

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Sviluppo di un codice per la rappresentazione dei dati sperimentali e valutazione di grandezze caratteristiche di un motore ad accensione comandata



Relatori:

Prof. Stefano D'Ambrosio

Prof. Roberto Finesso

Candidato:

Mauro Rigoletti

Dedicato a mia mamma.



Sviluppo di un codice per la rappresentazione dei dati sperimentali e valutazione di grandezze caratteristiche di un motore ad accensione comandata

Indice

1 Introduzione.....	9
2 Descrizione dei dati forniti.....	11
2.1 Generalità sulla combustione nei motori si (Spark Ignition).....	11
2.2 Caratteristiche motore.....	11
2.3 Principali grandezze fornite.....	12
3 Rappresentazione grafica dei dati.....	15
3.1 Lettura dati.....	15
3.2 Rappresentazione dei piani quotati.....	17
3.3 Rappresentazione diagrammi collinari.....	17
3.4 Piani quotati delle principali grandezze fornite.....	18
3.5 Curve coppia-potenza-bsfc.....	32
4 Calcolo di rendimenti, combustibile iniettato e del modello di pressione a vuoto.....	33
4.1 rendimento utile.....	33
4.2 Rendimento meccanico.....	33
4.3 Rendimento limite.....	34
4.4 Rendimento termo-fluidodinamico interno.....	34
4.5 Calcolo dei parametri della relazione di Chen-Flynn.....	41
4.6 Calcolo di m_b in funzione dei valori di bsfc.....	43
4.7 Calcolo dei coefficienti di riempimento.....	43
5 Valutazione del ciclo di pressione.....	49
5.1 Descrizione del codice.....	49
5.2 Calcolo della superficie della camera.....	50
5.3 Calcolo del volume della camera.....	50
5.4 Calcolo della massa in camera.....	52
5.5 Calcolo della pressione a motore trascinato.....	52
5.6 Calcolo parametri funzione di Wiebe.....	53
5.7 Calcolo della pressione in camera.....	55
5.8 Calcolo di HRR e NHRR.....	58
5.9 Massima variazione di pressione in camera.....	60
5.10 Calcolo di IMEPH.....	60
5.11 Calcolo di mfb dall'andamento di HRR.....	61

6 Considerazioni su alcuni punti valutati.....	62
6.1 1500 rpm.....	63
6.2 1750 rpm.....	64
6.3 2000 rpm	65
6.4 2500 rpm.....	66
6.5 3000 rpm	67
6.6 4000 rpm.....	68
6.7 5000 rpm.....	69
6.8 5500 rpm.....	70
7 Conclusioni.....	73
 APPENDICE A	
Elenco dei simboli, delle costanti e delle notazioni.....	75
 APPENDICE B	
Codici.....	76
PianiQuotati.....	72
Ricostruzione ciclo di pressione.....	85
Main.....	85
Wiebe	87
Pressure_Woschni.....	88
 APPENDICE C	
Cenni sull'approccio Multi-Wiebe.....	96
 APPENDICE D	
Cenni sulla valutazione dell'efflusso attraverso le valvole.....	97
Bibliografia e fonti.....	99

Capitolo 1

Introduzione

L'analisi dei dati sperimentali e la loro simulazione risultano sempre più importanti durante la progettazione di un motore a combustione interna cercando di ridurre il numero delle stesse prove sperimentali, generalmente molto onerose in termini di tempi e di costi.

In commercio sono presenti programmi di simulazione (es. GT-Power) utili a simulare le caratteristiche di funzionamento di un motore ma è necessario avere una conoscenza approfondita e dettagliata delle caratteristiche geometriche del propulsore e delle condizioni al contorno da fornire in input.

In questa trattazione si cerca di fornire un codice aperto, implementato in MATLAB, utile sia a costruire i piani quotati relativi alle grandezze fornite in input come dati sperimentali, sia a calcolare ulteriori grandezze secondarie (es rendimenti, coefficienti di riempimento...) che a valutare l'andamento del ciclo di pressione e del rilascio di calore secondo un modello 0-D, costruito conoscendo le caratteristiche principali del motore (corsa, alesaggio, comando valvole...).

I risultati calcolati possono essere confrontati con gli stessi dati sperimentali forniti, in particolare con i valori di pressione massima, con i valori di variazione massima della pressione raggiunti in camera e con i valori pressione media indicata lorda.

Capitolo 2

Descrizione dei dati forniti

2.1 GENERALITA' SULLA COMBUSTIONE NEI MOTORI SI (Spark Ignition)

Un motore ad accensione comandata utilizza combustibili a bassa reattività e che quindi necessitano di un innesco della combustione esterno fornito dalla scintilla tra gli elettrodi della candela.

Il combustibile è introdotto molto in anticipo rispetto all'istante di accensione permettendo di avere una miscela pressoché omogenea che viene introdotta in camera di combustione durante la fase di aspirazione (motori PFI); nella successiva corsa di compressione a valvole chiuse raggiunge pressioni dell'ordine della decina di bar e temperature nell'ordine dei $600 \div 700$ K.

Alcuni istanti prima che il pistone raggiunga il punto morto superiore avviene l'innesco della combustione attraverso la scintilla.

La combustione si propaga quindi con un fronte emisferico a partire dal punto di innesco della scintilla ad una velocità che è regolata dalla turbolenza in camera e la frazione di massa bruciata segue quindi un andamento descritto dalla *funzione di Wiebe*.

La velocità di combustione risulta massima per valori molto vicini al rapporto stechiometrico di miscelazione che deve essere quindi mantenuto praticamente costante ($\alpha \simeq \alpha_{st} = 14.6$).

Si parla quindi di *combustione turbolenta premiscelata*, e dato che l'intensità di turbolenza è proporzionale alla velocità di rotazione del motore permette di raggiungere regimi piuttosto elevati (fino a oltre 20.000 rpm nel caso di motori ad alte prestazioni).

L'andamento della pressione in camera può essere previsto attraverso un modello zero-dimensionale a cui sono abbinati un modello di andamento della frazione di massa bruciata, di scambio termico a parete, il primo principio della termodinamica e la legge di variazione del volume della camera.

2.2 CARATTERISTICHE MOTORE

I dati forniti sono relativi al motore Fiat 1.4 FIRE (figura 1) capace di sviluppare 170 CV @6750 rpm (versione turbocompressa) munito di sistema Multi-Air che permette l'attuazione di alzata delle valvole variabile grazie ad un sistema elettro-idraulico.

Il propulsore è quindi un 4 cilindri in linea di 1368 cm^3 di alesaggio $d=72 \text{ mm}$ e corsa $c=84 \text{ mm}$.

Il rapporto di compressione geometrico risulta $\epsilon = 9.8$, mentre il rapporto di compressione effettivo può essere ridotto fino al valore minimo di 5.2 nei carichi inferiori grazie al sistema di *variable valve timing* caratteristico del Multi-Air.



Figura 1: motore Fiat 1.4 FIRE Multi-Air

2.3 PRINCIPALI GRANDEZZE FORNITE

Il foglio di calcolo fornito contiene i dati sperimentali di 176 grandezze misurate in 159 punti di prova (ciascuno caratterizzato dal valore $rpm \times bmep$).

Di seguito vengono elencate le principali grandezze utilizzate nella trattazione:

RPM_SET: velocità di rotazione del motore impostata [rpm]

PME_SET: pressione media effettiva dichiarata [bar]

AL05P0: valore medio sui 4 cilindri dell'angolo di 5% di massa bruciata [CA°]

AL05Pi: angolo di 5% di massa bruciata relativo al cilindro i -esimo ($i=0\div4$) [CA°]

AL10P0: valore medio sui 4 cilindri dell'angolo di 10% di massa bruciata [CA°]

AL10Pi: angolo di 10% di massa bruciata relativo al cilindro i -esimo ($i=0\div4$) [CA°]

AL50P0: valore medio sui 4 cilindri dell'angolo di 50% di massa bruciata [CA°]

AL50Pi: angolo di 50% di massa bruciata relativo al cilindro i -esimo ($i=0\div4$) [CA°]

AL90P0: valore medio sui 4 cilindri dell'angolo di 90% di massa bruciata [CA°]

AL90Pi: angolo di 90% di massa bruciata relativo al cilindro i -esimo ($i=0\div4$) [CA°]

APMAX0: valore medio dell'angolo relativo alla massima pressione in camera [CA°]

APMAXi: angolo a cui si ha la massima pressione in camera relativo
al cilindro i -esimo ($i=0\div4$) [CA°]

ANGVVAECONBJ: angolo di chiusura valvola di aspirazione [CA°]

bsfc_d: valori di consumo specifico [g/kWh]

COPPIA: coppia utile all'albero [Nm]

GLAMLAM: valore lambda [-]

IMEP0: media dei valori di pressione media indicata "netta" dei cilindri [bar]

IMEPi: valore di pressione media indicata "netta" di ciascun cilindro i -esimo [bar]

IMEPH0: media dei valori di pressione media indicata "lorda" dei cilindri [bar]

IMEPHi: valore di pressione media indicata "lorda" di ciascun cilindro i -esimo [bar]

IMEPL0: media dei valori di pompaggio dei cilindri [bar]

IMEPLi: valore di pompaggio di ciascun cilindro i -esimo [bar]

MEGR_TOT_HB: massa di EGR per ogni corsa di aspirazione [mg/stk]

P_u: potenza utile [kW]

P_atmo: pressione atmosferica [mbar]

PA_TUR_IN: pressione assoluta ingresso turbina [mbar]

PMAX0: media sui cilindri del valore di pressione massima in camera [bar]

PMAX i : valore di pressione massima in camera per il cilindro i -esimo [bar]

POLYC0: valore medio tra i cilindri degli esponenti della politropica di compressione [bar]

POLYC i : valore dell'esponente di compressione per ciascun cilindro i -esimo [bar]

POLYE0: valore medio tra i cilindri degli esponenti della politropica di espansione [bar]

POLYE i : valore dell'esponente di espansione per ciascun cilindro i -esimo [bar]

PREATM: pressione atmosferica in cella rilevata dalla centralina [mbar]

PREM: pressione collettore di aspirazione [mbar]

PRMAX0: media sui cilindri del valore di massima variazione di pressione in camera [bar/°]

PRMAX i : valore di massima variazione di pressione in camera per il cilindro i -esimo [bar/°]

QFUELINJ_V_ i : quantità di combustibile iniettato per corsa di aspirazione
del cilindro i -esimo [mg/stk]

QFUELOBJ: valore obbiettivo del combustibile iniettato per ciascun cilindro in ogni corsa di
aspirazione [mg/stk]

RCEFF: rapporto di compressione effettivo valutato con l'istante angolare di chiusura delle valvole [-]

T_COLASP: temperatura aria nel collettore di aspirazione [°C]

T_TUR_IN: temperatura ingresso turbina [°C]

WGDUTY: duty cycle regolazione valvola wastegate [%]

Capitolo 3

Rappresentazione grafica dei dati

3.1 LETTURA DATI

I dati vengono forniti tabulati in un file Excel in cui ogni riga rappresenta un punto rpm x bmep e ogni colonna rappresenta una grandezza valutata (figura 2).

La lettura con codice Matlab avviene tramite la funzione `"xlsread"` (figura 3) che suddivide i valori tabulati nel foglio di calcolo in una matrice relativa ai caratteri numerici (N) (figura 4) e in una matrice relativa ai caratteri di testo (T).

Attraverso un ciclo `"for"` (figura 5) vengono escluse le celle vuote della matrice dei caratteri numerici (NaN) in modo da avere una matrice "n righe" e "m colonne" (matrice A con n punti di prova e m grandezze misurate).

I punti di prova sono caratterizzati dai valori di velocità di rotazione del motore (rpm) e di pressione media effettiva (bmep) contenuti rispettivamente nella colonna n°1 e nella colonna n°123 della matrice "A", e sono necessari per costruire una matrice attraverso la funzione `"meshgrid"`, che riceve in input i vettori contenenti tutti i valori "rpm" e "bmep" ordinati in ordine crescente attraverso la funzione `"sort"` (figura 6).

È quindi possibile interpolare i valori di ogni grandezza fornita su tutti i punti della griglia costruita attraverso la funzione `"scatteredInterpolant"` (figura 7) a cui vengono forniti i vettori "rpm", "bmep" e il vettore relativo alla grandezza considerata oltre che la modalità di interpolazione (`"linear"`).

Il codice relativo a questa parte è il codice `"PianiQuotati"` visionabile in APPENDICE B.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	RPM SET	PME SET	AI05P0	AI05P1	AI05P2	AI05P3	AI05P4	AI10P0	AI10P1	AI10P2	AI10P3	AI10P4
2	rpm	bar	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	1500	2	-10,76	-10,06	-12,72	-9,9	-10,37	-7,26	-6,39	-9,37	-6,44	-6,84
5	1500	3	-10,87	-10,32	-12,73	-9,84	-10,59	-7,21	-6,76	-9,28	-5,84	-6,95
6	1500	4	-9,06	-8,87	-10,23	-9,09	-8,03	-5,11	-4,89	-6,43	-5,19	-3,92
7	1500	5	-9,10	-9,34	-9,95	-8,95	-8,16	-5,53	-5,62	-6,58	-5,18	-4,73
8	1500	6	-7,50	-7,8	-8,11	-7,43	-6,66	-4,24	-4,65	-4,78	-4,21	-3,3
9	1500	7	-5,56	-5,92	-6,05	-5,36	-4,89	-2,61	-2,97	-3,13	-2,3	-2,02
10	1500	8	-3,53	-3,97	-4,18	-3,41	-2,54	-0,65	-1,18	-1,24	-0,59	0,4
11	1500	9	-0,84	-0,19	-1,26	-1,42	-0,47	1,92	2,61	1,5	1,3	2,25
12	1500	10	0,35	0,63	0,23	-0,11	0,66	3,09	3,39	2,93	2,55	3,48
13	1500	11	3,69	3,86	3,52	3,36	4,02	6,45	6,6	6,32	6,08	6,78
14	1500	12	7,03	7,02	6,67	7,01	7,4	9,83	9,78	9,43	9,88	10,22
15	1500	13	9,32	8,93	9,61	9,04	9,69	12,07	11,65	12,42	11,79	12,43
16	1500	14	12,15	10,72	12,74	12,63	12,5	14,78	13,33	15,32	15,36	15,1
17	1500	15	15,12	14,18	16,01	15,59	14,68	17,62	16,75	18,48	18,03	17,21
18	1500	16	16,58	15,78	15,77	18,84	15,94	19,05	18,27	18,11	21,42	18,42
19	1500	FULL LOAD	17,19	15,11	16,56	18,98	18,12	19,69	17,58	18,92	21,6	20,68
20												

Figura 2: estratto del file Excel contenente i dati sperimentali forniti, le prime due colonne contengono la velocità di rotazione del motore e la pressione media effettiva impostate

```
16 - [N,T]=xlsread('20150506_PQ_FIRE170CV_OnlyData_v1','Data','A1:FY170');
```

Figura 3: linea di comando del codice per la lettura del file Excel attraverso la funzione `xlsread`, a cui sono forniti il nome del file Excel, il nome del foglio all'interno del file e il range di lettura all'interno del foglio.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	1500	2	-10.7625	-10.0600	-12.7200	-9.9000	-10.3700	-7.2600	-6.3900	-9.3700
3	1500	3	-10.8700	-10.3200	-12.7300	-9.8400	-10.5900	-7.2100	-6.7600	-9.2800
4	1500	4	-9.0550	-8.8700	-10.2300	-9.0900	-8.0300	-5.1100	-4.8900	-6.4300
5	1500	5	-9.1000	-9.3400	-9.9500	-8.9500	-8.1600	-5.5300	-5.6200	-6.5800
6	1500	6	-7.5000	-7.8000	-8.1100	-7.4300	-6.6600	-4.2400	-4.6500	-4.7800
7	1500	7	-5.5550	-5.9200	-6.0500	-5.3600	-4.8900	-2.6100	-2.9700	-3.1300
8	1500	8	-3.5250	-3.9700	-4.1800	-3.4100	-2.5400	-0.6500	-1.1800	-1.2400
9	1500	9	-0.8350	-0.1900	-1.2600	-1.4200	-0.4700	1.9200	2.6100	1.5000
10	1500	10	0.3525	0.6300	0.2300	-0.1100	0.6600	3.0900	3.3900	2.9300
11	1500	11	3.6900	3.8600	3.5200	3.3600	4.0200	6.4500	6.6000	6.3200
12	1500	12	7.0250	7.0200	6.6700	7.0100	7.4000	9.8300	9.7800	9.4300
13	1500	13	9.3175	8.9300	9.6100	9.0400	9.6900	12.0700	11.6500	12.4200
14	1500	14	12.1475	10.7200	12.7400	12.6300	12.5000	14.7800	13.3300	15.3200
15	1500	15	15.1150	14.1800	16.0100	15.5900	14.6800	17.6200	16.7500	18.4800
16	1500	16	16.5825	15.7800	15.7700	18.8400	15.9400	19.0500	18.2700	18.1100
17	1500	NaN	17.1925	15.1100	16.5600	18.9800	18.1200	19.6900	17.5800	18.9200
18	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN

Figura 4: estratto della matrice "N" contenente i caratteri numerici del foglio Excel (i caratteri non numerici sono sostituiti in automatico con l'etichetta "NaN" -Not a Number-)

```

23 - for(i=1:size(N,2)) %colonne
24 -
25 -     m=1;
26 -     w=1;
27 -
28 -     for(j=2:size(N,1)) %righe
29 -
30 -         if(isnan(N(j,i)))
31 -             w=w+1;
32 -             continue;
33 -         end
34 -
35 -         A(m,i)=N(j,i);
36 -
37 -         m=m+1;
38 -
39 -     end
40 -
41 - end

```

Figura 5: ciclo for che per elimina i valori contrassegnati con "NaN", ottenendo una matrice (A) di soli valori numerici

```

41 - bmep=A(:,123);
42 - rpm=A(:,1);
43 -
44 - [Xq,Yq] = meshgrid(sort(rpm),sort(bmep));

```

Figura 6: istruzione di estrazione delle colonne relative alla pressione media effettiva e della velocità di rotazione del motore e successiva costruzione della griglia attraverso la funzione "meshgrid"

```

60 - F=scatteredInterpolant(rpm,bmep,A(:,i),'linear','none');
61 -
62 - vq1 = F(Xq,Yq);

```

Figura 7: determinazione della funzione F e interpolazione dei valori della grandezza i-esima sui punti della griglia (Xq,Yq)

3.2 RAPPRESENTAZIONE DEI PIANI QUOTATI

Successivamente avviene la rappresentazione grafica delle grandezze attraverso la funzione “*surf*” (figura 8) a cui vengono forniti le coordinate X e Y della griglia e i valori interpolati su di essa tramite la funzione “*F*” fornita da “*scatteredInterpolant*” (figura 7).

```

66 - ti=strcat(T(1,i),' ',T(2,i),' ');
67
68 - figure
69 - surf(Xq,Yq,vq1);
70 - title(ti);
71 - xlabel('n [rpm]');
72 - ylabel('bmep [bar]');

```

Figura 8: istruzione di costruzione del grafico attraverso la funzione *surf*; alla linea 66 viene invece costruita una stringa con l'intestazione della colonna relativa alla grandezza che rappresentano quindi il nome e l'unità di misura della grandezza stessa. La stessa stringa fornisce il titolo del relativo grafico (linea 70)

3.3 RAPPRESENTAZIONE DIAGRAMMI COLLINARI

I diagrammi relativi ai rendimenti e al bsfc vengono proposti anche in forma collinare in modo da evidenziare le curve iso-livello dei rispettivi andamenti (figura 10).

Per eseguire questo tipo di grafico viene utilizzata la funzione “*contour*” abbinata alla funzione “*plot*” (figura 9).

La funzione “*contour*” riceve in ingresso i punti della griglia costruita in precedenza con “*meshgrid*”, i valori della grandezza da rappresentare e un vettore (C) contenente i valori di cui si vogliono rappresentare le curve iso-livello.

```

308 - figure
309 - C=[0:0.025:1];
310 - [c,h]=contour(Xq,Yq,eta_u,C);
311 - clabel(c,h);
312 - hold on
313 - plot(rpm_WOT,BMEP_WOT,'--r');
314 - title('eta_u [-]');
315 - xlabel('n [rpm]');
316 - ylabel('bmep [bar]');
317 - drawnow

```

Figura 9: esempio di istruzioni per costruire il diagramma collinare relativo, in questo caso, al rendimento utile

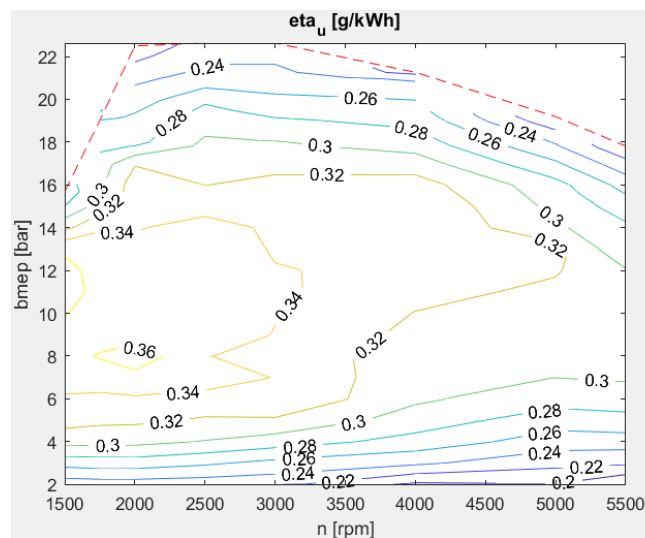
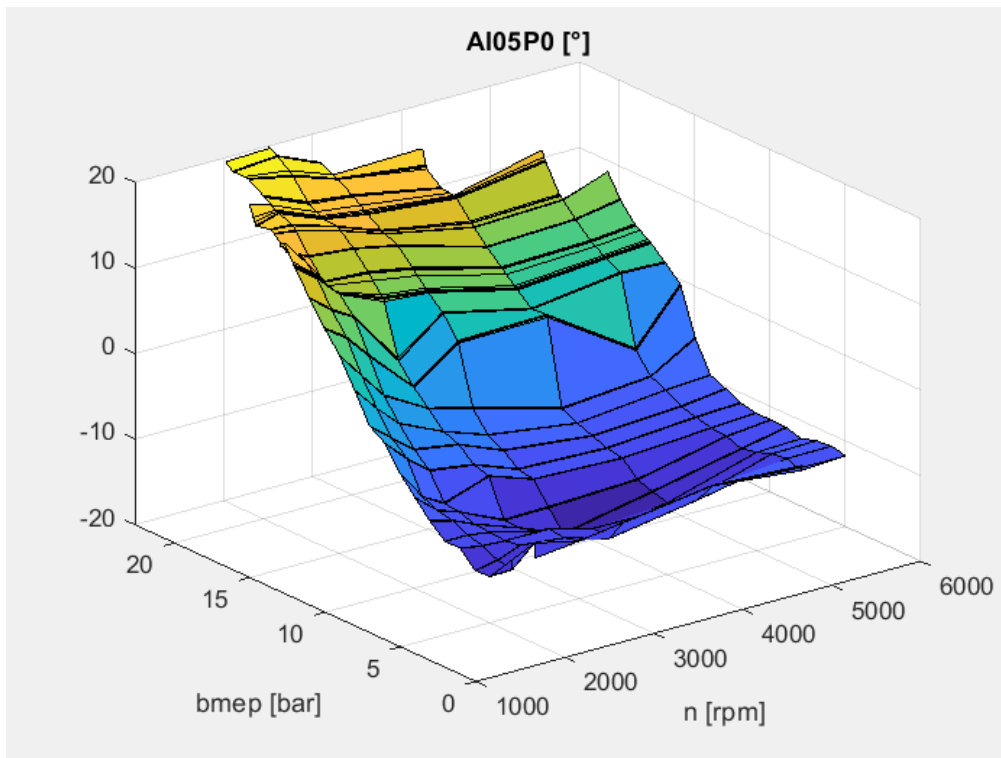


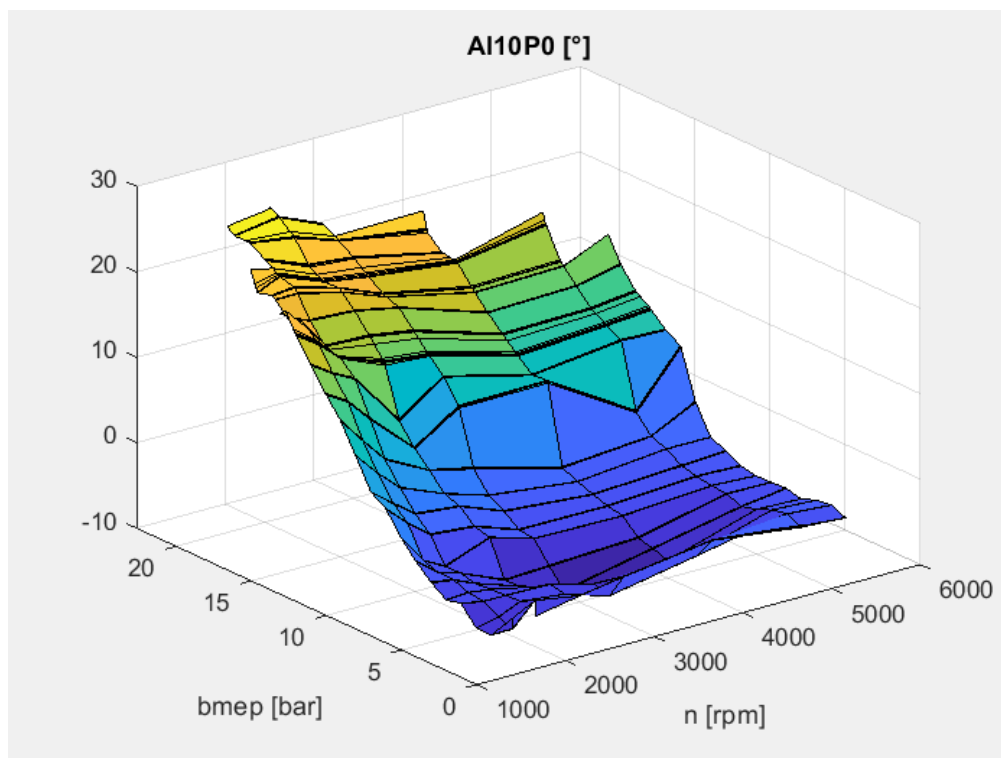
Figura 10: esempio di diagramma collinare relativo all'andamento del rendimento utile. La curva a tratti rossa rappresenta la curva di full load

3.4 PIANI QUOTATI DELLE PRINCIPALI GRANDEZZE FORNITE

AL05P0:

*Figura 11: piano quotato relativo all'angolo medio tra i cilindri di $mfb=5\%$*

AL10P0:

*Figura 12: piano quotato relativo all'angolo medio tra i cilindri di $mfb=10\%$*

AL50P0:

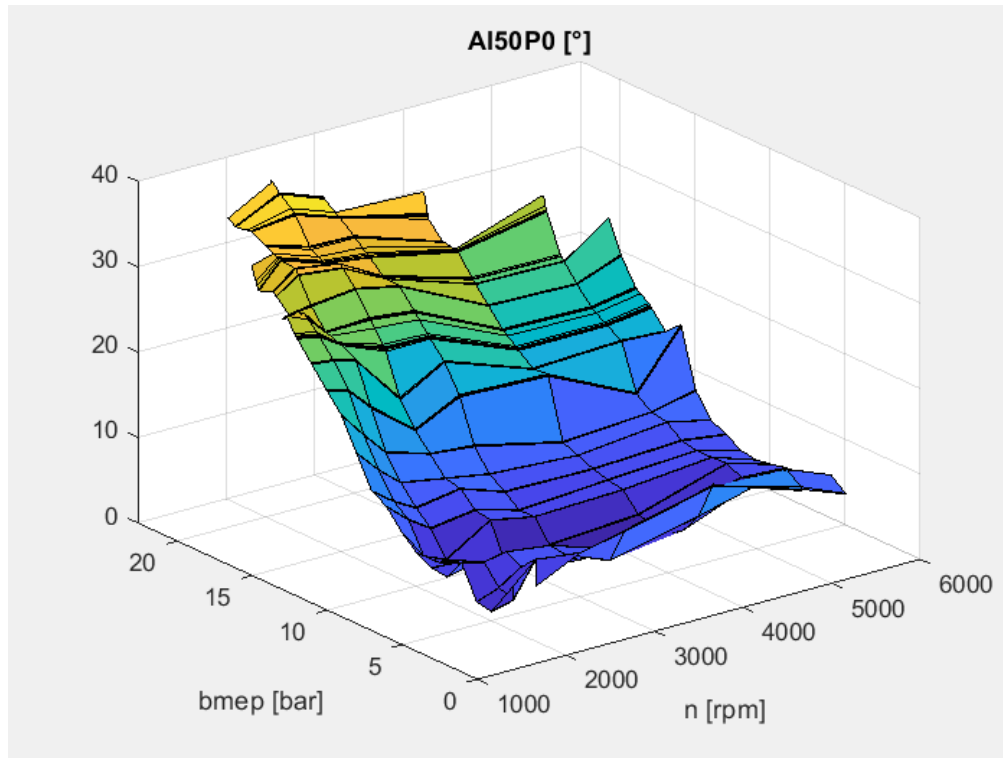


Figura 13: piano quotato relativo all'angolo medio tra i cilindri di $mfb=50\%$

AL90P0:

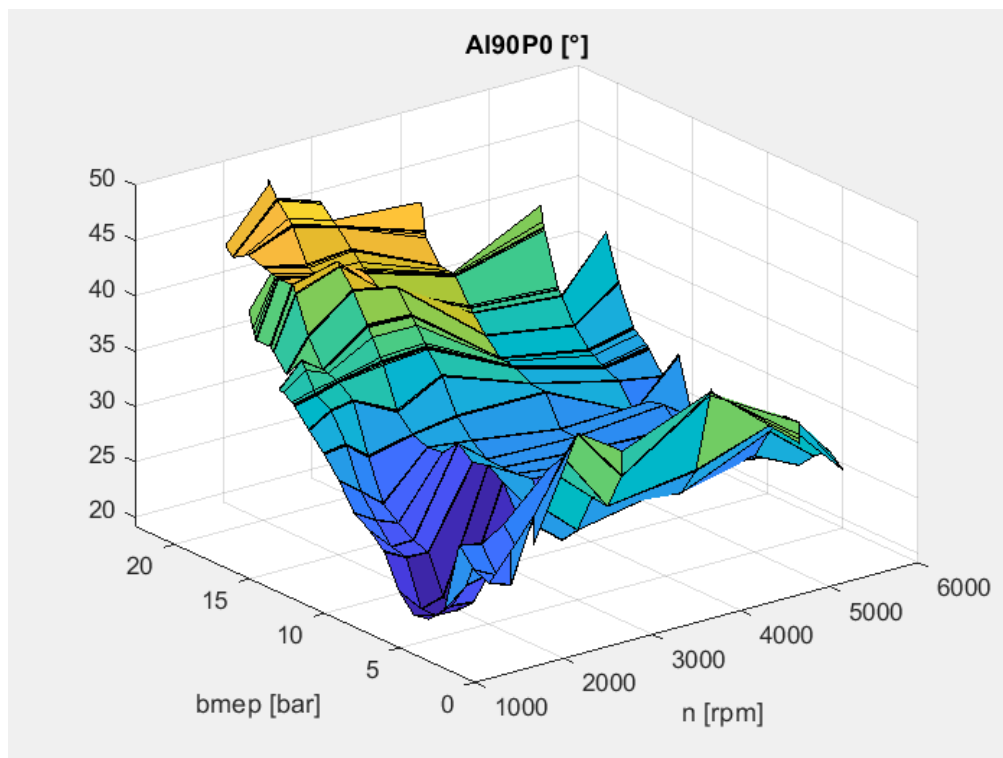


Figura 14: piano quotato relativo all'angolo medio tra i cilindri di $mfb=90\%$

ANGVVAECOBJ:

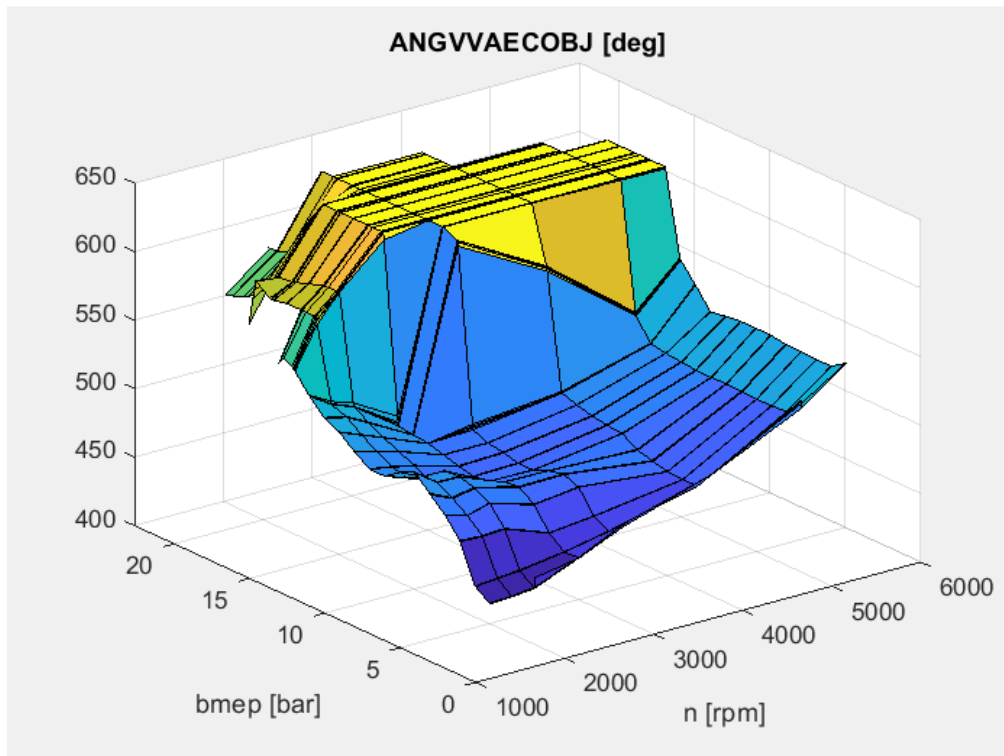


Figura 15: angolo di chiusura valvola di aspirazione rispetto al punto morto di inizio aspirazione

