delle finestre.

Metodo basato sul lavoro - Test 75 kW		
Ciclo di lavoro	Unità di misura	
Durata totale test	s	14670
Lavoro totale ciclo	kWh	83,5
<b>Finestre mobili</b>		
Quantità di riferimento		Lavoro
Valore quantità di riferimento	kWh	12,07
Soglia di potenza	%	20,00
$\frac{Lavoro_{test\_RDE}}{Lavoro_{ciclo\ NRTC}}$	[5 - 7]	6,9
Potenza minima nelle finestre	%	25,36
Potenza massima nelle finestre	%	33,68
Numero totale di finestre	-	12326
Numero di finestre valide	-	12326
Percentuale di finestre valide	%	100

Tabella 8.1 Dati delle finestre mobili - Metodo basato sul lavoro (Taratura 75 kW)

In figura 8.3 è rappresentata la durata temporale di ogni finestra (linea verde) calcolata con il metodo della massa di CO<sub>2</sub>. Si ricorda che per tale metodo la lunghezza di ogni finestra è calcolata in modo tale che venga raggiunta la massa di CO<sub>2</sub> di riferimento. Successivamente vengono escluse le finestre la cui durata temporale supera la soglia di riferimento (linea rossa tratteggiata) calcolata con l'equazione 6.7. Con la linea nera sono rappresentati gli intervalli all'interno dei quali ci sono le finestre valide.

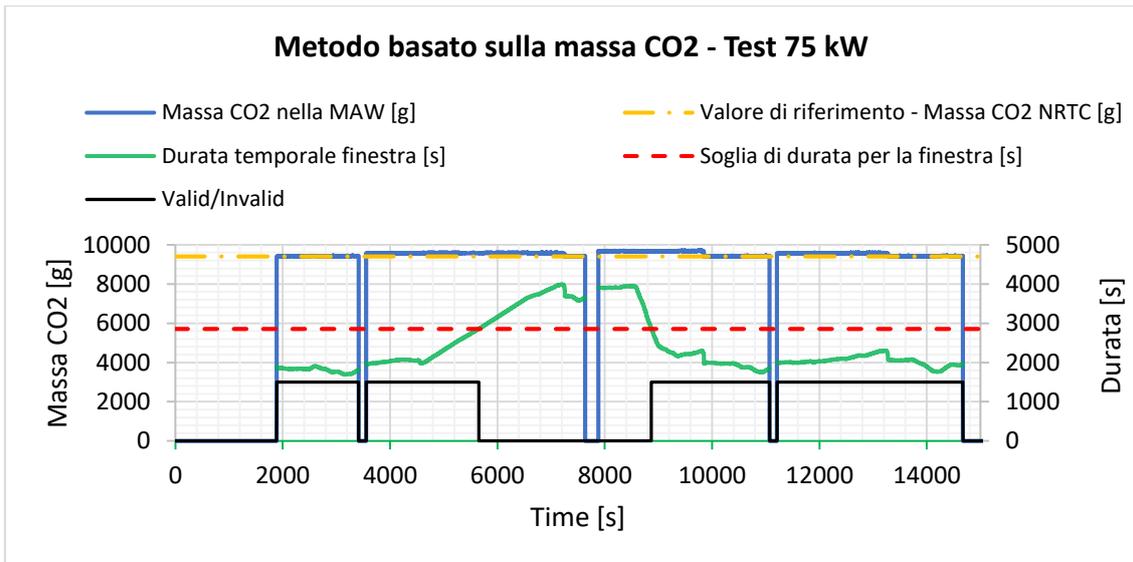


Figura 8.3 Durata delle finestre calcolate con il metodo basato sulla massa di CO<sub>2</sub> e finestre valide - Taratura 75 kW

In tabella 8.4 sono indicati i dati delle finestre mobili ottenuti utilizzando il metodo di calcolo basato sulla massa di CO<sub>2</sub>. Si nota come, nonostante il ciclo sia lo stesso in questo caso il numero di finestre valide per il calcolo del fattore di conformità sia molto inferiore rispetto al caso precedente.

Metodo basato sulla massa di CO <sub>2</sub> - Test 75 kW		
Ciclo di lavoro	Unità di misura	
Durata totale test	s	14670
Massa CO totale ciclo	kg	61,08
<b>Finestre mobili</b>		
Quantità di riferimento		CO <sub>2</sub>
Massa CO <sub>2</sub> di riferimento	kg	9,41
Soglia di durata	s	2856
$\frac{Massa\ CO_2_{test\_RDE}}{Massa\ CO_2_{ciclo\ NRTC}}$	[5 - 7]	6,49
Durata massima finestre	s	2856
Durata minima finestre	s	1692
Numero totale di finestre	-	12259
Numero di finestre valide	-	9291
Percentuale di finestre valide	%	75,79

Tabella 8.2 Dati delle finestre mobili - Metodo basato sulla massa di CO<sub>2</sub> (Taratura 75 kW)

In tabella 8.5 vengono mostrati i valori del fattore di conformità calcolati con il software del PEMS per i due metodi. Lo stesso calcolo è stato eseguito con il software *EMROAD*® con risultati praticamente uguali.

Taratura 75 kW – PEMS n° 2	Software di calcolo: SW PEMS/ EMROAD®	
	Metodo basato sul <i>lavoro</i>	Metodo basato sulla <i>massa di CO2</i>
Conformity factor NOx	1,25 <sup>(1)</sup>	1,26 <sup>(2)</sup>
Conformity factor CO	0,04 <sup>(3)</sup>	0,04 <sup>(4)</sup>
Conformity factor THC	0,02 <sup>(5)</sup>	0,02 <sup>(6)</sup>

(1), (2), (3), (4), (5), (6) vedere limiti tabella n. 7.5

Tabella 8.3 Valori di conformity factor - Test 75 kW

### 8.1.1 Confronto tra il ciclo reale e omologativo

I punti di lavoro motore sono stati rappresentati, analogamente ai test precedenti, nel grafico coppia [Nm]-numero di giri [rpm] in figura 8.4. La curva rossa rappresenta la curva di pieno carico del motore. Si può notare che durante un ciclo NRTC, in figura n. 8.5, non viene mai esplorata la zona a basso numero di giri e alto carico mentre nel test reale i punti di lavoro motore sono maggiormente sparsi nella zona ad alto numero di giri e carichi intermedi. Si fa notare che il ciclo NRTC ha una durata di 1238 s mentre quello RDE in questione dura 14670 s (circa 4 ore). La situazione, da questo punto di vista, è quindi molto simile a quella dell’analogo test con il PEMS n°1.

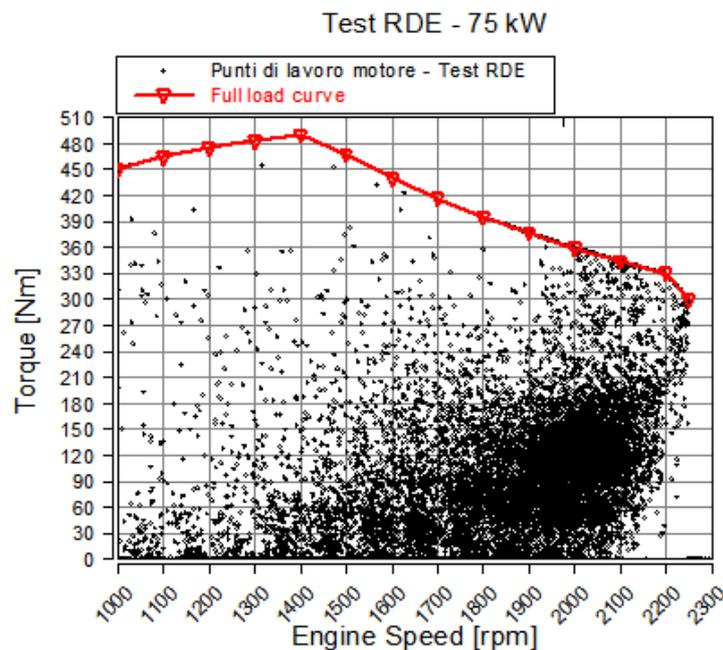


Figura 8.4 Punti di lavoro motore - Test RDE (taratura 75 kW)

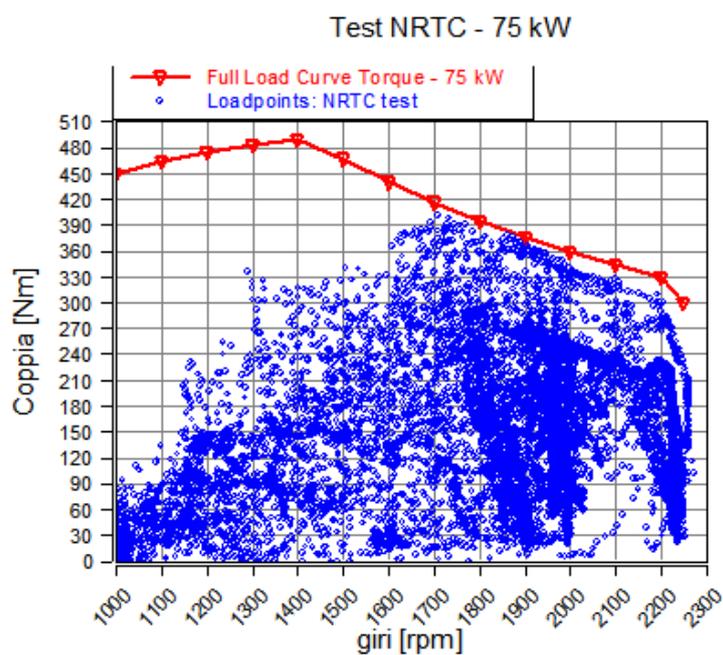


Figura 8.5 Punti di lavoro motore - ciclo NRTC (taratura 75 kW)

Nelle figure 8.6 e 8.7 vengono mostrati qualitativamente i livelli di emissione di  $\text{NO}_x$  [g/h]: il colore blu rappresenta il valore minimo mentre il rosso il valore massimo. Per i grafici è stata utilizzata la stessa scala in modo da permettere un primo confronto visivo. Sul diagramma sono stati rappresentati, con i punti (in termini di coppia e numero di giri motore) dove effettivamente è avvenuto il campionamento dei dati. Infatti, nonostante i grafici rappresentino in modo continuo il livello di emissioni, bisogna tenere in considerazione solo le zone dove sono stati acquisiti i dati (quelle in prossimità dei punti neri). Inoltre, occorre ricordare che per il ciclo NRTC gli inquinanti vengono rilevati con un banco analisi in condizioni controllate all'interno di una cella quindi le misure risultano essere precise e ripetibili. Invece nel caso del test RDE le misure sono fatte con il PEMS montato a bordo del veicolo quindi le misure sono meno precise anche perché possono risentire delle variazioni di temperatura e umidità ambientale oltre che delle vibrazioni dovute al moto del mezzo stesso.

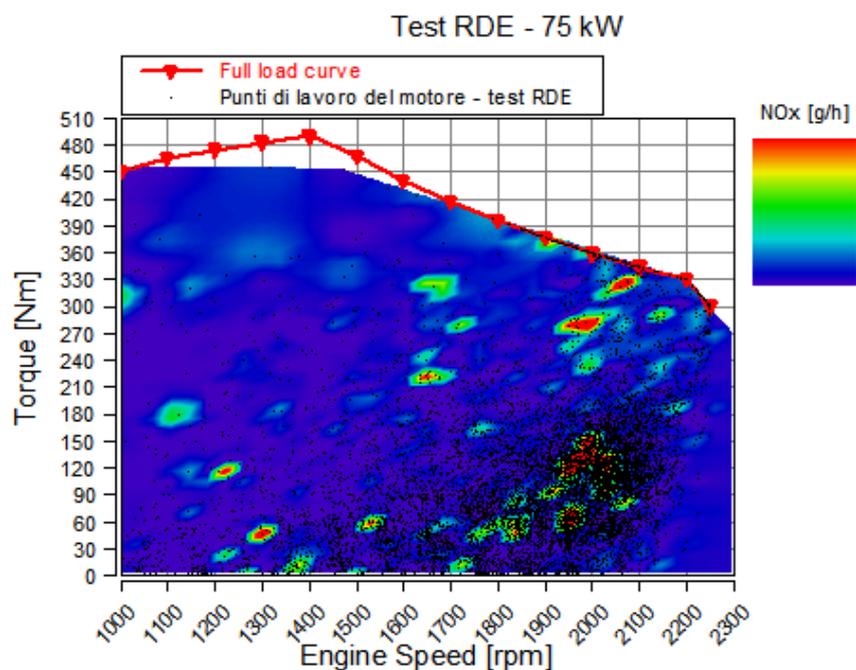


Figura 8.6 Livelli di emissione NOx [g/h] - test RDE (PEMS n°2 - taratura 75 kW)

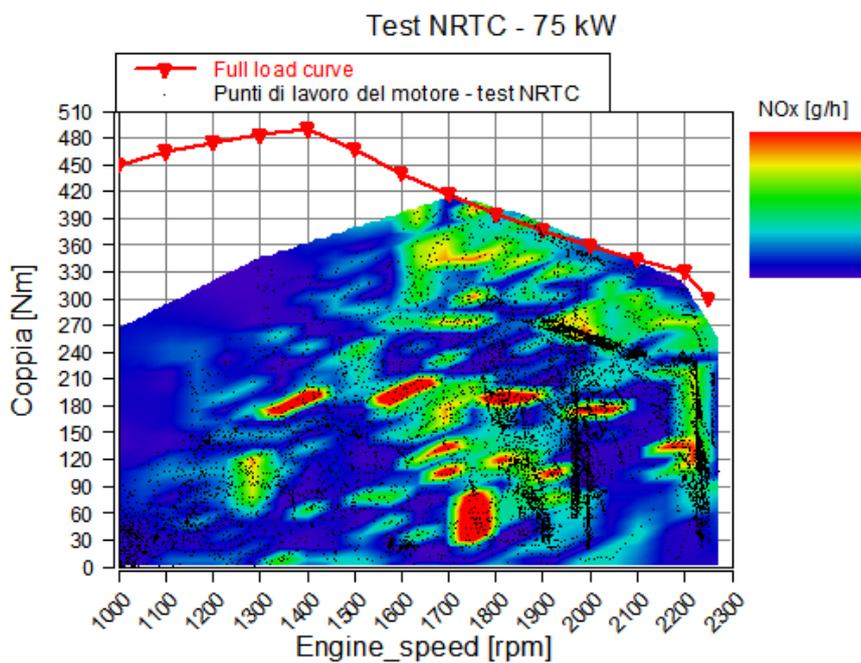


Figura 8.7 Livelli di emissione NOx [g/h] - test NRTC a caldo (taratura 75 kW)

Nelle figure 8.8 e 8.9 vengono mostrate sul diagramma, Coppia-Numero di giri motore, le emissioni specifiche di NO<sub>x</sub> [g/kWh] per il test RDE e NRTC rispettivamente. Tali grafici non sono direttamente confrontabili con quelli analoghi del test precedente (figure n. 7.8 e n. 7.9) poiché è stata cambiata la

scala per le emissioni specifiche come è possibile notare dalla diversa colorazione per il ciclo NRTC (figure n. 7.9 e n. 8.9) che è sempre lo stesso.

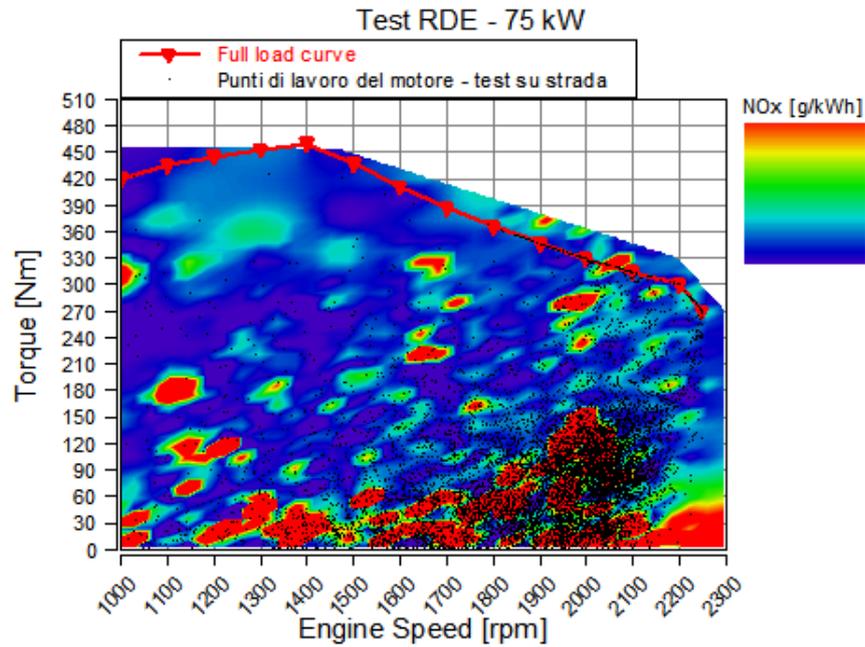


Figura 8.8 Emissioni specifiche NOx [g/kWh] - Test RDE (PEMS n°2 - taratura 75 kW)

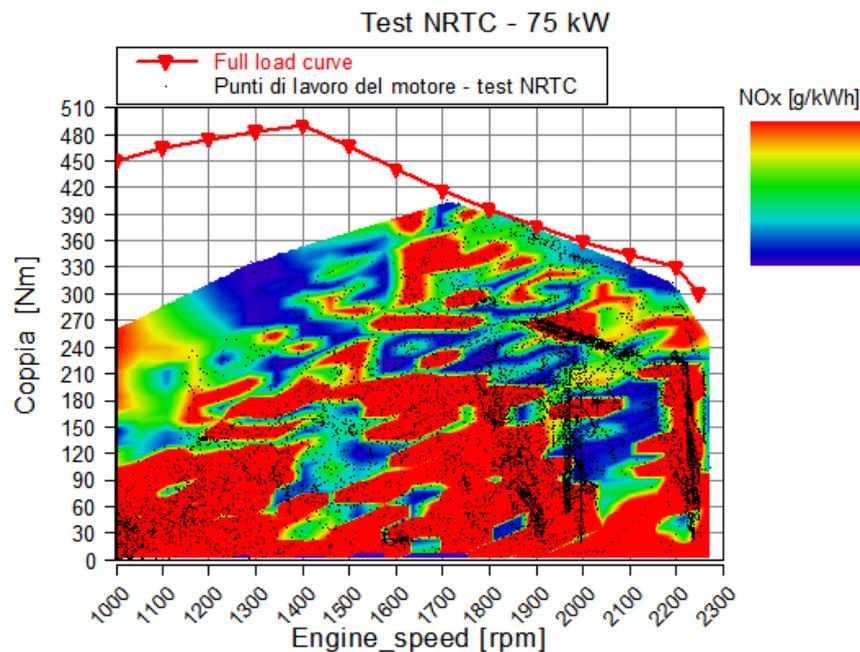


Figura 8.9 Emissioni specifiche NOx [g/kWh] - Test NRTC a caldo (taratura 75 kW)

In figura 8.10 e 8.11 vengono mostrati la percentuale di tempo (linea azzurra) e la percentuale in massa di emissioni di NOx, THC e CO per il ciclo reale e NRTC rispettivamente.