APMAX0:

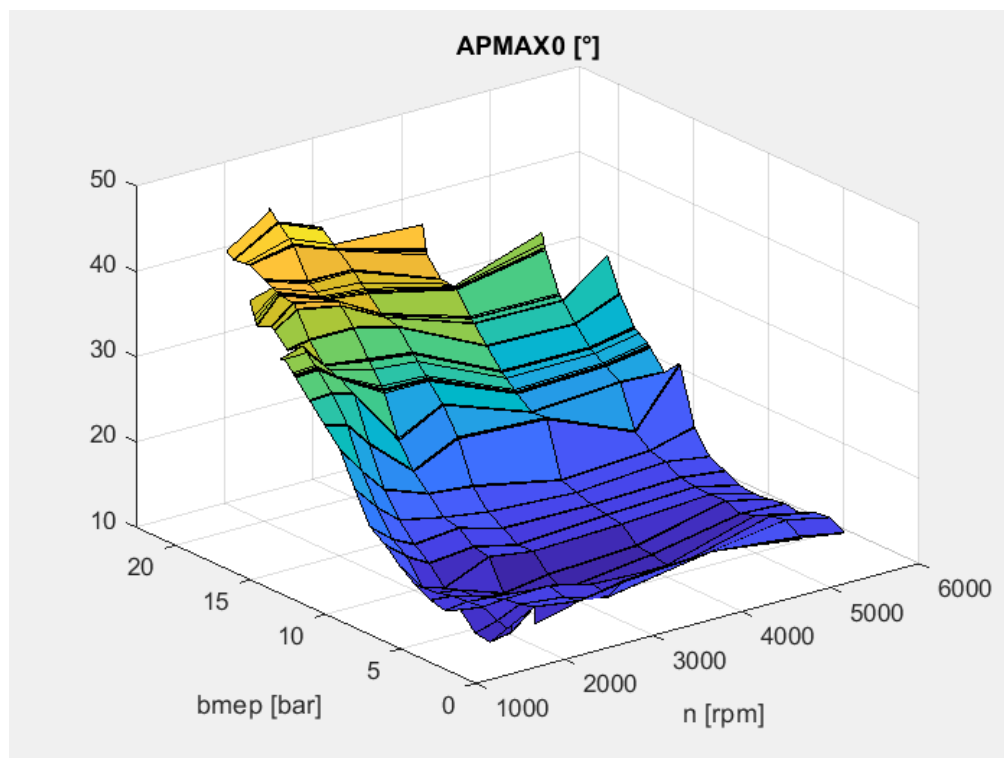


Figura 16: angolo medio tra i cilindri relativo al punto di pressione massima in camera

bsfc_d:

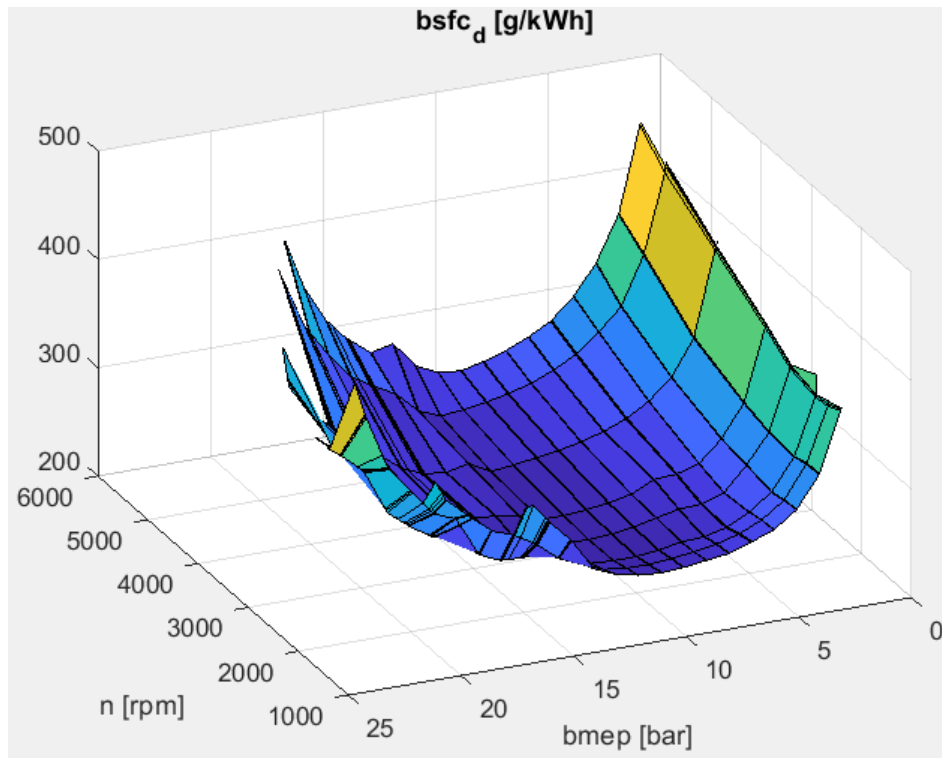


Figura 17: piano quotato relativo all'andamento del consumo specifico dichiarato

COPPIA UTILE:

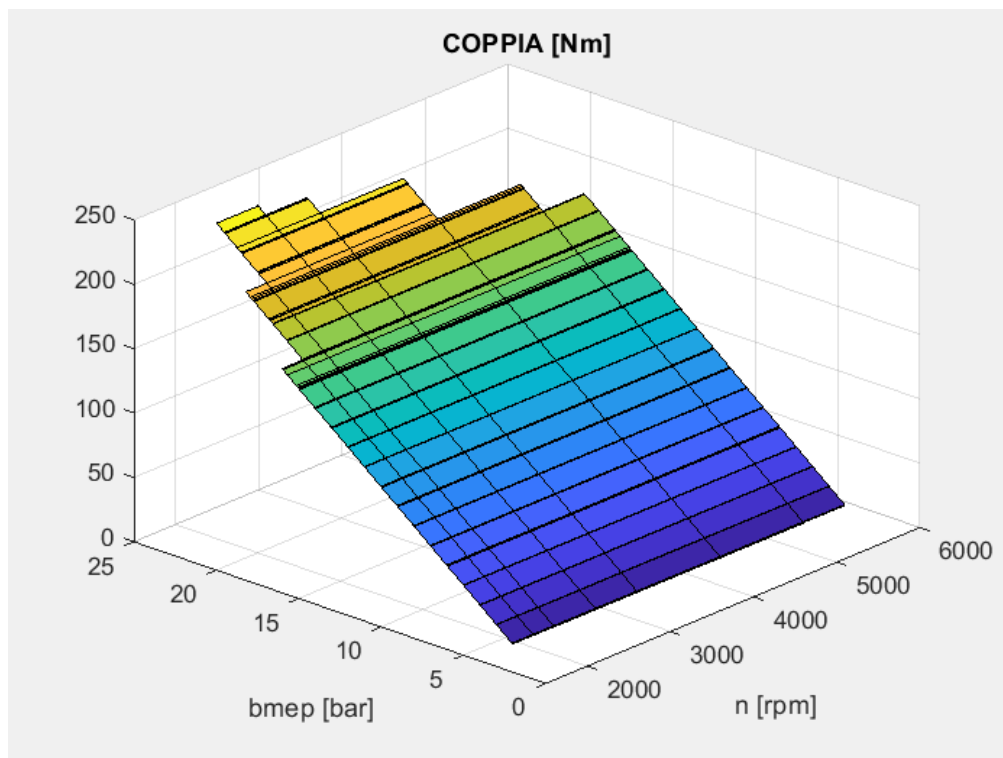


Figura 18: andamento della coppia utile erogata i , è evidente la proporzionalità con l'andamento della pressione media efficace

GLAMLAM:

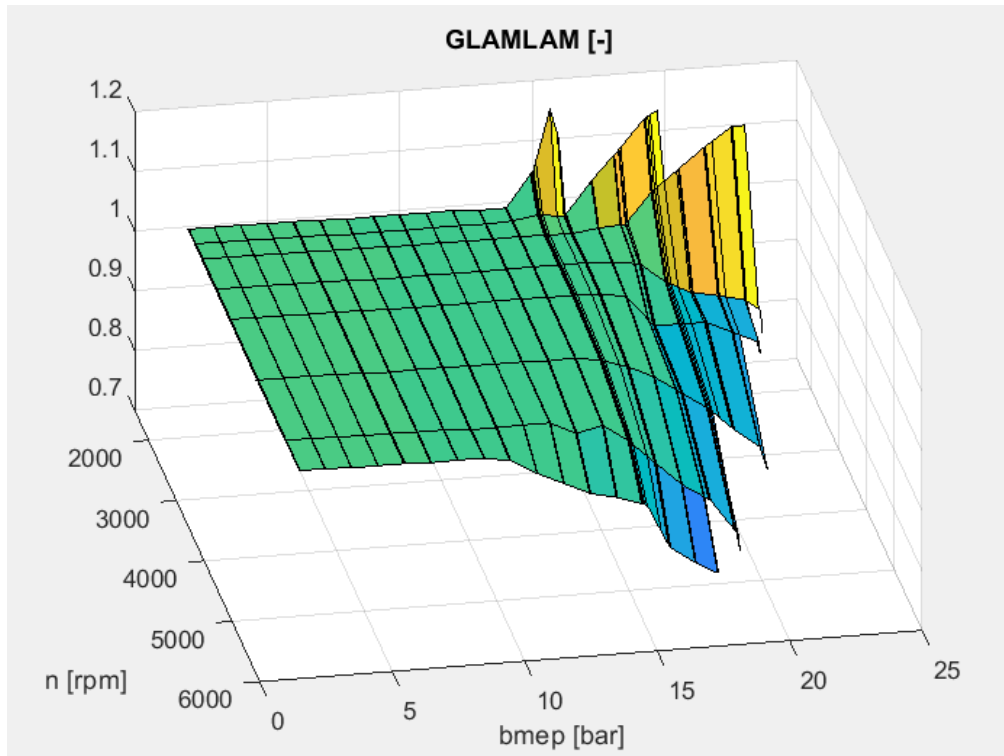


Figura 19: andamento del valore λ , si nota che a carichi e regimi di rotazione alti si ha un arricchimento della miscela

IMEP0:

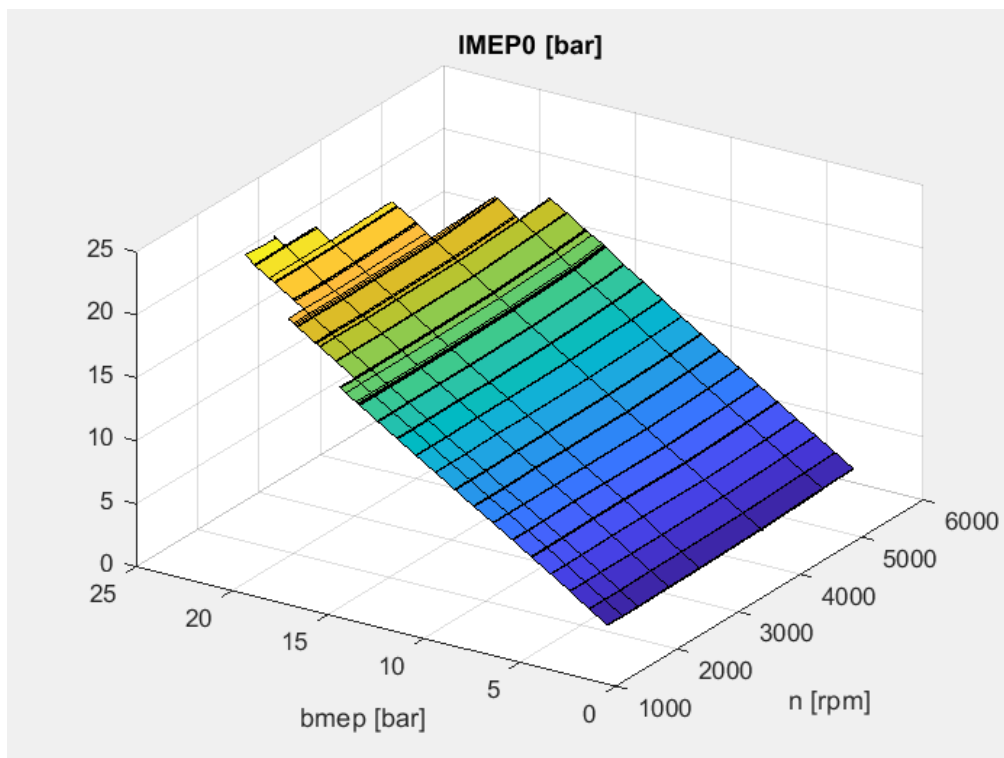


Figura 20: andamento della pressione media indicata netta, si nota il legame stretto con il valore di pressione media efficace

IMEPH0:

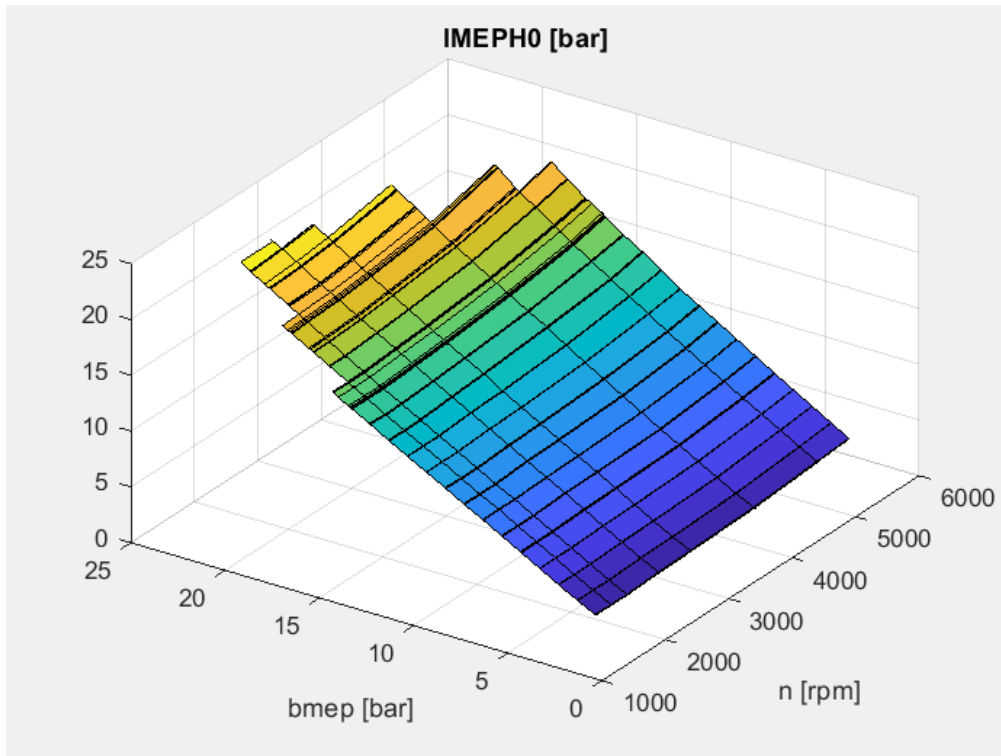


Figura 21: rappresentazione grafica della pressione media indicata lorda, anche in questo caso si nota lo stretto legame con la pressione media efficace

IMEPL0:

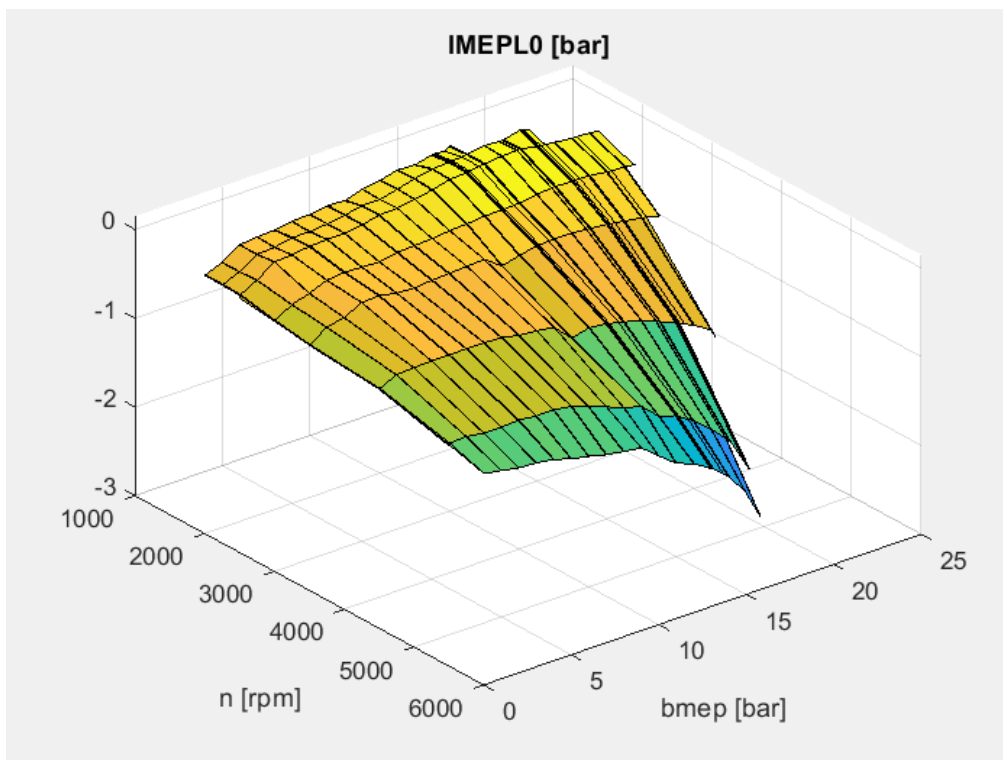


Figura 22: rappresentazione del ciclo di pompaggio, si nota che aumenta in modulo con l'aumentare del carico e del regime di rotazione. Vale $IMEP = IMEPH + IMEPL$

MEGR_TOT_HB:

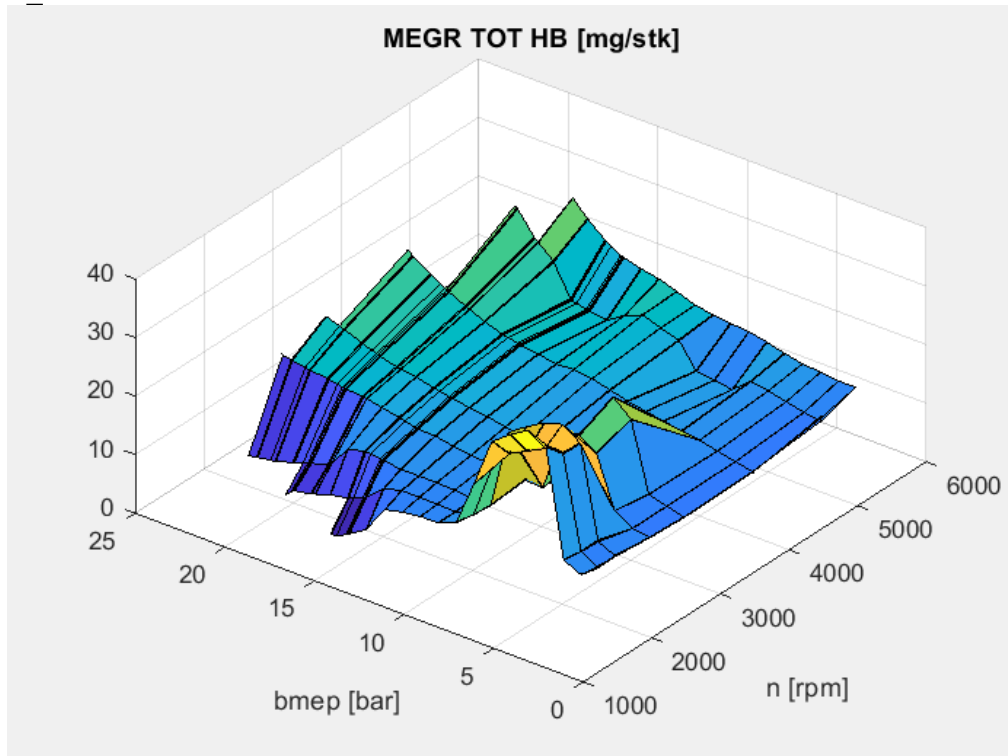


Figura 23: quantità di gas riciccolati, i valori massimi risultano a carichi e velocità di rotazione bassi dove si avrebbero i valori maggiori di parzializzazione della valvola a farfalla

P_u:

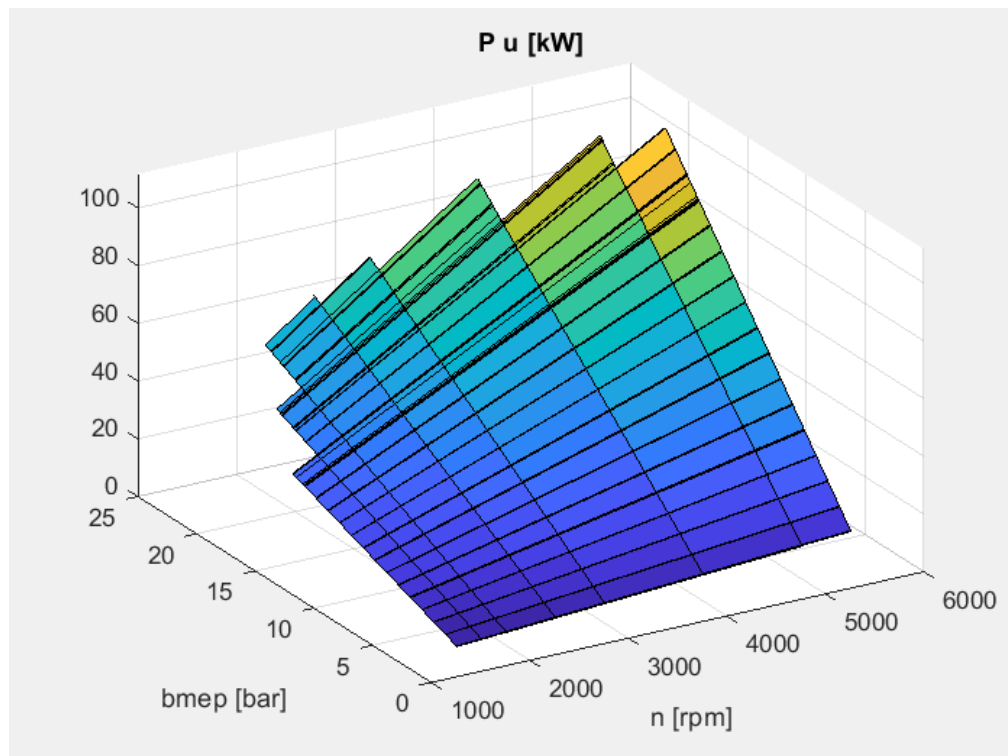


Figura 24: rappresentazione grafica dell'andamento della potenza utile, è abbastanza evidente la proporzionalità sia con il valore di pressione media effettiva che con il regime di rotazione

P_atmo:

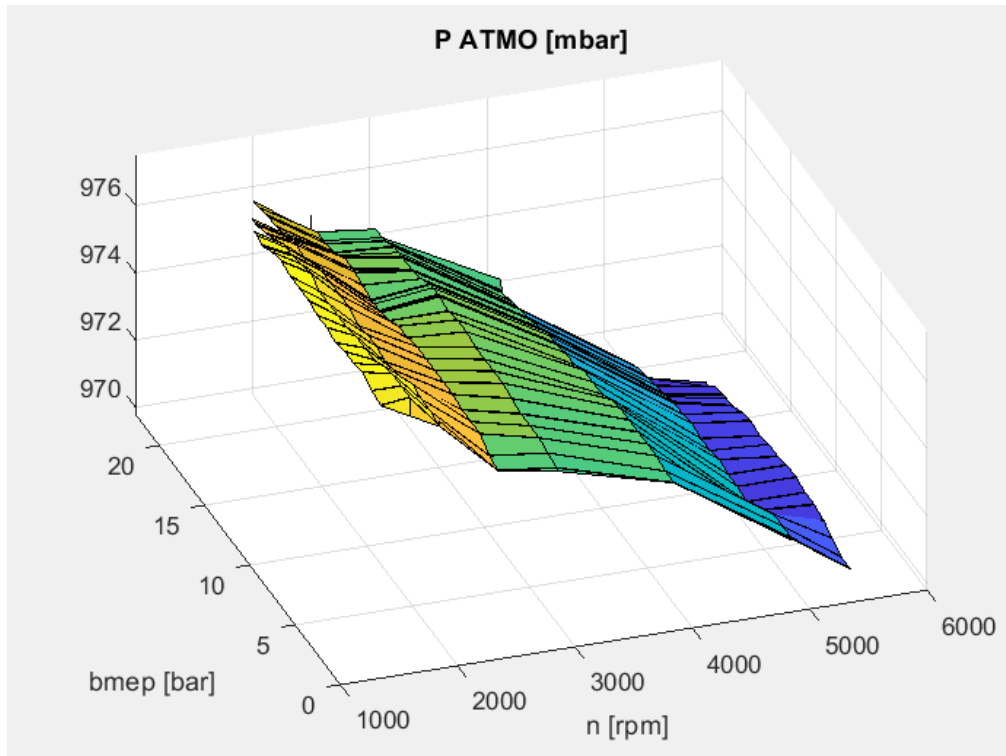


Figura 25: rappresentazione della pressione misurata nell'ambiente di prova, si osserva una deriva del valore della pressione, infatti le prove sono state svolte a partire dai regimi più bassi e dai valori di pressione media efficace minori

PA_TUR_IN:

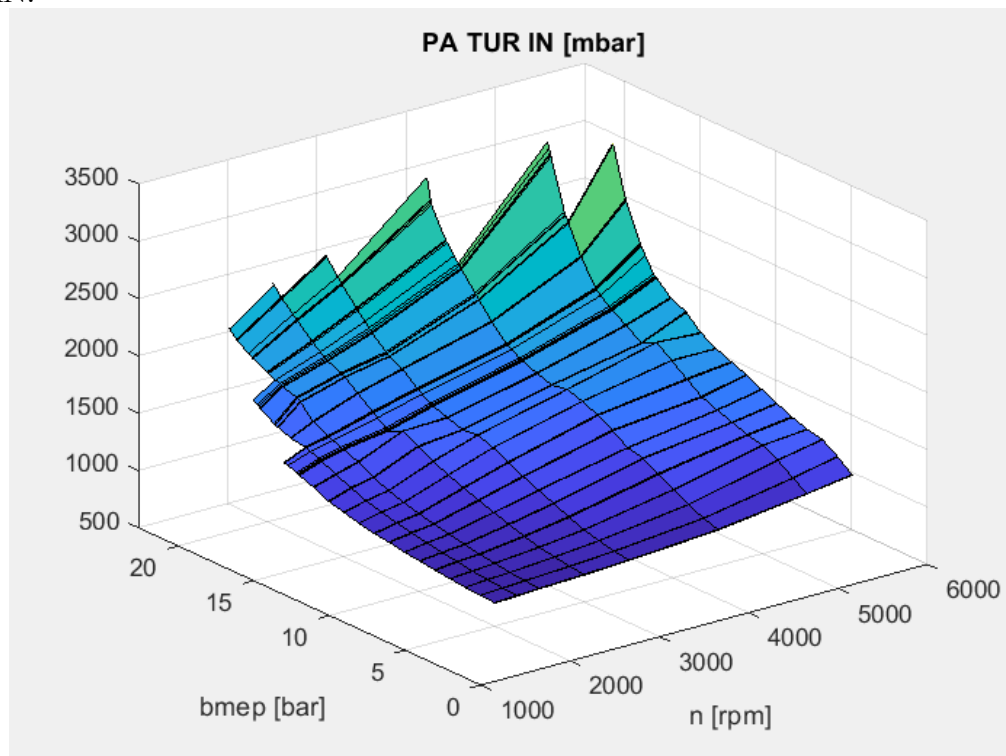


Figura 26: pressione assoluta all'ingresso della turbina, in generale cresce con il carico motore

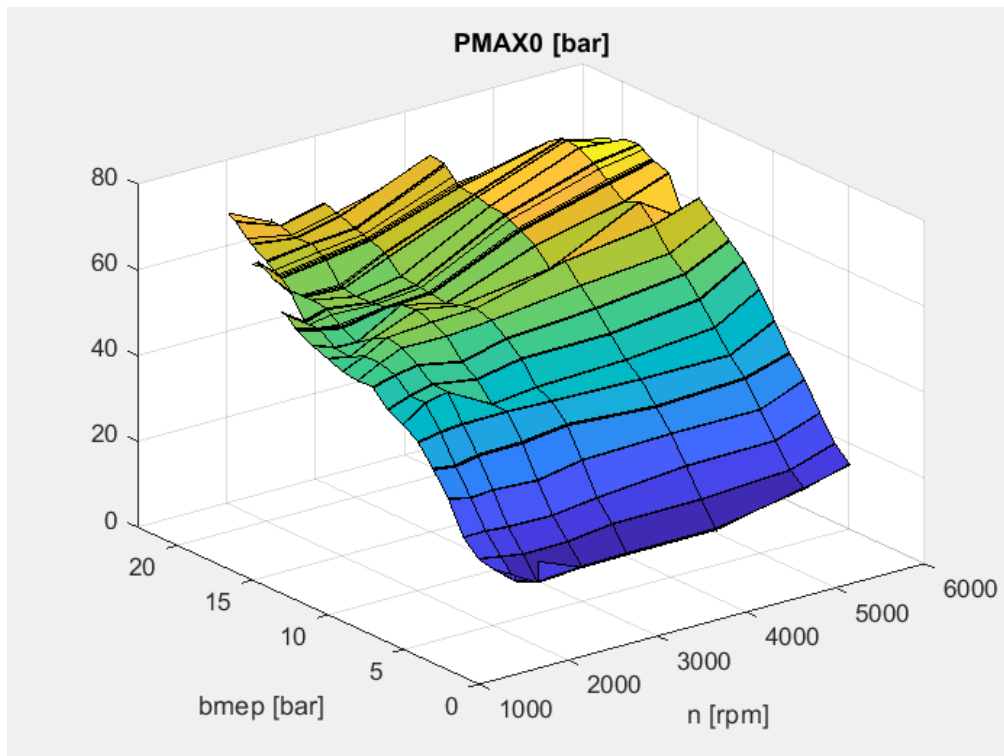
P_{MAX0}

Figura 27: andamento del valore medio tra i cilindri della pressione massima raggiunta in camera

POLYC0

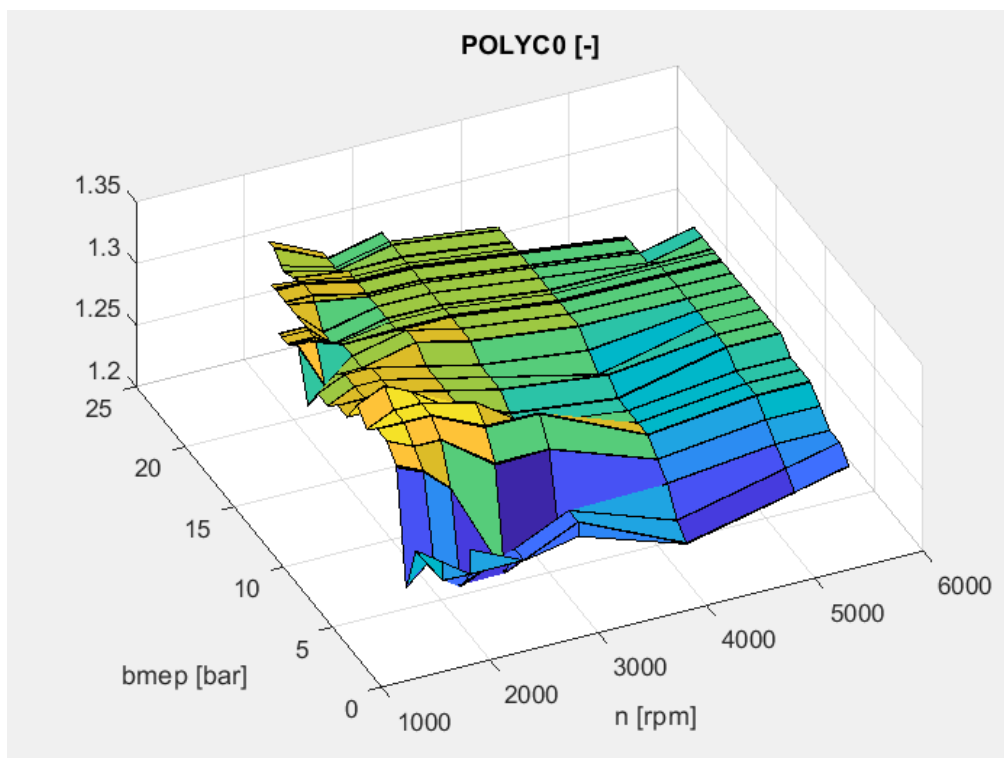


Figura 28: rappresentazione grafica del valore medio tra i cilindri dell'esponente della politropica di compressione