Si può notare che nel ciclo reale il motore spende il 76% di tempo nella fascia di potenza 0-40%, il 17,71% in quella intermedia (40-60%) e solo, circa, il 6% nella fascia 60-100%.

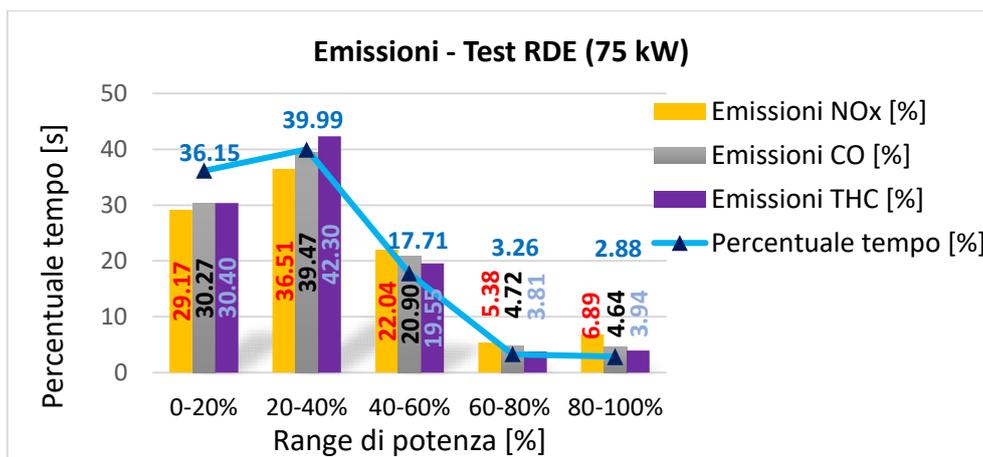


Figura 8.10 Percentuale di tempo e massa di inquinanti per fasce di potenza erogata dal motore – Test RDE ( PEMS n°2 - 75 kW)

Nella figura n. 8.12 sono rappresentate le emissioni specifiche degli inquinanti suddivise per fasce di potenza. Tali grafici non sono confrontabili con quelli analoghi relativi al PEMS n° 1 poiché è stata cambiata la scala.

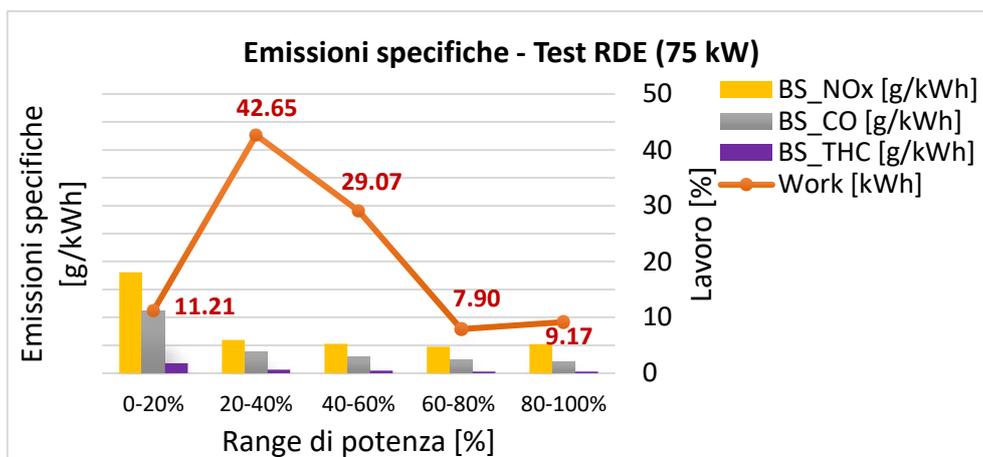


Figura 8.11 Percentuale di lavoro e valori delle emissioni specifiche medie per fasce di potenza erogata dal motore – Test RDE (PEMS n° 2 - 75 kW)

In figura n. 7.13 è rappresentato il grafico relativo al ciclo NRTC. Si vede che il lavoro fatto dal motore nella fascia tra il 60 e l'80% della massima potenza contribuisce per il 36% circa al lavoro totale, mentre nel test RDE il lavoro nella stessa fascia è pari a poco meno dell'8%. Si nota anche che le emissioni specifiche seguono un andamento simile per il ciclo NRTC e RDE con un andamento decrescente, man mano che ci si sposta verso potenze maggiori, fino alla penultima fascia per poi risalire lievemente nell'ultima.

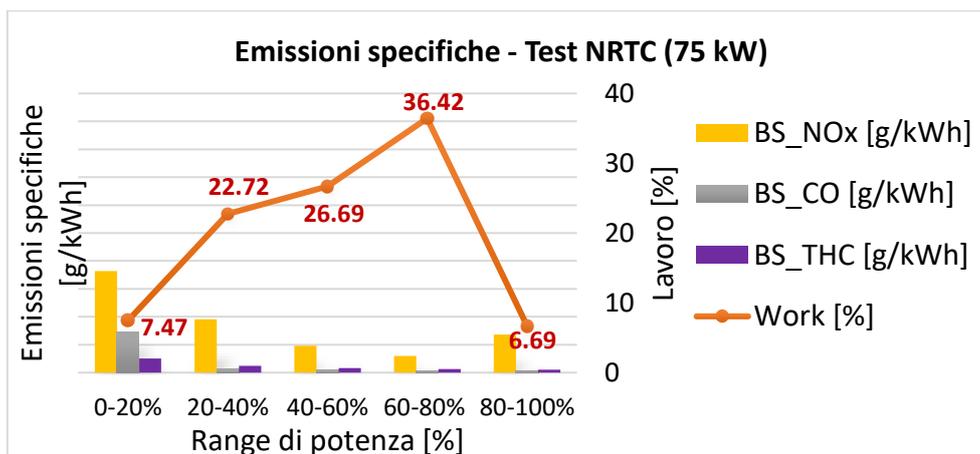


Figura 8.12 Percentuale di lavoro e valori delle emissioni specifiche medie per fasce di potenza erogata dal motore – Test NRTC (75 kW)

## 8.2 Taratura da 100 kW

In figura 8.13 è rappresentata la potenza erogata dal motore durante il ciclo reale (in azzurro) e gli eventi validi (linea rossa). Dal grafico si può vedere che solo una piccola porzione del ciclo, di circa 170 s (partenza a freddo), viene esclusa. Interessante anche notare come, con la taratura da 100 kW, la richiesta di potenza al motore non raggiunga mai il 100%.

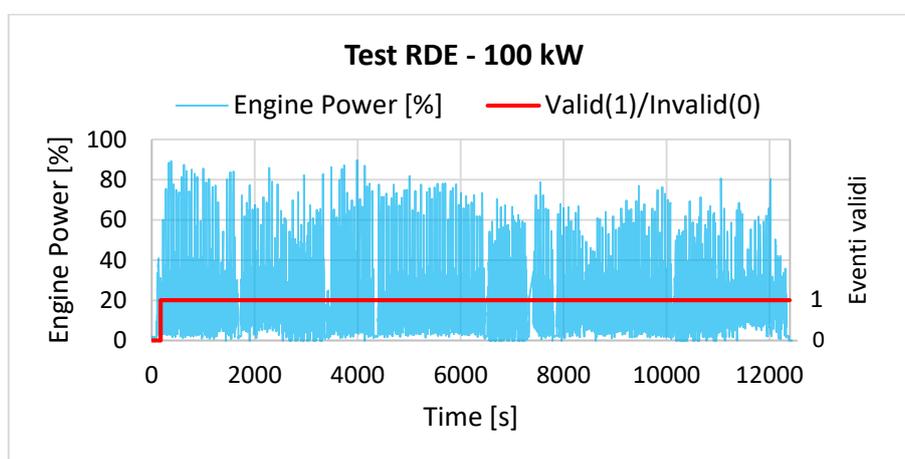


Figura 8.13 Potenza del motore in funzione del tempo nel test su strada ed eventi validi – Taratura 100 kW

In figura 8.15, così come per la taratura da 75 kW, è rappresentata la potenza media in ogni finestra (linea verde) e la soglia di potenza (linea tratteggiata rossa).

Si fa notare che tutte le finestre hanno una potenza media inferiore al 20% quindi si è reso necessario ridurre la soglia di potenza. Infatti, quando la percentuale di finestre valide è inferiore al 50% è possibile ridurre la soglia di potenza, a step dell'1%, fino ad un minimo del 15%. Nel caso in cui, pur

riducendo la soglia di potenza, la percentuale di finestre valide sia inferiore al 50% il test non è valido per il calcolo del conformity factor.

In questo caso la soglia è stata portata al 17%.

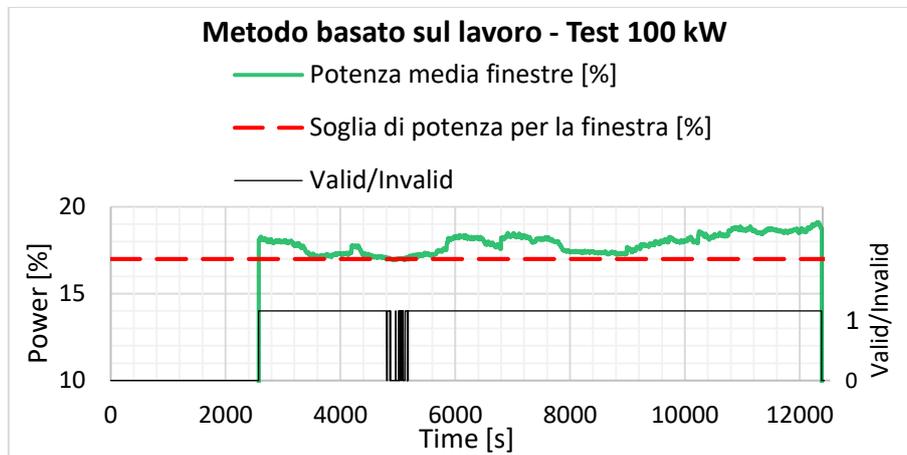


Figura 8.14 Potenza media nelle finestre e finestre valide - Taratura 100 kW (Metodo basato sul lavoro)

In tabella 6.4 alcuni dati relativi al ciclo e i risultati del calcolo delle finestre mobili.

Metodo basato sul lavoro - Test 100 kW		
Ciclo di lavoro	Unità di misura	
Durata totale test	s	12390
Lavoro totale ciclo	kWh	60,2
<b>Finestre mobili</b>		
Quantità di riferimento		Lavoro
Reference Value	kWh	12,07
Soglia di potenza	%	17,00 <sup>(1)</sup>
$\frac{Lavoro_{test\_RDE}}{Lavoro_{ciclo\_NRTC}}$	[5 - 7]	5
Potenza minima nelle finestre	%	17,00
Potenza massima nelle finestre	%	19,11
Numero totale di finestre	-	9805
Numero di finestre valide	-	9585
Percentuale di finestre valide	%	97,76

<sup>(1)</sup> Nota: riduzione della soglia effettuata per raggiungere la percentuale minima di finestre valide

Tabella 8.4 Dati per il calcolo delle finestre mobili - Metodo basato sul lavoro (Taratura 100 kW)

In figura 8.16 è rappresentata la durata di ogni finestra (linea verde) e la soglia (linea tratteggiata rossa) utilizzata per discriminare le finestre valide, come per la taratura da 75 kW.

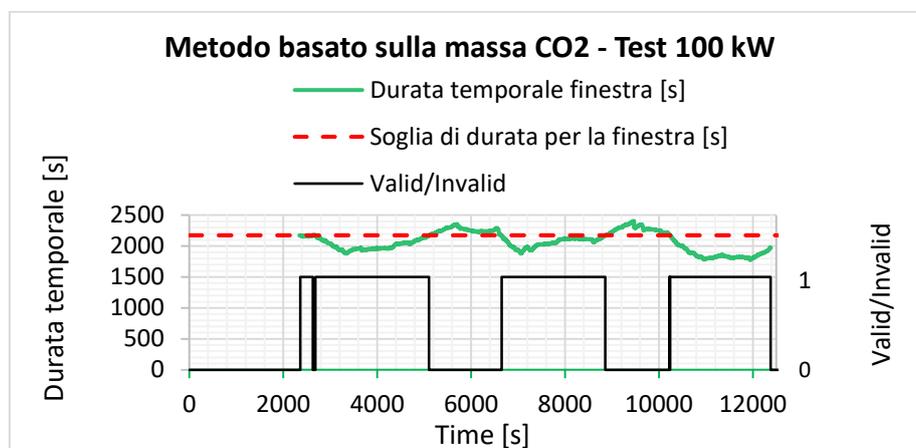


Figura 8.15 Durata delle finestre calcolate con il metodo basato sulla massa di CO<sub>2</sub> e finestre valide - Taratura 100 kW

Nella tabella 8.7 alcuni dati di interesse relativi al ciclo e al calcolo delle finestre mobili per la taratura da 100 kW.

Metodo basato sulla massa di CO <sub>2</sub> - Test 100 kW		
Ciclo di lavoro	Unità di misura	
Durata totale test	s	12390
Massa CO <sub>2</sub> emessa nel ciclo	kg	55,834
<b>Finestre mobili</b>		
Quantità di riferimento		CO <sub>2</sub>
Massa CO <sub>2</sub> di riferimento	kg	9,41
Soglia di durata	s	2172
$\frac{Massa\ CO_2_{test\_RDE}}{Massa\ CO_2_{ciclo\_NRTC}}$	[5 - 7]	5,93
Durata massima finestre	s	2172
Durata minima finestre	s	1777
Numero totale di finestre	-	10038
Numero di finestre valide	-	7047
Percentuale di finestre valide	%	70,20

Tabella 8.5 Dati delle finestre mobili - Metodo basato sulla massa di CO<sub>2</sub> (Taratura 100 kW)

Infine, nella tabella 8.8 vengono riassunti i valori del fattore di conformità calcolati con i due metodi e utilizzando due software diversi. Si nota come tali valori siano inferiori rispetto alla taratura da 75 kW. In questo caso inoltre c'è una maggiore differenza tra il valore calcolato con il metodo del lavoro e della massa di CO<sub>2</sub>.

Taratura 100 kW – PEMS n°2	Software di calcolo: proprietario PEMS	
	Metodo basato sul <b>lavoro</b>	Metodo basato sulla <b>massa di CO2</b>
CONFORMITY FACTOR NOx	0,96 <sup>(1)</sup>	0,84 <sup>(2)</sup>
	Software di calcolo: EMROAD©	
	Metodo basato sul <b>lavoro</b>	Metodo basato sulla <b>massa di CO2</b>
CONFORMITY FACTOR NOx	0,91 <sup>(1)</sup>	0,82 <sup>(2)</sup>
	Software di calcolo: proprietario PEMS/ EMROAD©	
	Metodo basato sul <b>lavoro</b>	Metodo basato sulla <b>massa di CO2</b>
Conformity factor CO	0,09 <sup>(3)</sup>	0,07 <sup>(4)</sup>
Conformity factor THC	0,01 <sup>(5)</sup>	0,01 <sup>(6)</sup>

(1), (2), (3), (4), (5), (6) Vedere limiti tabella n. 7.8

Tabella 8.6 Valori di conformity factor – PEMS n°2 (100 kW)

### 8.2.1 Confronto tra il ciclo reale e omologativo

In figura 8.16 e 8.17 si mostrano, nel diagramma Coppia – numero di giri, i punti di funzionamento del motore per il ciclo reale e per il ciclo NRTC rispettivamente. La differenza tra i due cicli è ancora più marcata rispetto alla taratura da 75 kW. Infatti, nel ciclo reale il motore non si trova praticamente mai a lavorare sulla curva di pieno carico. Molto interessante notare che il ciclo NRTC permetta di esplorare un'area più ampia in questo diagramma che in concreto si traduce nel rilevare le emissioni in un numero di punti maggiore rispetto a quelli che verranno poi raggiunti in un ciclo reale.