POLYE0:

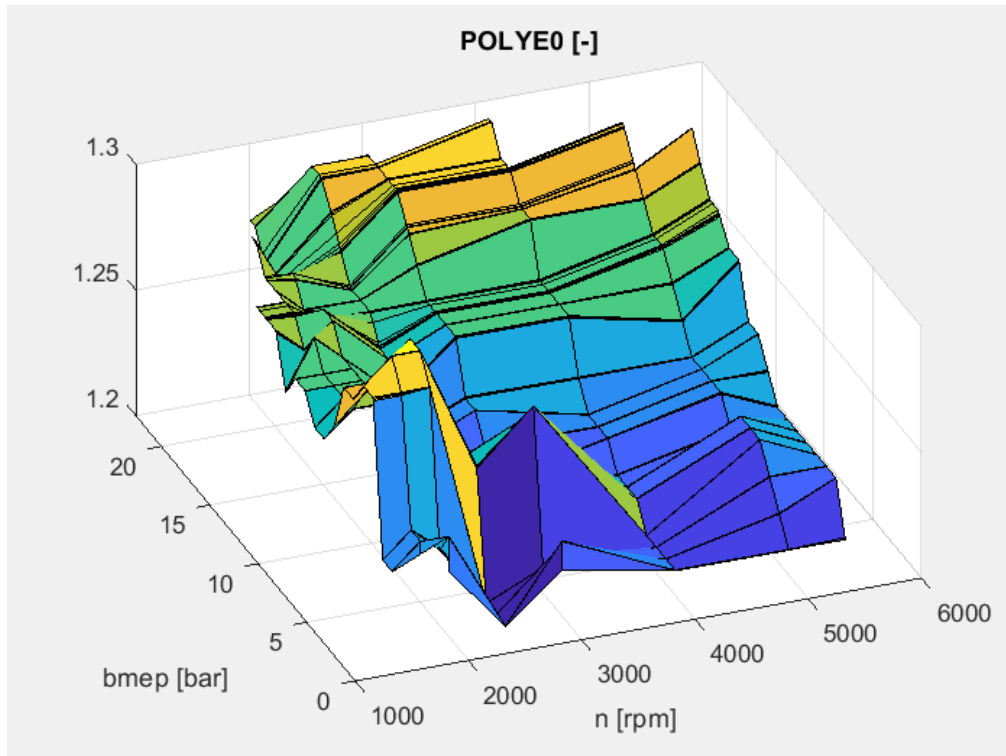


Figura 29: rappresentazione grafica del valore medio tra i cilindri dell'esponente della politropica di espansione

PREATM:

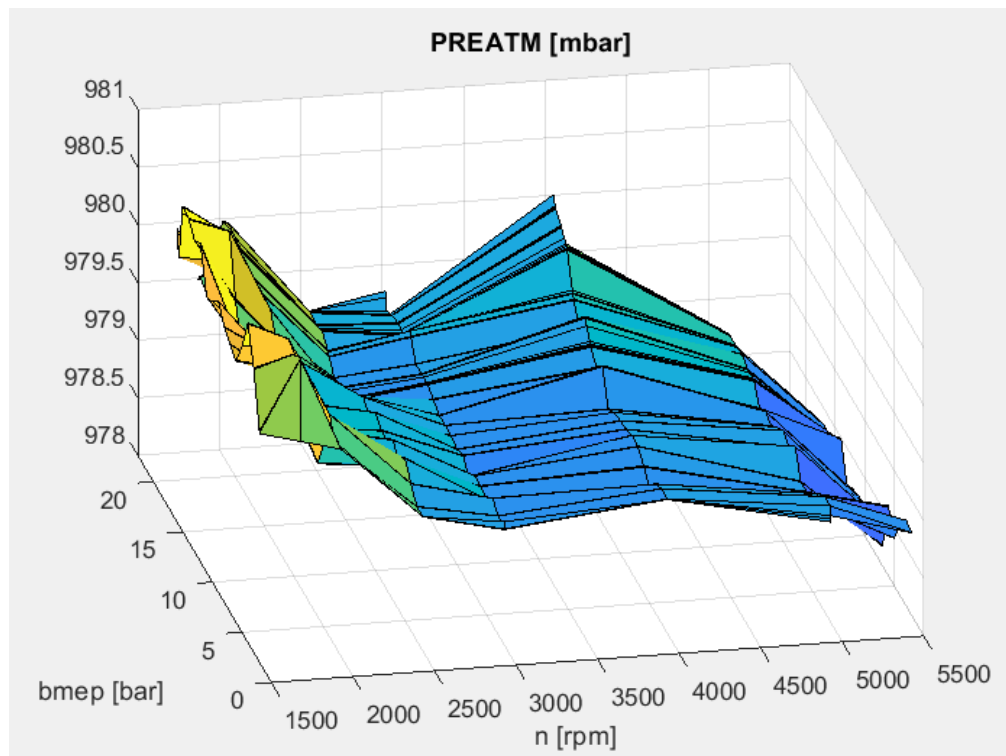
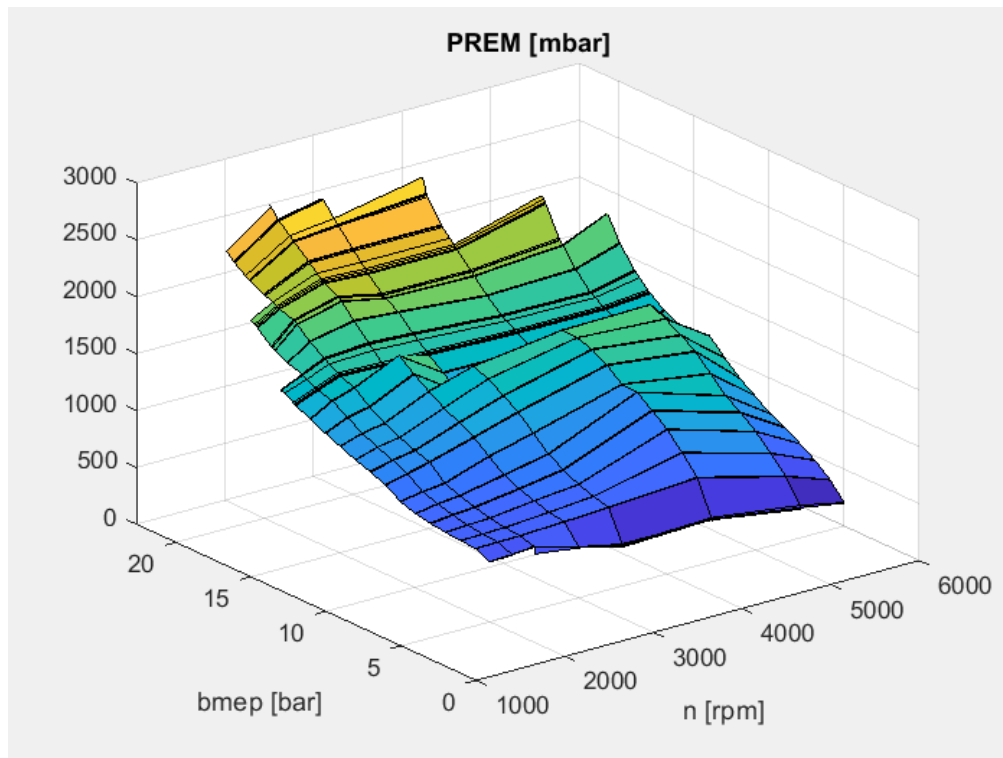
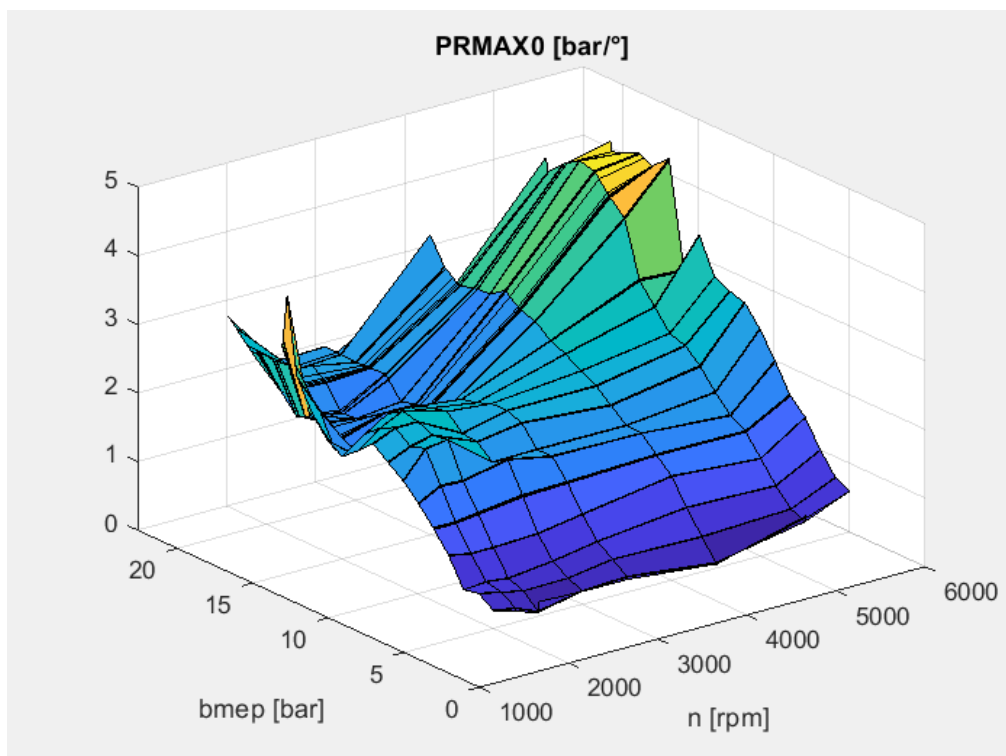


Figura 30: rappresentazione dell'andamento del valore di pressione atmosferica assoluta in ambiente di prova rilevata dalla centralina motore

PREM:

*Figura 31: rappresentazione della pressione assoluta al collettore di aspirazione*

PRMAX0:

*Figura 32: rappresentazione grafica del valore medio tra i cilindri della massima variazione di pressione in camera*

QFUELINJ_V_1:

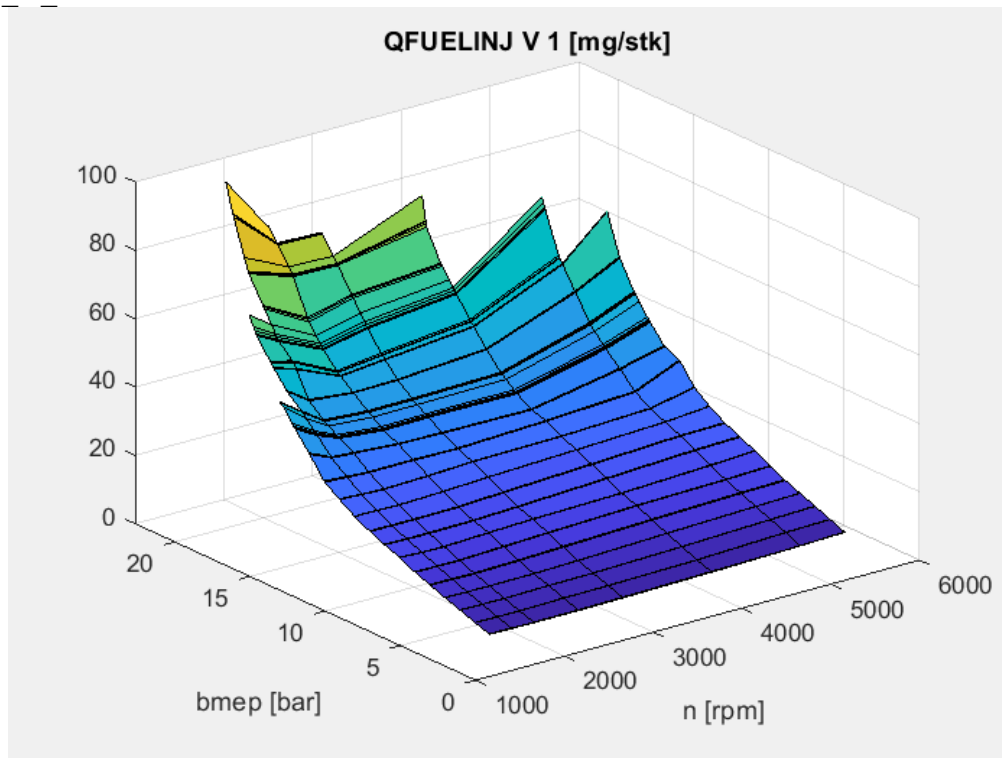


Figura 33: quantità di combustibile iniettato - cilindro 1

QFUELOBJ:

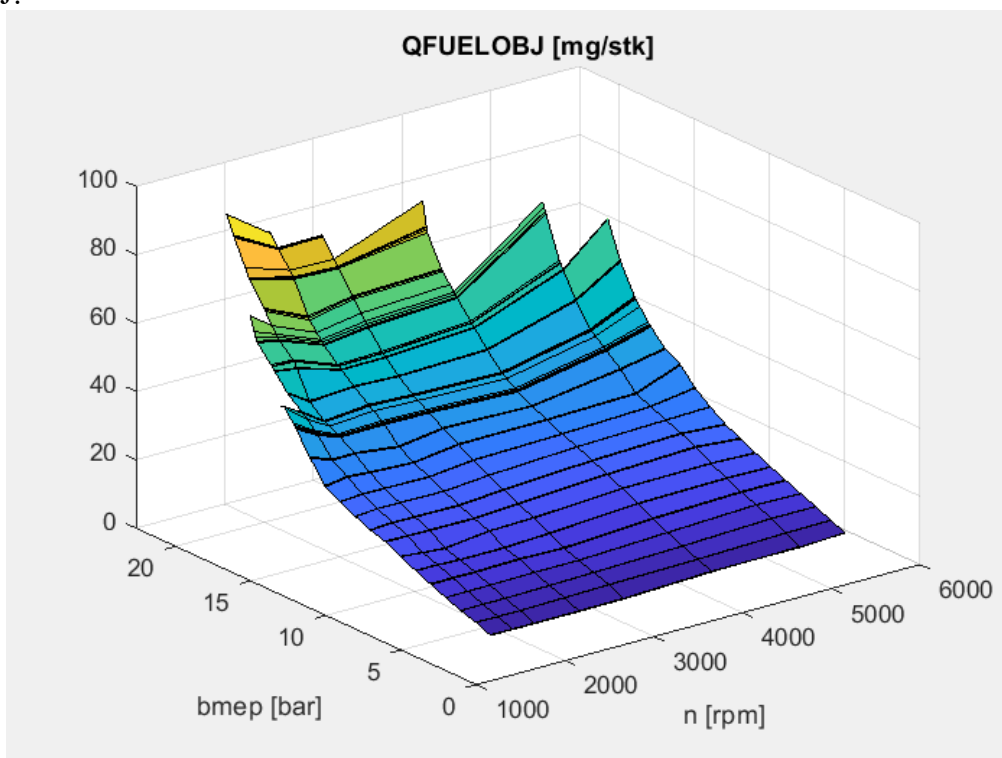
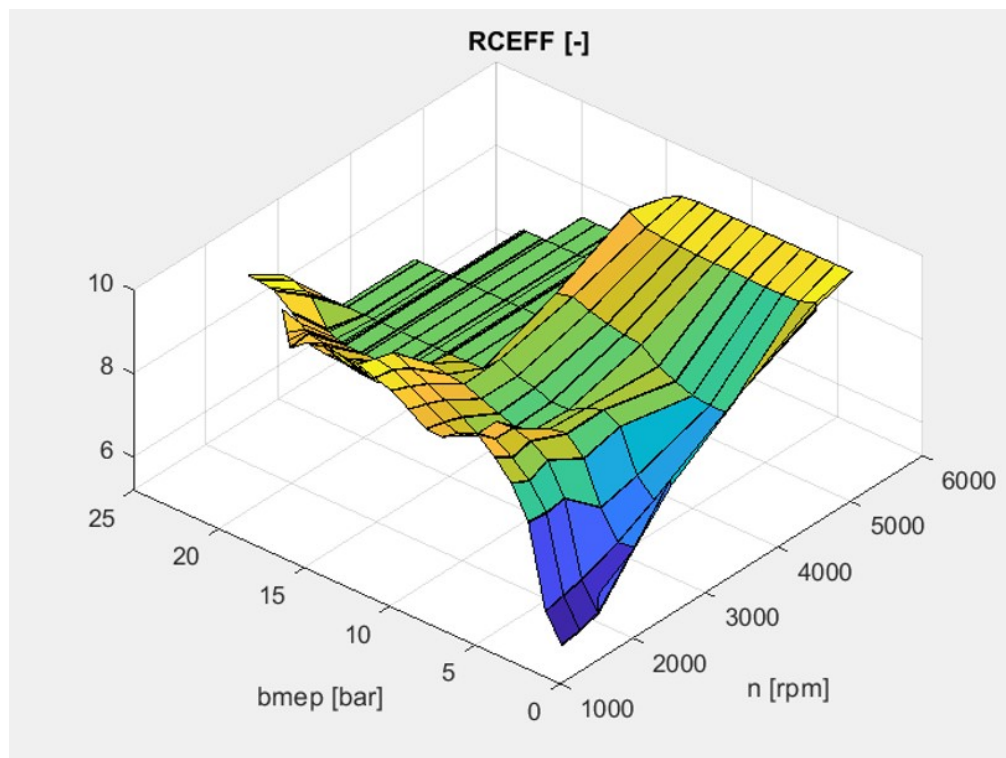
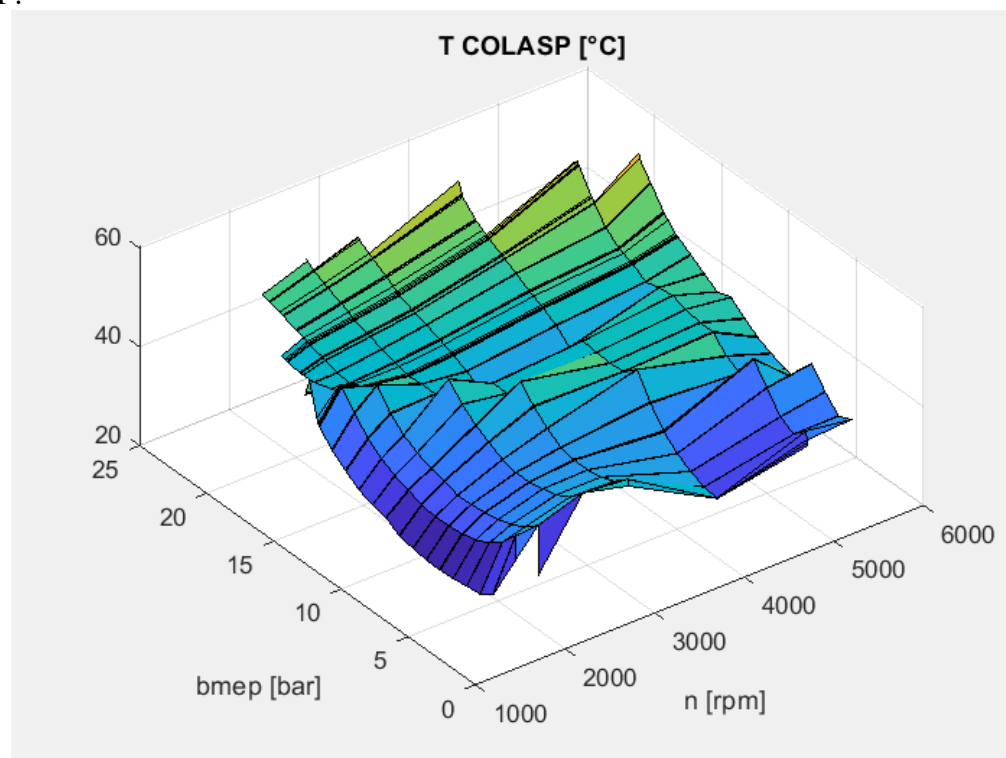