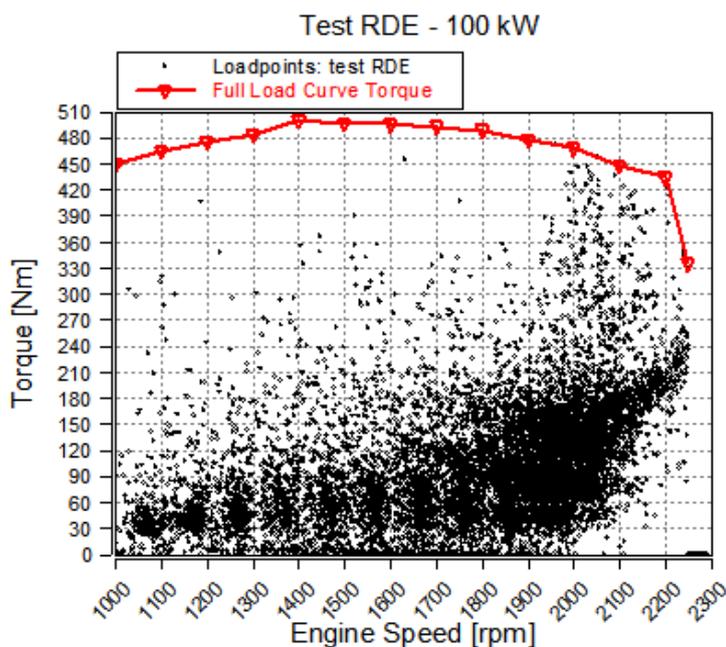


Figura 8.16 Punti di lavoro motore - Test RDE (PEMS n°2 - taratura 100 kW)

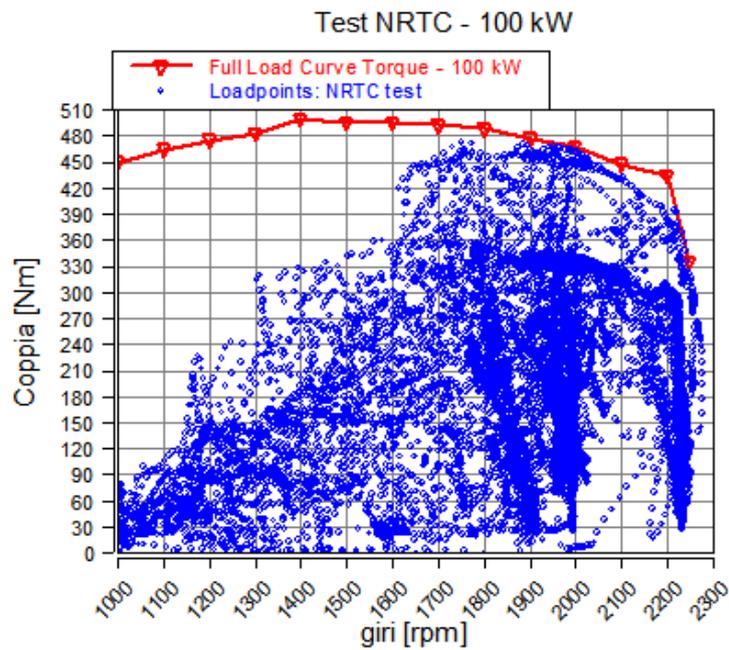


Figura 8.17 Punti di lavoro motore - ciclo NRTC (taratura 100 kW)

Nelle figure 8.18 e 8.19 si dà una rappresentazione delle emissioni di NO<sub>x</sub> [g/h] nel ciclo reale e in quello NRTC. Per una lettura corretta di questi grafici valgono le stesse considerazioni fatte per gli equivalenti ma relativi alla taratura da 75 kW (Fig. 8.6 e 8.7). Le zone al di sopra della curva di pieno carico in realtà non possono essere raggiunte dal motore quindi il livello di emissioni che si legge dal grafico in tali zone non deve essere preso in considerazione.

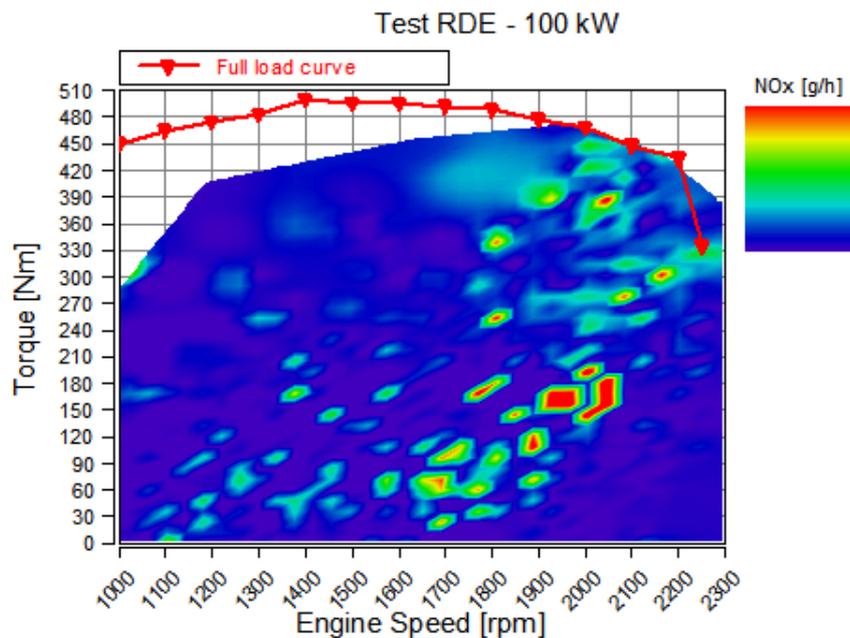


Figura 8.18 Livello di emissioni di NO<sub>x</sub> [g/h] - Test RDE (PEMS n°2 - Taratura 100 kW)

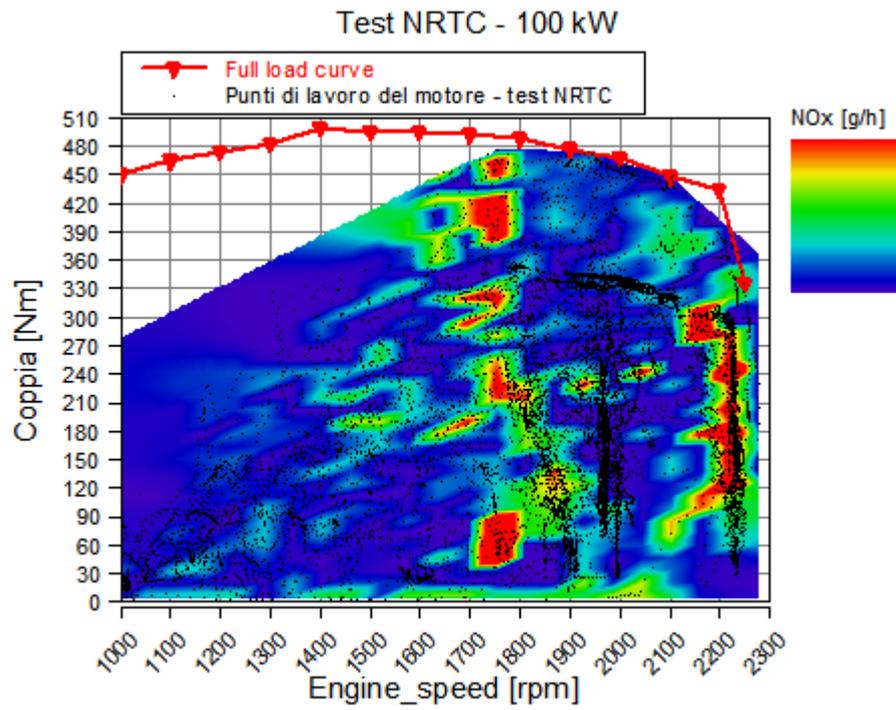


Figura 8.19 Livello di emissioni di NOx [g/h] - Test NRTC (Taratura 100 kW)

Nelle figure 8.20 e 8.21 sono rappresentate le emissioni specifiche di NOx[g/kWh] per il test su strada e NRTC.

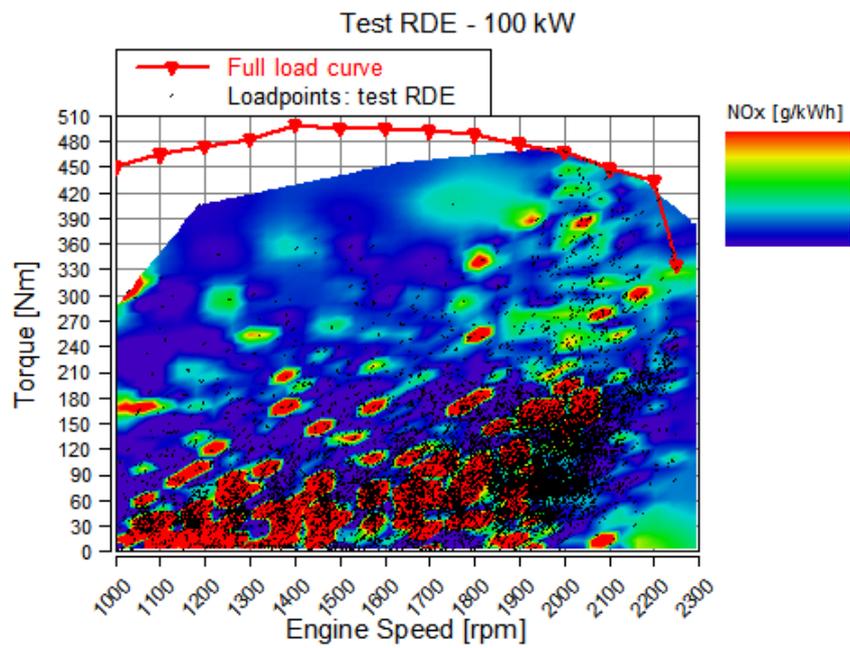


Figura 8.20 Emissioni specifiche NOx [g/kWh] - Test RDE (PEMS n°2 - taratura 100 kW)