Figura 34: quantità di combustibile iniettata obiettivo

RCEFF:

*Figura 35: andamento del rapporto di compressione effettivo*

T_COLASP:

*Figura 36: temperatura aria nel collettore di aspirazione*

T_TUR_IN:

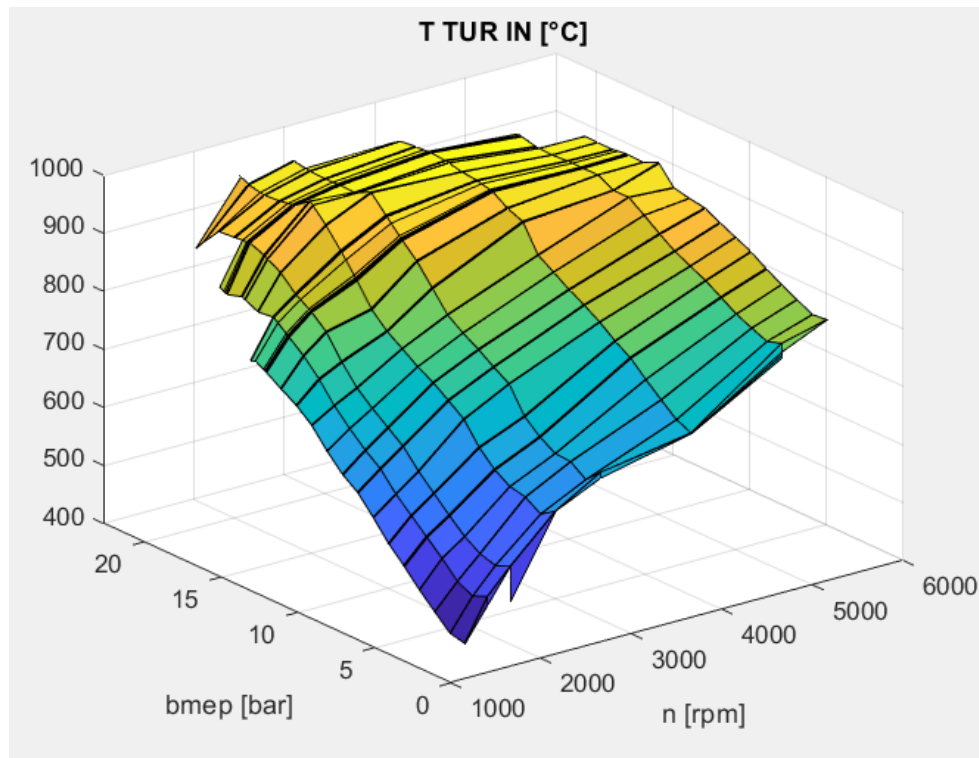


Figura 37: andamento della temperatura in ingresso turbina, si nota che aumenta sia con il carico che con il regime di rotazione

WGDUTY:

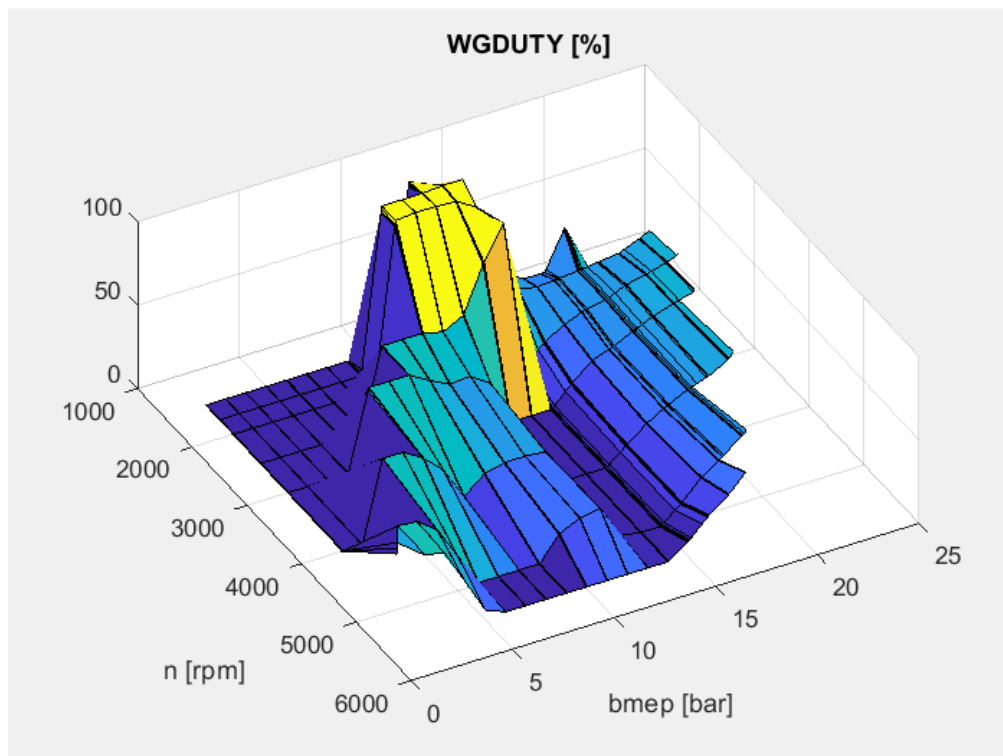


Figura 38: andamento del duty cycle della regolazione della waste gate, è presente un picco per valori intermedi di carico e regimi di rotazione ridotti

3.5 CURVE COPPIA-POTENZA-bsfc

Viene quindi rappresentato il grafico con le curve di coppia, potenza e bsfc.

Si considerano i valori massimi di coppia e potenza e i valori minimi di bsfc per ogni gruppo di regime di rotazione forniti.

Il grafico è costruito tramite funzione “*plot*” insieme alla funzione “*jzplotys*” utile a inserire più scale relative all’asse Y sullo stesso grafico (figure 39 e 40).

```

464 - P=max(B(:,1:end,98))
465 - C_u=max(B(:,1:end,57))
466 - bsfc_min=min(B(:,1:end,33))
467
468 - figure
469 - plot(rpm_ch,P,rpm_ch,C_u,rpm_ch,bsfc_min);
470 - [ax,hlines,fh] = jzplotys({rpm_ch,P,rpm_ch,C_u,rpm_ch,bsfc_min},{1 1 1},[1500 5500],100);
471 - xlabel('n [rpm]');
472 - ylabel(ax(1),'P [kW]');
473 - ylabel(ax(3),'C [Nm]');
474 - ylabel(ax(5),'BSFC [g/kWh]');

```

Figura 39: istruzioni di rappresentazione delle curve coppia-potenza-bsfc

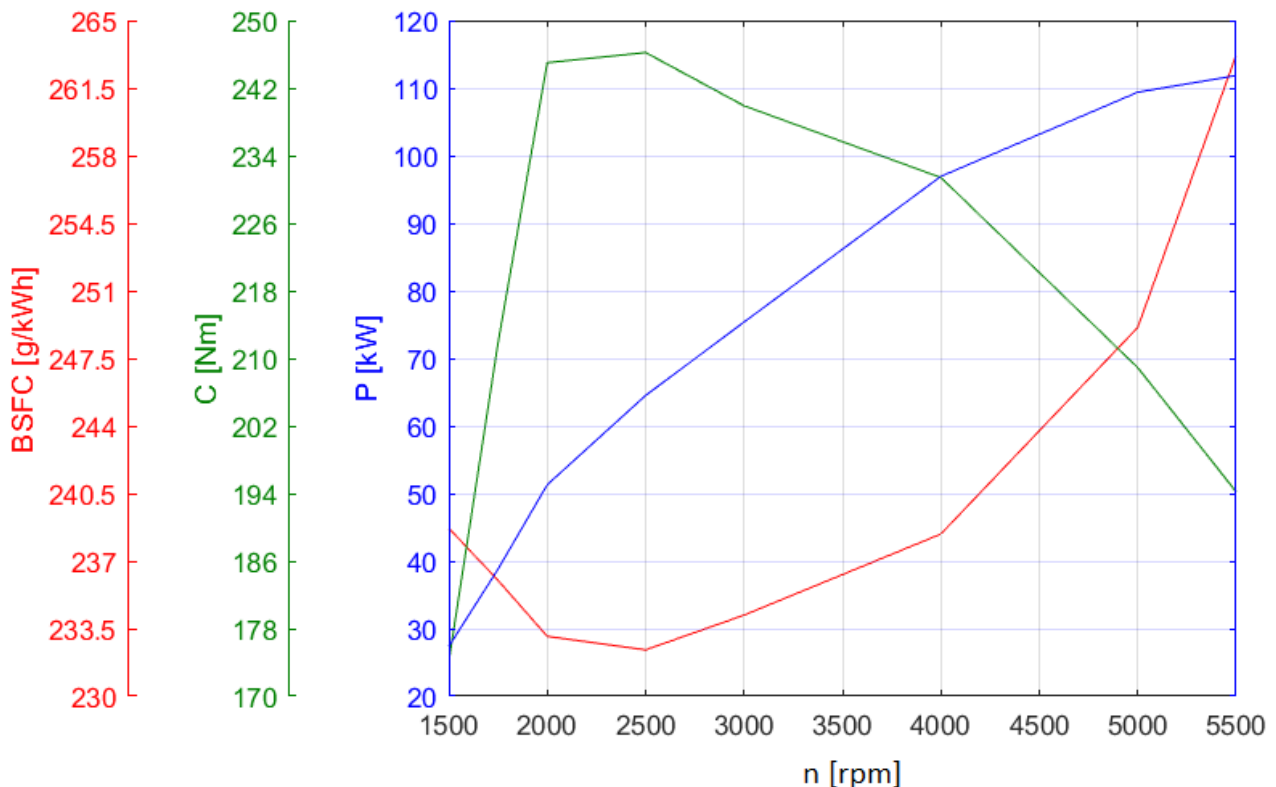


Figura 40: andamento delle curve coppia-potenza-bsfc, come previsto il valore massimo di coppia coincide con il valore minimo di bsfc, mentre non è possibile rappresentare la zona di potenza massima (i dati sono forniti fino a 5500 rpm, mentre il motore in questione eroga la massima potenza a 6750 rpm)

Capitolo 4

Calcolo di rendimenti, combustibile iniettato e del modello di pressione a vuoto

Vengono calcolati i principali rendimenti del motore, quindi i valori di rendimento utile, rendimento organico, rendimento limite e rendimenti termo-fluidodinamico interno (figura 41).

Successivamente vengono calcolati i coefficienti di riempimento e la massa di combustibile iniettato dal valore di bsfc [2].

4.1 RENDIMENTO UTILE

Il rendimento utile definisce il rendimento globale del motore quindi il rapporto tra effetto utile e energia fornita al propulsore.

È calcolato sia a partire dai valori di potenza utile (figure 42-43) che dai valori di consumo specifico bsfc (figure 44-45):

$$\eta_u = \frac{P_u}{m_b \cdot n_{cyl} \cdot \frac{n_{mot}}{m} \cdot H_i} \quad (1)$$

$$\eta_{u,q} = \frac{1}{H_i \cdot bsfc \cdot 3.6} \quad (2)$$

Il termine “ m ” rappresenta il numero di giri dell’albero necessari a completare un ciclo motore, vale quindi 2 per un motore 4 tempi.

4.2 RENDIMENTO MECCANICO

Il rendimento meccanico confronta il lavoro utile all’albero e il lavoro interno svolto dal gas sullo stantuffo ed è quindi rappresentativo delle perdite di energia che si hanno tra gli organi meccanici del motore.

È calcolato a partire dai valori di bmep e imep:

$$\eta_m = \frac{bmep}{imep} \quad (3)$$

Possono essere considerati sia i valori di imep_{net} (figure 46-47) che di imep_{gross} (figure 48-49) distinguendo di conseguenza due valori di rendimento meccanico:

$$\eta_{m,gross} = \frac{bmep}{imep_{gross}} \quad (4)$$

$$\eta_{m,net} = \frac{bmep}{imep_{net}} \quad (5)$$

4.3 RENDIMENTO LIMITE

Calcolo del rendimento limite considerando il rapporto di compressione geometrico e l'esponente della politropica relativo alla fase di espansione (gas di scarico):

$$\eta_{lim} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma_{exp}-1}} \quad (6)$$

Il rendimento limite (figure 50-51) confronta la massima energia meccanica ottenibile dal ciclo con l'energia introdotta ad ogni ciclo. È quindi determinato dalle leggi della termodinamica (parametri caratteristici del ciclo motore) e presenta per questo un valore massimo (circa 0.4÷0.5):

$$\eta_{lim} = \frac{L_{i,lim}}{m_b \cdot H_i} \quad (7)$$

Per miscele ricche viene applicata la correzione ipotizzando che il combustibile in eccesso non partecipa alla combustione:

$$\eta_{lim} = \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma_{exp}-1}}\right) \cdot \lambda \quad \text{se } \lambda < 1 \quad (8)$$

4.4 RENDIMENTO TERMO-FLUIDODINAMICO INTERNO

Calcolo del rendimento termo-fluidodinamico interno (figure 52-53) a partire dai valori dei rendimenti precedentemente calcolati:

$$\eta_{\vartheta_i} = \frac{\eta_u}{\eta_m \cdot \eta_{lim}} \quad (9)$$

Il rendimento termo-fluidodinamico interno confronta il lavoro interno con il lavoro intero che si potrebbe avere in assenza delle perdite non meccaniche (lavoro interno limite):

$$\eta_{\vartheta_i} = \frac{L_i}{L_{i,lim}} \quad (10)$$

```

107 - eta_u=10^6*P_u./(4*m_b_obj.*rpm/120*H_i);%rendimento utile calcolato a partire da P_u e m_b
108
109 - eta_u_q=1./(H_i*BSFC_g/1000/3600);%rendimento utile calcolato a partire dai bsfc dichiarati
110
111 - eta_m_net=bmep./imep_net;%rendimento organico con imep_net
112
113 - eta_m_gross=bmep./imep_gross;%rendimento organico con imep_gross
114
115 - eta_lim=1-1./(r_c.^(y_e-1));%rendimento limite calcolato con rapporto di compressione geometrico
116 - % e con k dei gas di scarico
117
118 - [a,b,l]=find(lambda<1);
119
120 - for(i=1:size(a))
121 -     eta_lim(a(i),b(i))=eta_lim(a(i),b(i))*lambda(a(i),b(i));% approssimazione per miscele ricche
122 -
123 - end
124
125
126 - eta_thetai=eta_u_q./(eta_m_net.*eta_lim);

```

Figura 41: istruzioni del codice applicate per il calcolo dei rendimenti

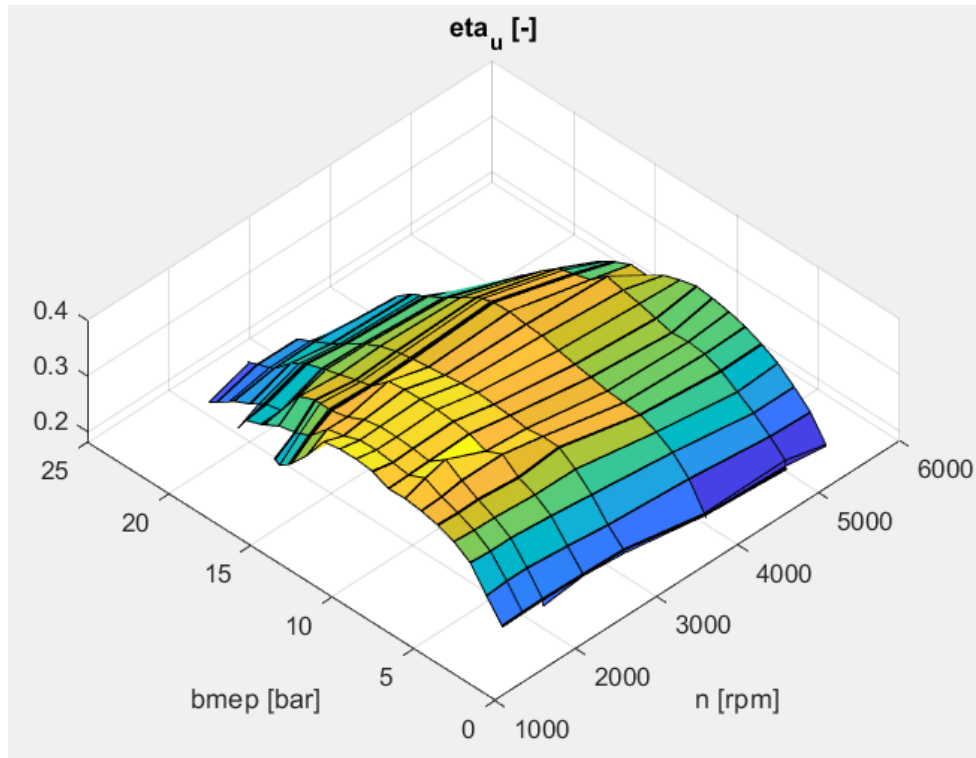


Figura 42: piano quotato relativo al rendimento utile calcolato con i valori di potenza utile quantità di combustibile iniettata

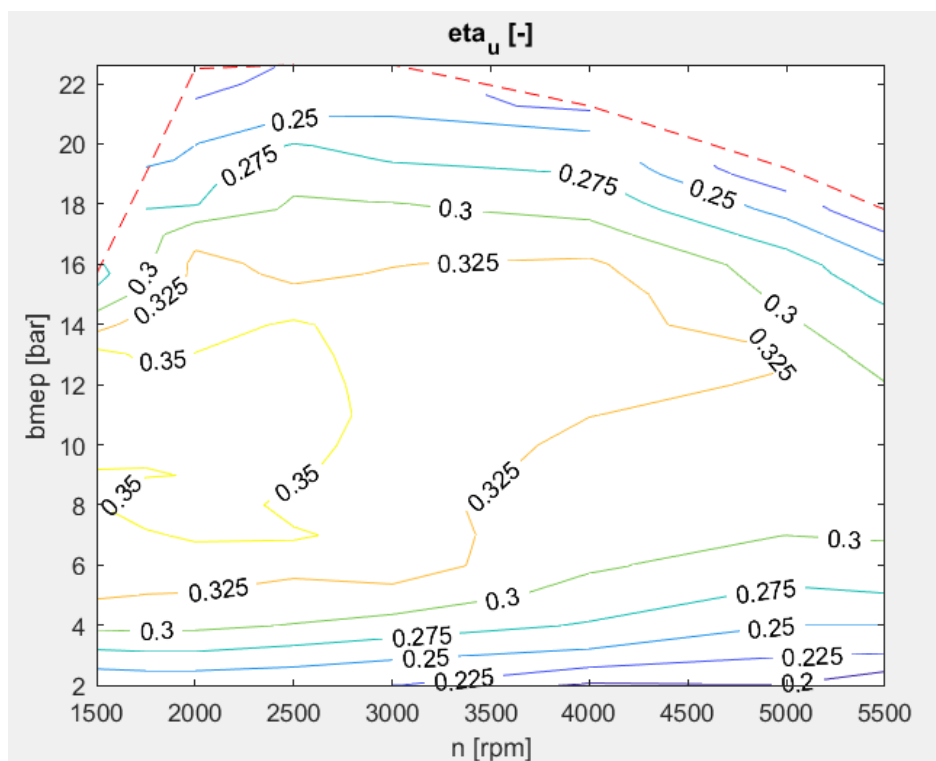


Figura 43: diagramma collinare relativo all'andamento del rendimento utile

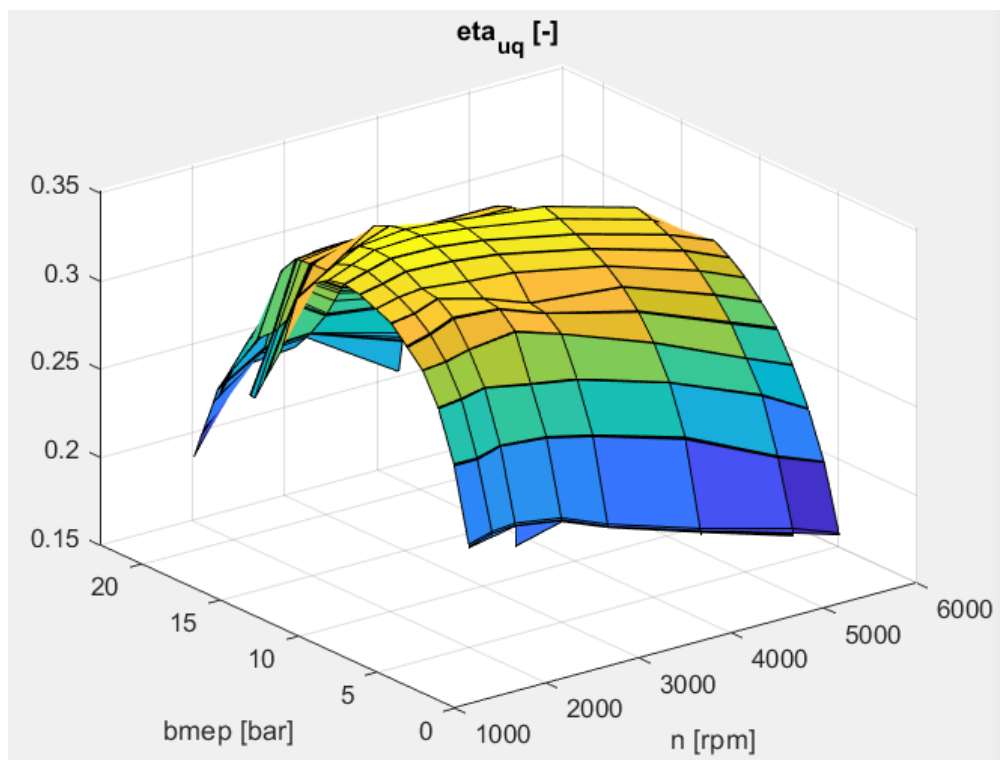


Figura 44: piano quotato relativo al rendimento utile calcolato a partire dai valori di bsfc

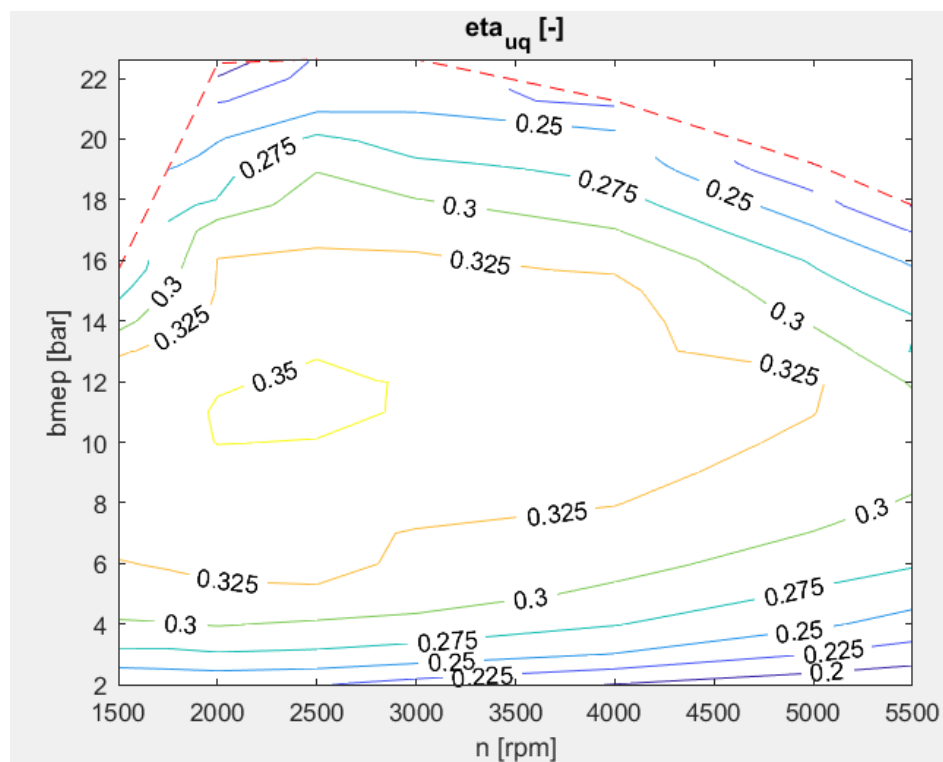


Figura 45: diagramma collinare relativo al rendimento utile calcolato dai valori di bsfc

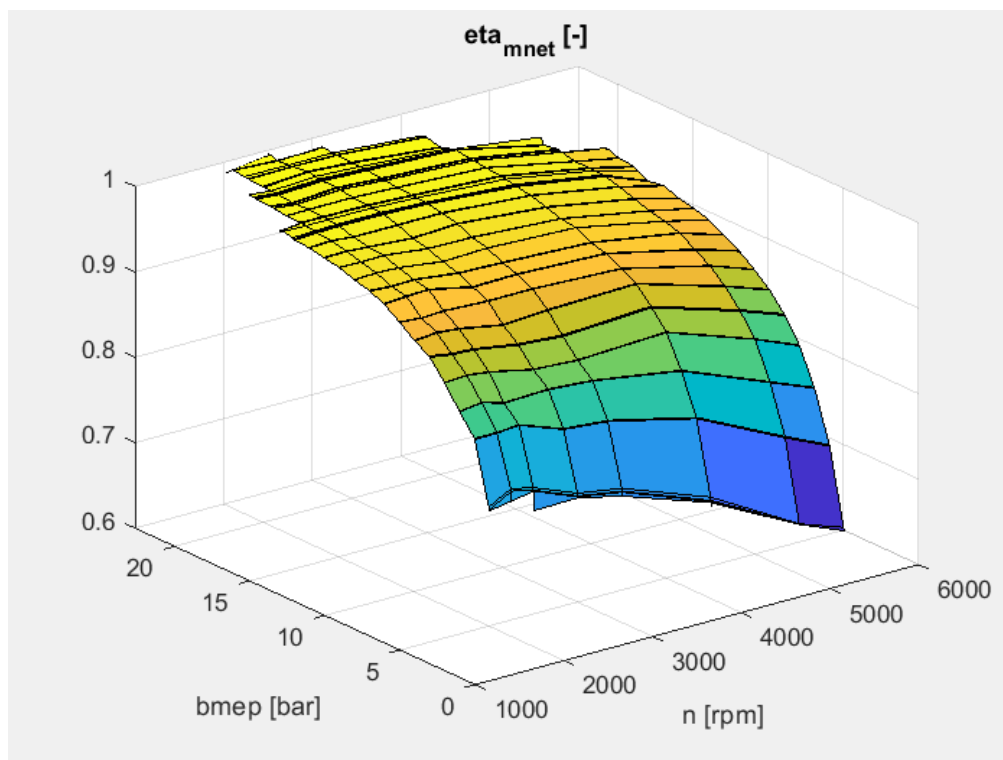


Figura 46: piano quotato relativo al rendimento meccanico calcolato con i valori di pressione media indicata netta

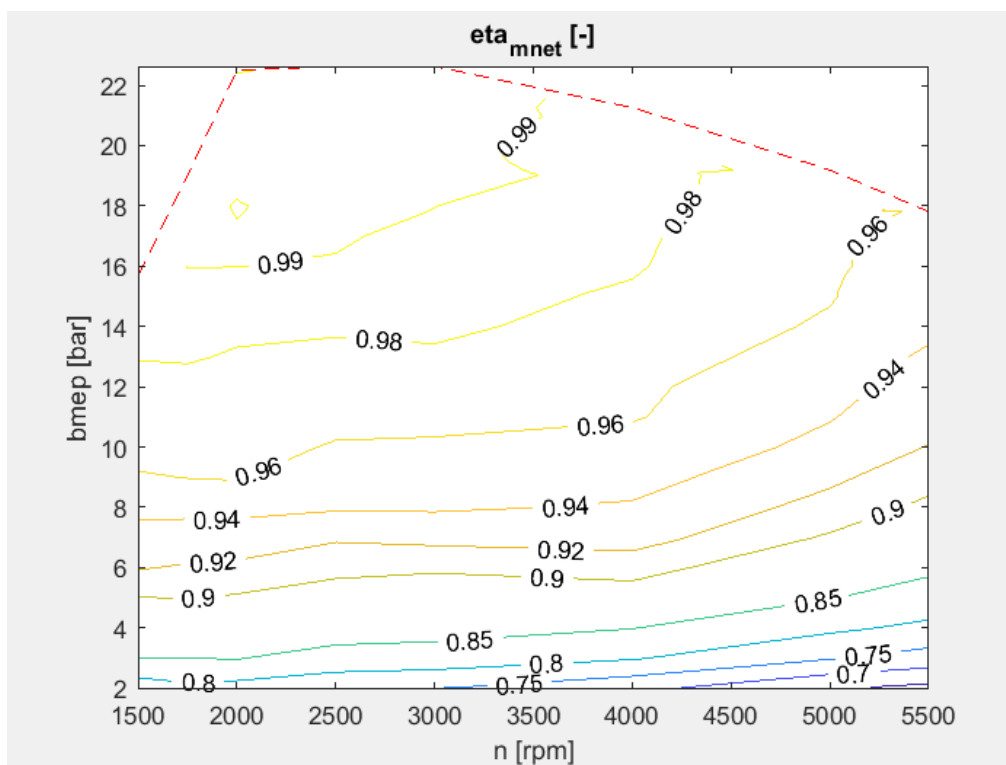


Figura 47: diagramma collinare relativo all'andamento del rendimento meccanico calcolato con i valori di pressione media indicata netta