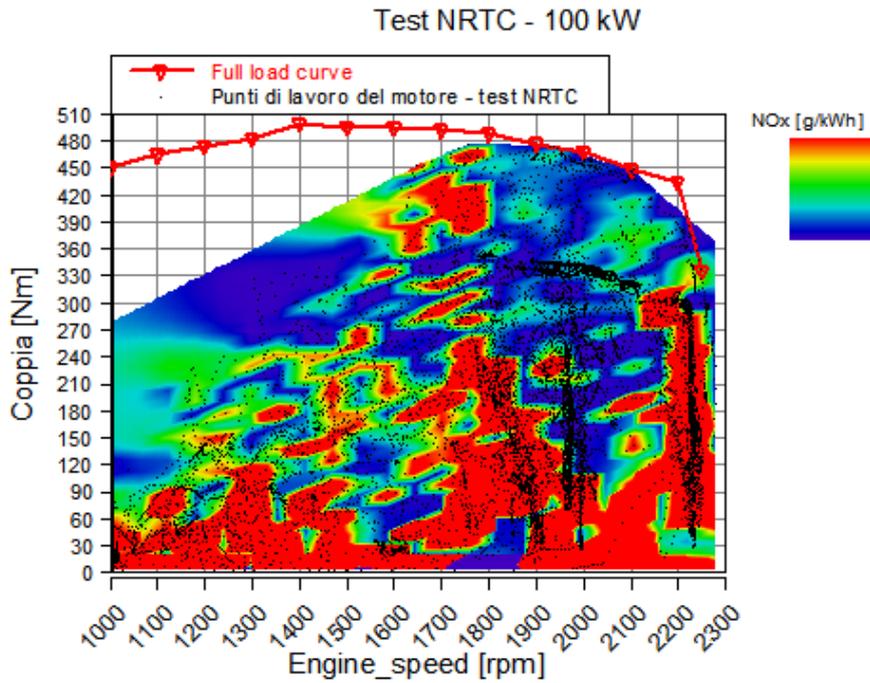


Figura 8.21 Emissioni specifiche NOx [g/kWh] - Test NRTC a caldo (taratura 100 kW)

Nelle figure 8.22 e 8.23 sono rappresentati, per la taratura da 100kW, grafici analoghi a quelli della 75 kW.

Il ciclo eseguito dalla macchina è circa lo stesso del caso precedente tuttavia si può notare come l'aumento della potenza massima fa in modo che il motore lavori a bassi carichi per una percentuale di tempo elevata. Per il 65% di tempo circa il motore lavora nel range di potenza 0-20% e per il 27% circa nel range 20-40% della potenza massima. Solo per meno del 6% del tempo totale il motore eroga una potenza intermedia (tra 40-60% della potenza massima) e meno del 2% di tempo la potenza erogata è superiore al 60% della massima. Infatti, come è possibile vedere anche dal diagramma coppia- numero di giri (figura 8.16) il motore lavora molto poco nella zona vicino alla curva di pieno carico.

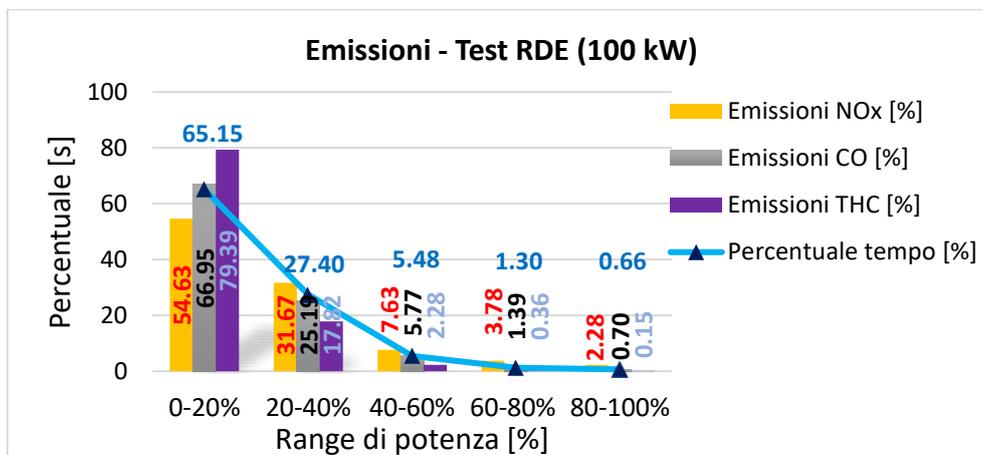


Figura 8.22 Percentuale di tempo e massa di NOx per fasce di potenza erogata dal motore – Test RDE (100 kW)

In figura 8.23 è mostrato il grafico per il ciclo NRTC. Per tale ciclo i valori di coppia e numero di giri sono imposti quindi la percentuale di tempo trascorsa in ogni fascia di potenza (valore percentuale) dovrebbe essere la stessa indipendentemente dalla taratura. Tuttavia, se si fa un confronto con l’analogo grafico fatto per la taratura da 75 kW (figura 7.11) si nota qualche differenza nelle percentuali di tempo. Questo perché, come detto prima, i dati utilizzati sono sperimentali e nonostante l’elevata precisione del sistema che gestisce l’erogazione di potenza del motore e il freno dinamometrico, si hanno comunque degli scostamenti tra i valori desiderati di coppia e numero di giri e quelli reali.

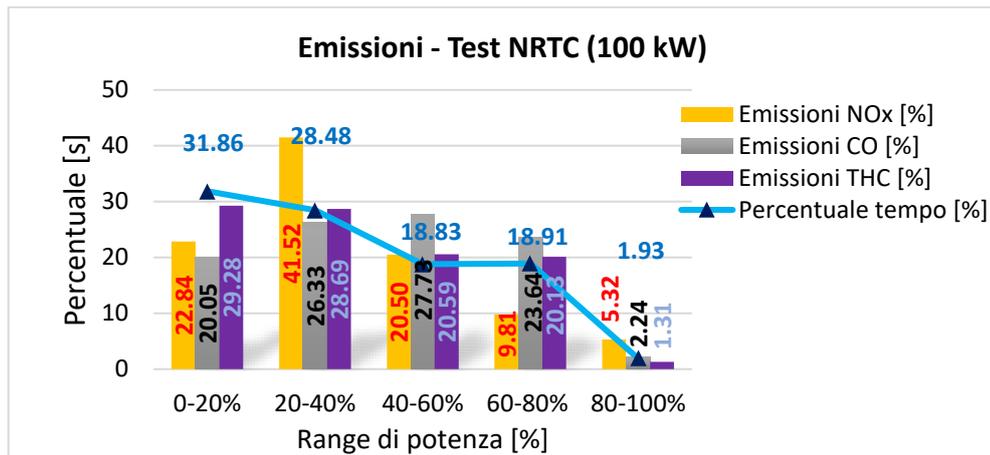


Figura 8.23 Percentuale di tempo e massa di NOx per fasce di potenza erogata dal motore – Test NRTC (100 kW)

In figura n. 8.24 il grafico delle emissioni specifiche per la taratura da 100kW. In questo caso la percentuale di lavoro fatta nel range di potenza 0-40% è pari a più del 76% del lavoro totale nel ciclo contro circa il 54% della taratura da 75kW. Nella fascia di potenza 60-100% la quantità di lavoro è inferiore al 9% mentre con l’altra taratura ammontava al 17% circa del totale.

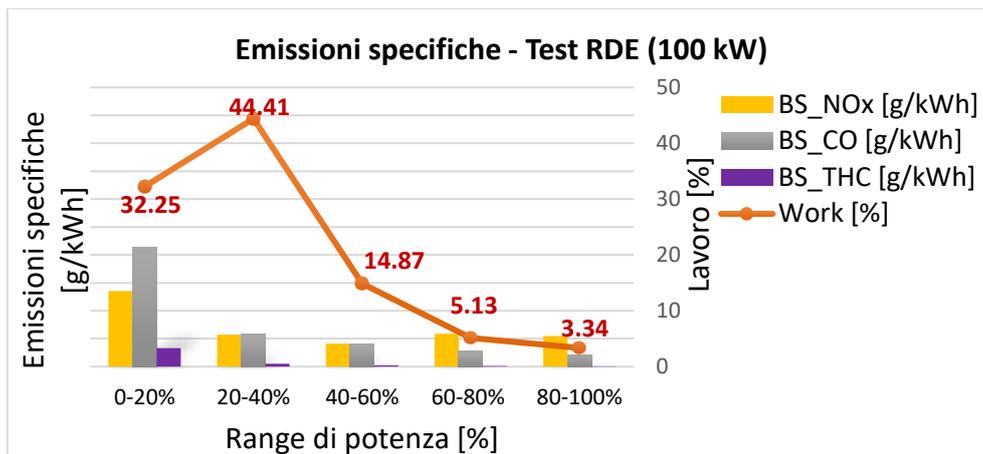


Figura 8.24 Percentuale di lavoro e valori delle emissioni specifiche medie per fasce di potenza erogata dal motore -Test RDE (100kW)

In figura n. 8.25 è mostrato il grafico delle emissioni relativo al test NRTC per la taratura da 100kW. Anche per questa taratura si nota che il valore delle emissioni specifiche di NO<sub>x</sub> decresce fino al range di potenza 60-80% mentre risale nel range di potenza più alta.

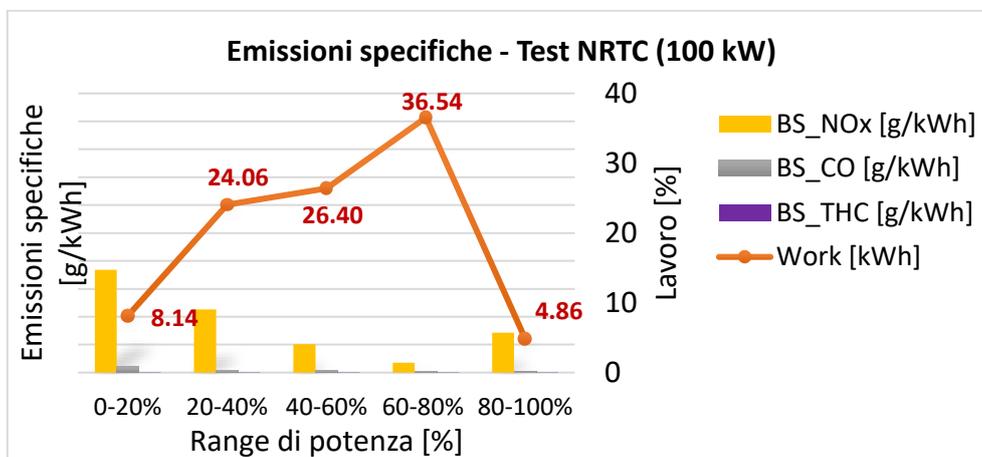


Figura 8.25 Percentuale di lavoro e valori delle emissioni specifiche medie per fasce di potenza erogata dal motore - Test NRTC (100kW)

## 9 Conclusioni

La fase di monitoraggio in servizio, come già accennato, permetterà di raccogliere informazioni sulle emissioni di un gran numero di motori utilizzati in ambito NRMM. Una volta terminata, verrà fissato un limite da rispettare per il fattore di conformità.

I test eseguiti sul motore monocilindrico hanno permesso di stimare l'affidabilità delle misure della strumentazione PEMS utilizzata. Si sono rilevati scostamenti importanti sulla misura dei gas di scarico e questo rappresenta un limite tecnologico, sul quale si lavora attualmente, all'utilizzo dei PEMS anche sui motori di piccola taglia.

I test su veicolo hanno dimostrato come ci sia una differenza molto marcata sulle emissioni di ossidi di azoto in un ciclo reale rispetto al ciclo omologativo. Ciò dipende in parte dal fatto che il motore lavora in punti diversi, in termini di coppia e numero di giri, e anche alla diversa precisione delle misure. Infatti, questa dipende sia dal valore misurato sia dalla concentrazione del gas utilizzato per la taratura. Grazie al sistema SCR, le concentrazioni di NO e NO<sub>2</sub> allo scarico sono relativamente basse quindi si sarebbe potuto utilizzare una concentrazione dei gas di span più vicina ai valori riscontrati nel ciclo ma che avrebbe comunque permesso di coprire i picchi di emissioni che si vedono soprattutto nella fase iniziale. Inoltre, anche il calcolo del lavoro sul ciclo reale è meno preciso rispetto a quello eseguito in cella motore poiché deriva dalla stima della quantità di combustibile iniettata, letta dalla ECU. È importante valutare questo punto perché da esso dipenderanno le emissioni specifiche e quindi anche il calcolo del fattore di conformità.

Quindi l'introduzione dei PEMS consentirà, in futuro, di avere un controllo più stretto anche sulle emissioni reali di motori destinati alle applicazioni non stradali. Per quelli con centralina elettronica questo porterà senza dubbio ad estendere il livello di attenzione ai punti di funzionamento del motore, in termini di coppia e numero di giri, più frequenti in un ciclo reale. Infatti, nel caso studiato si è visto come questi siano diversi da quelli del ciclo omologativo.

Un aspetto interessante sarebbe quello di studiare l'efficienza del sistema SCR durante tale ciclo riproducendo lo stesso all'interno della cella motore. Questo consentirebbe di capire se è necessario ottimizzare il sistema di post trattamento dei gas di scarico per poter rispondere alle esigenze di un ciclo reale.

Per i motori di piccola taglia, che non dispongono di centralina elettronica, il fattore di conformità verrà calcolato utilizzando il metodo basato sulla massa di CO<sub>2</sub>. Quindi anche la durata del test verrà stabilita solo in base alla quantità di anidride carbonica emessa allo scarico. Al fine di capire se tale metodo sia soddisfacente (o ci sia la necessità di equipaggiare la macchina in modo da poter rilevare direttamente la coppia e il numero di giri) potrebbe essere utile eseguire dei test su tali motori per effettuare un confronto con il metodo basato sul lavoro.

## Appendice A

Le figure presentate in questa appendice fanno riferimento all'analisi di correlazione dei dati acquisiti con il PEMS e il banco analisi. In particolare, si mostrano i risultati relativi alle emissioni di NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub> e THC per i test n°2, 3 e 4. Per il test n°3 sono presenti i soli dati del modo 1 e 2 poiché, come già accennato nel paragrafo 4.2, a causa di un problema con il recorder è stato possibile campionare, in continuo, solo questi. Si hanno invece i valori medi, in ciascun modo, del banco analisi poiché acquisiti separatamente e per questi è possibile vedere la correlazione nel paragrafo citato poco prima.

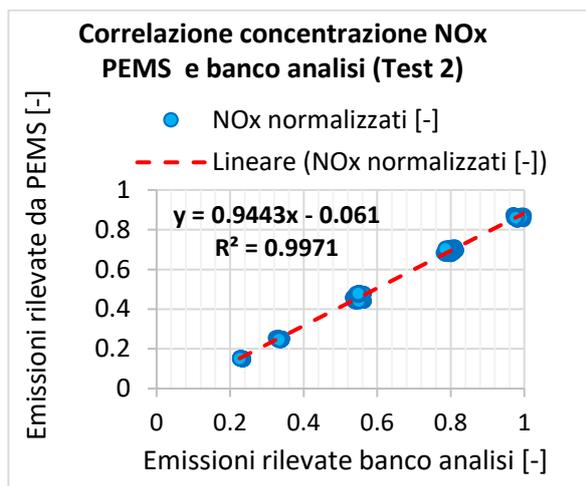


Figura A.1 Correlazione concentrazione di NOx rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 2

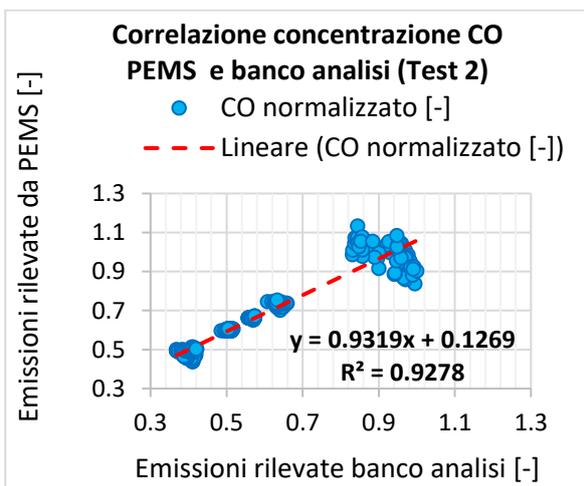


Figura A.2 Correlazione concentrazione di CO rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 2

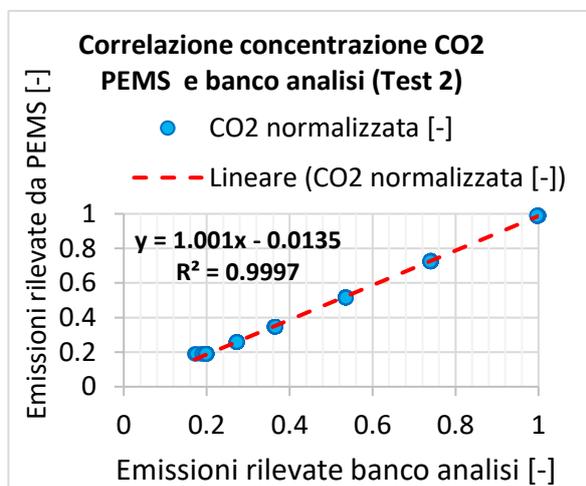


Figura A.3 Correlazione concentrazione di CO2 rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 2

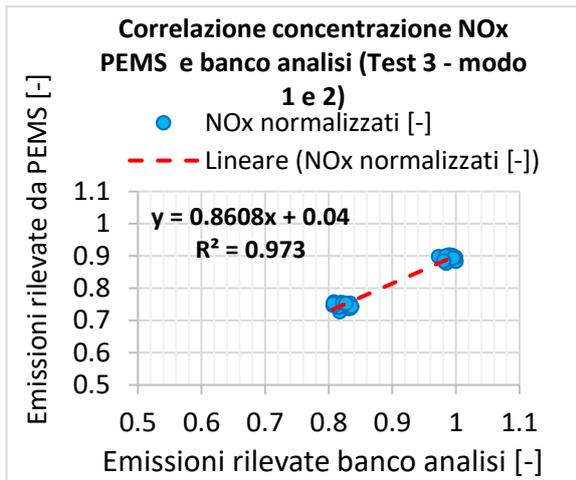


Figura A.4 Correlazione concentrazione di NOx rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 3

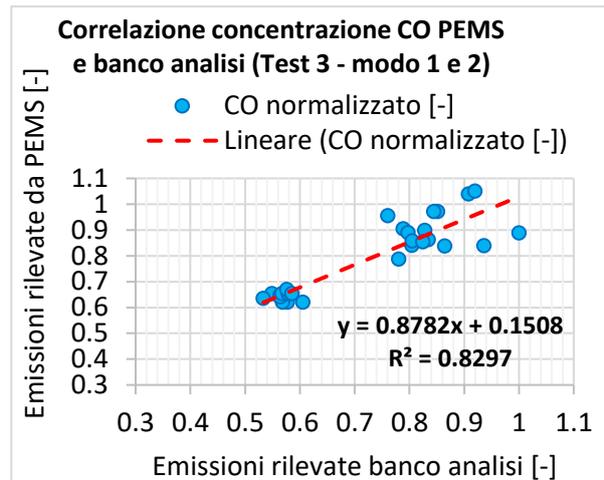


Figura A.5 Correlazione concentrazione di CO rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 3

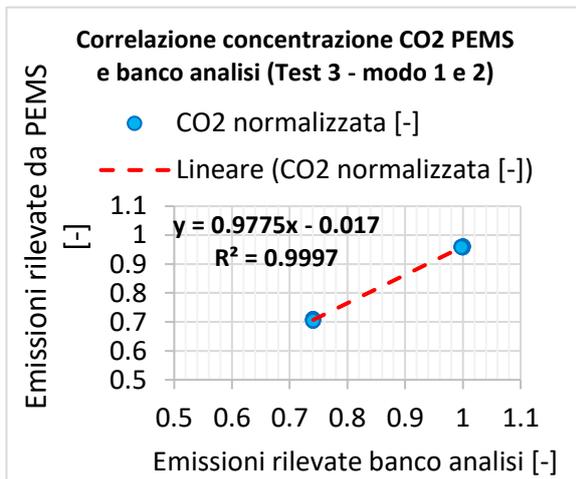


Figura A.6 Correlazione concentrazione di CO2 rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 3

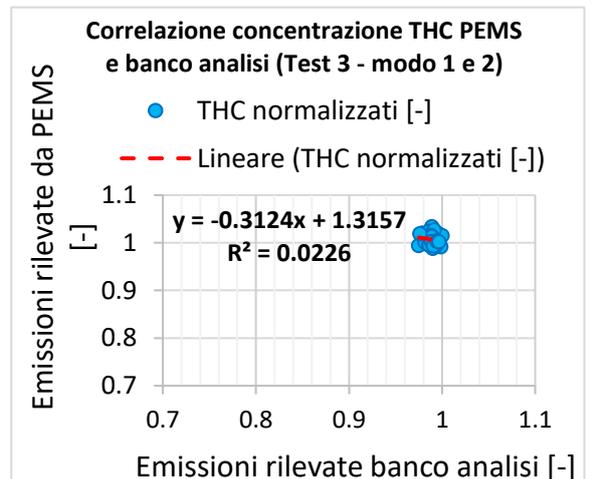


Figura A.7 Correlazione concentrazione di THC rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 3

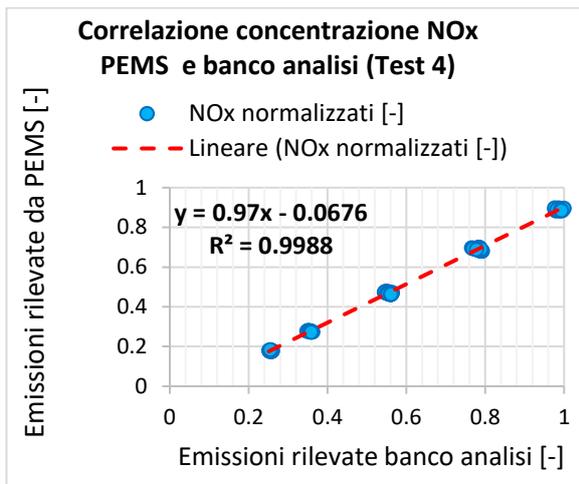


Figura A.8 Correlazione concentrazione di NOx rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 4

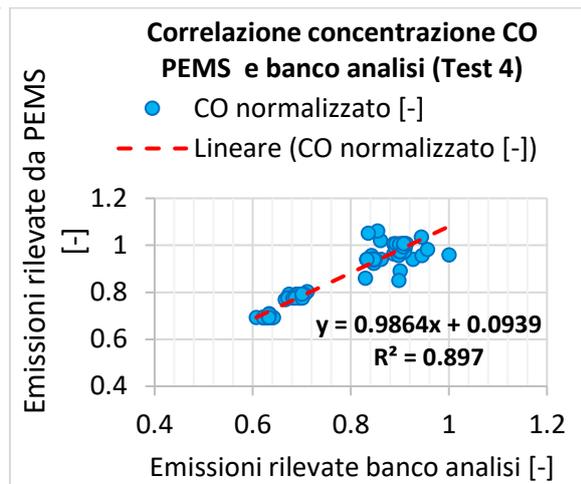


Figura A.9 Correlazione concentrazione di CO rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 4

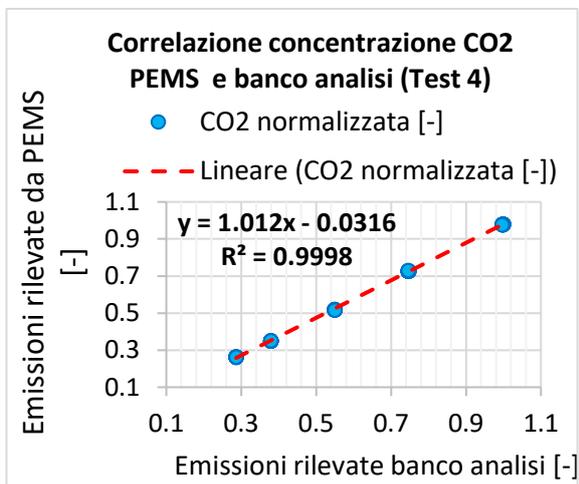


Figura A.10 Correlazione concentrazione di CO2 rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 4

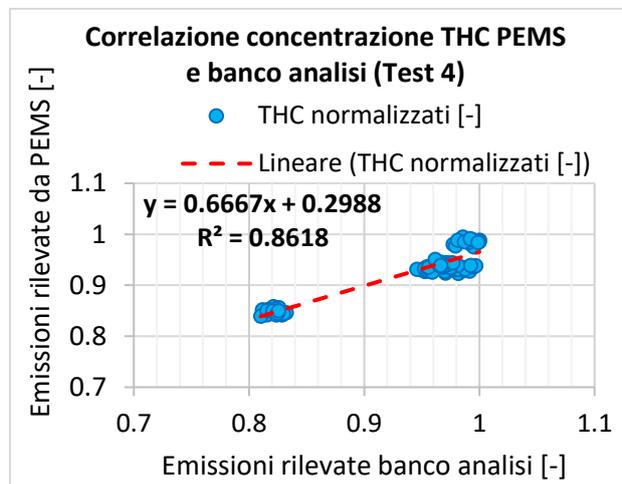


Figura A.11 Correlazione concentrazione di THC rilevata dal PEMS e dal banco analisi - Test 4

## 10 Bibliografia

- [1] «EUROPEAN COMMISSION,» 25 Settembre 2014. [Online]. Available:  
[http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-14-1044\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-14-1044_en.htm). [Consultato il giorno 10 Agosto 2018].
- [2] D. Etheridge e M. Sandberg, *Building ventilation : theory and measurement*, New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [3] M. Cable, *Calibration: A Technician's Guide*, ISA, 2005, pp. 6-8.
- [4] «DieselNet,» ISO8178, [Online]. Available:  
<https://www.dieselnets.com/standards/cycles/iso8178.php>. [Consultato il giorno 3 Luglio 2018].
- [5] «Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement,» in *ISO 8178-1*, 2006, pp. 45-48.
- [6] *Commission delegated regulation (EU) 2017/654*, Official journal of the European Union, 2016.
- [7] *Commission delegated regulation (EU) 2017/655*, Official journal of the European Union, 2016.
- [8] P. Bonnel, A. Perujo, A. Provenza e P. Mendoza Villafuerte, «Non Road Engines Conformity Based on PEMS,» 2013. [Online]. Available:  
<http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC86958>. [Consultato il giorno 15 Giugno 2018].
- [9] «Regulation No. 49,» 4 Marzo 2013. [Online]. Available:  
<https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2013/R049r6e.pdf>.  
[Consultato il giorno 25 Agosto 2018].