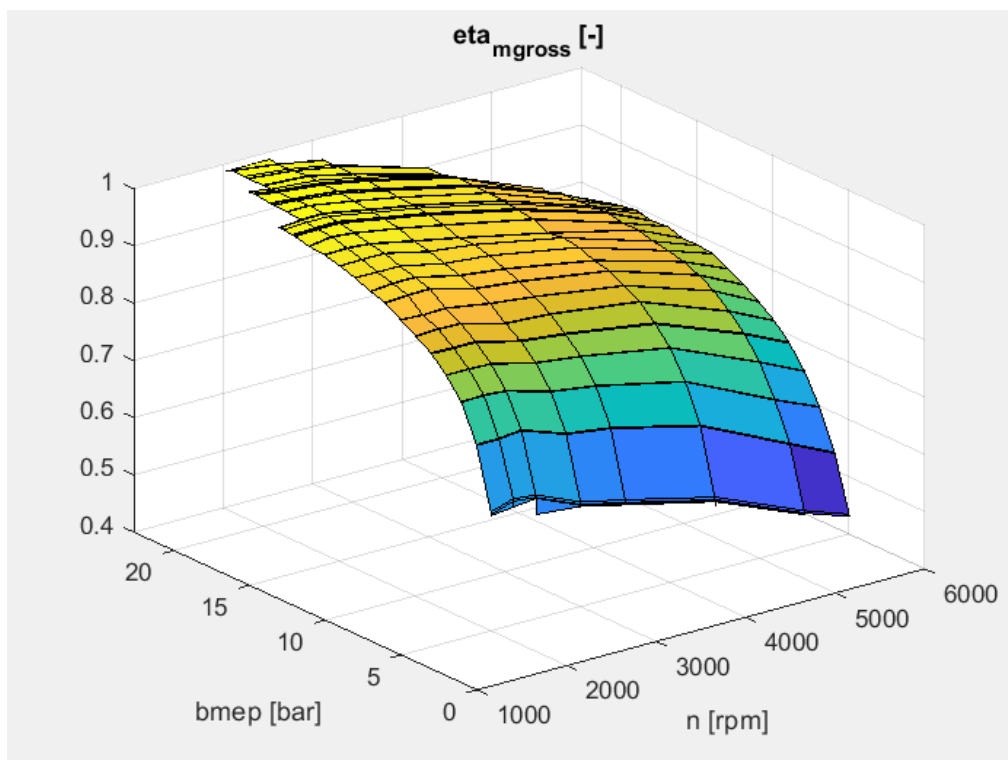


Figura 48: piano quotato relativo al rendimento meccanico calcolato con i valori di pressione media indicata lorda

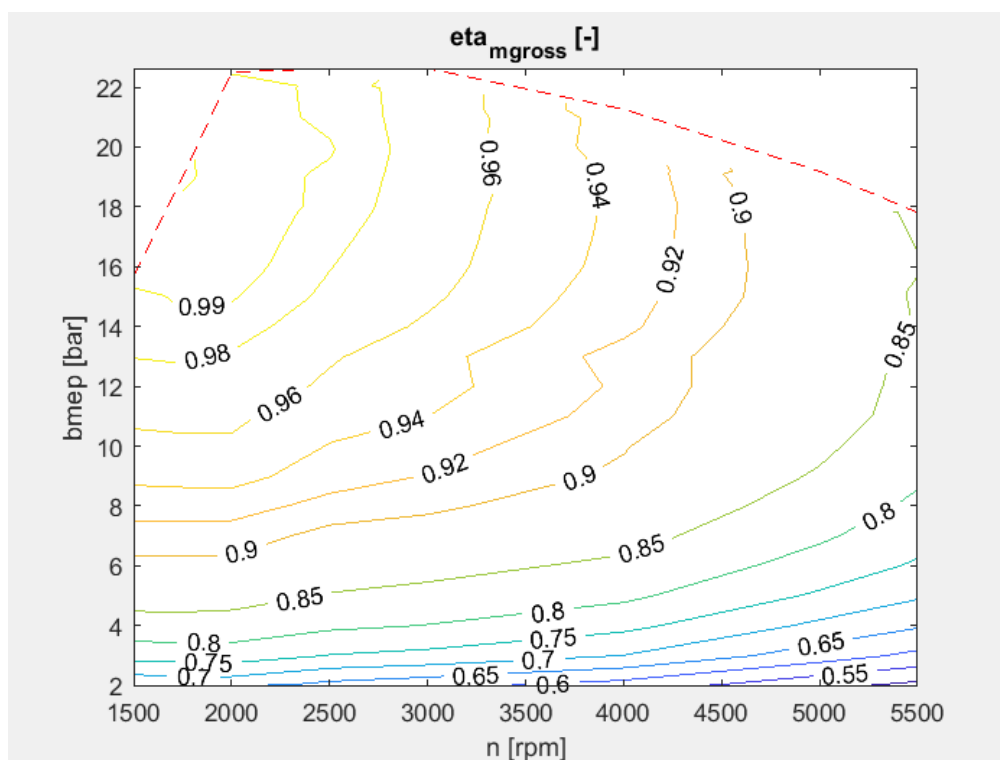


Figura 49: diagramma collinare relativo all'andamento del rendimento meccanico calcolato con i valori di pressione media indicata lorda

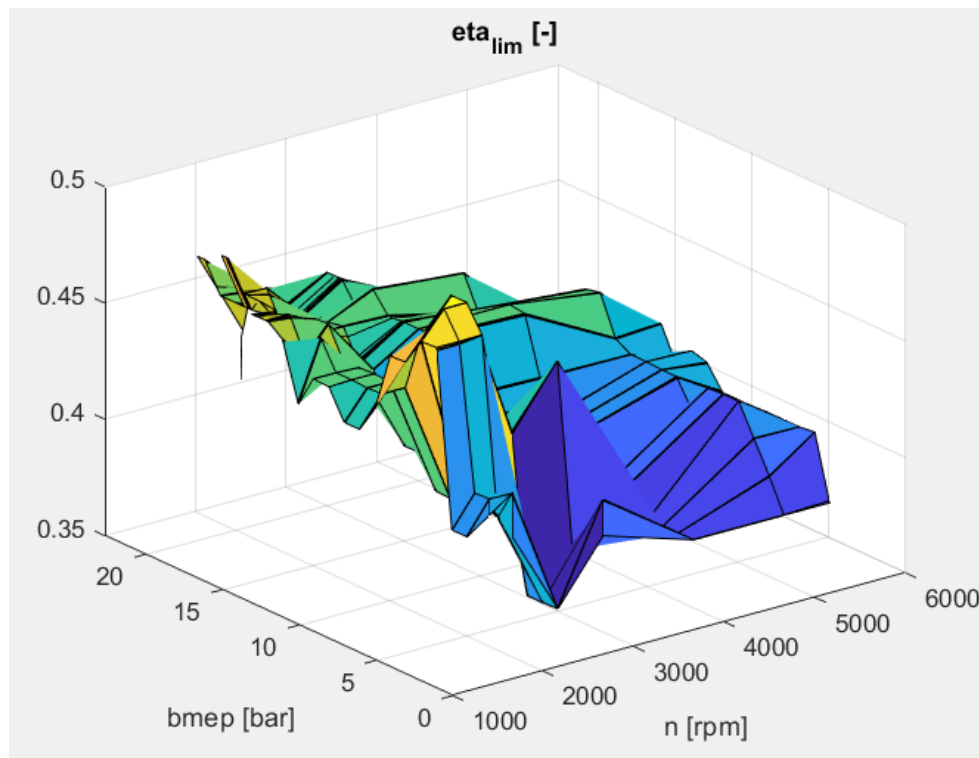


Figura 50: piano quotato relativo al rendimento limite

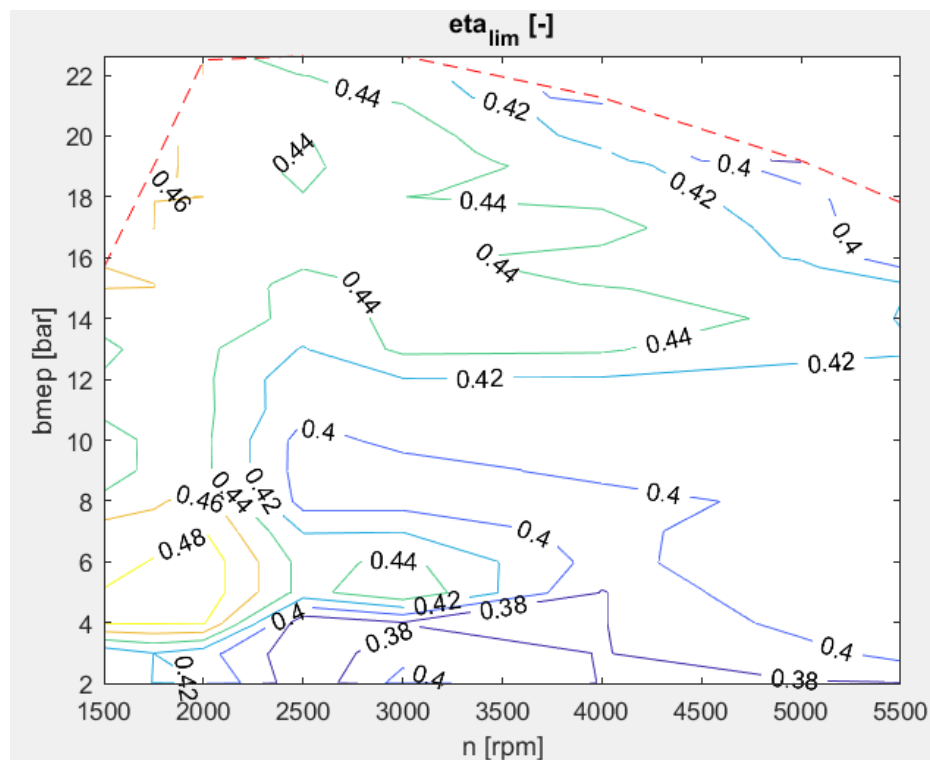


Figura 51: diagramma collinare relativo al rendimento limite

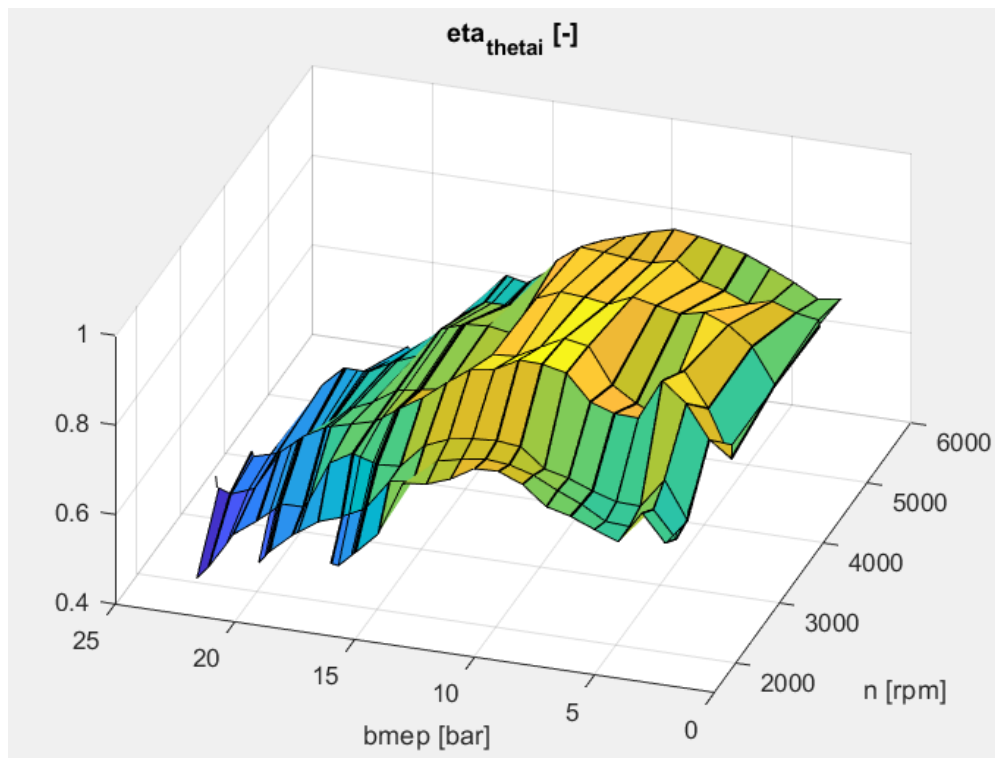


Figura 52: piano quotato relativo al rendimento termo-fluidodinamico interno

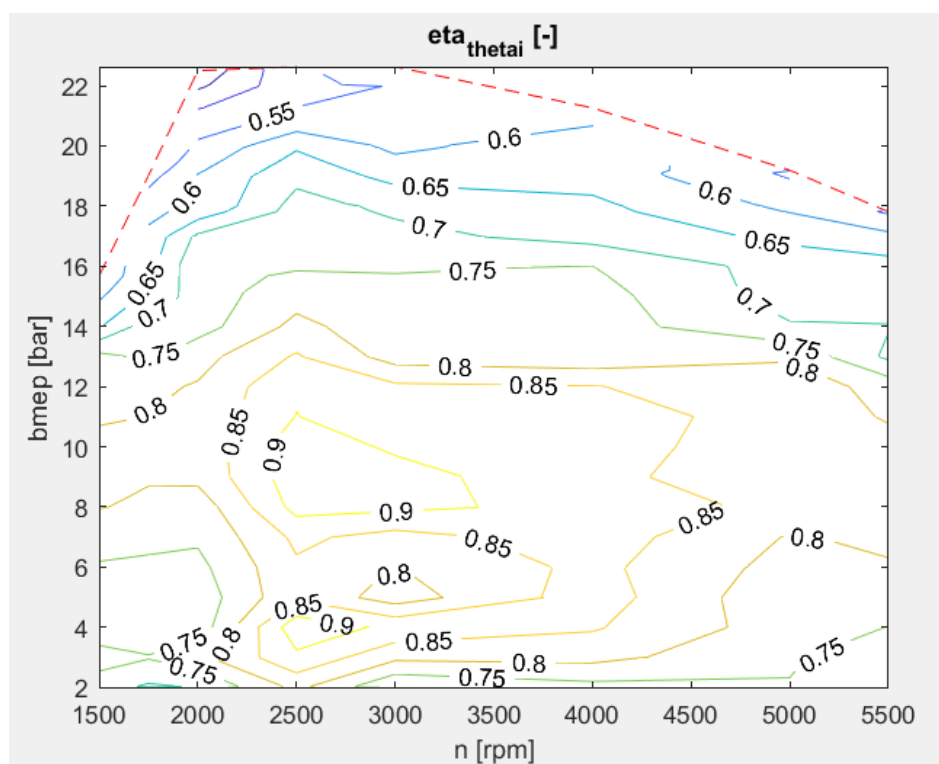


Figura 53: diagramma collinare relativo al rendimento termo-fluidodinamico interno

4.5 CALCOLO DEI PARAMETRI DELLA RELAZIONE DI CHEN-FLYNN

Vengono calcolati i parametri della relazione di Chen-Flynn [3] utili a stimare la pressione a vuoto:

$$p_v = A + B \cdot p_{max} + C \cdot \left(\frac{\frac{c}{2} \cdot n}{1000} \right) + D \cdot \left(\frac{\frac{c}{2} \cdot n}{1000} \right)^2 \quad (11)$$

(è stata considerata la relazione rispetto a $\frac{n}{1000}$ per ottenere valori di C e D con un minore numero di cifre decimali)

Il valore di pressione a vuoto è calcolato come differenza tra imep e bmep (figura 55):

$$p_v = imep - bmep \quad (12)$$

Per il calcolo dei parametri della relazione viene utilizzata la funzione “lsqnonlin” che definisce i valori dei parametri stessi che minimizzano la differenza tra la pressione a vuoto effettiva e la pressione a vuoto calcolata tramite la relazione in ciascun punto:

$$\min \left(p_v - \left(A + B \cdot p_{max} + C \cdot \left(\frac{\frac{c}{2} \cdot n}{1000} \right) + D \cdot \left(\frac{\frac{c}{2} \cdot n}{1000} \right)^2 \right) \right) \quad (13)$$

I valori dei parametri ottenuti sono i seguenti:

A=1,058 bar

B=-0,0094

C=-0,0062 $\frac{\text{bar}}{\frac{m}{\text{min}}}$

D=3.4038·10⁻⁵ $\frac{\text{bar}}{\left(\frac{m}{\text{min}}\right)^2}$

Ci saremmo aspettati dei valori positivi di B e C, probabilmente abbiamo ottenuto dei valori negativi a causa di relazioni non univoche tra p_v , p_{max} , e n all’interno dei dati forniti (anche dovute alla variazioni di attuazione delle valvole in condizioni differenti).

L’andamento di pressione a vuoto calcolata con i parametri trovati è visualizzabile in figura 56.

```

225 - f=@(D) p_v_ch-(D(1)+D(2).*p_max_ch+D(3)*c/2.*rpm_ch/1000+D(4).*(c/2*rpm_ch/1000).^2);
226 - x0=[0,0,0,0];
227
228 - [H,t]=lsqnonlin(f,x0)
229
230 - p_v_calc=H(1)+H(2).*p_max_ch+H(3)*c/2.*rpm_ch/1000+H(4).*(c/2*rpm_ch/1000).^2;

```

Figura 54: istruzione del codice per la ricerca dei parametri della relazione di Chen-Flynn: f rappresenta la funzione differenza tra pressione a vuoto e pressione a vuoto calcolata tramite la relazione, il vettore D rappresenta il vettore dei parametri incogniti mentre il vettore x0 è il vettore dei valori iniziali dei parametri.

La funzione lsqnonlin fornisce come risultato il vettore H con i rispettivi valori di D che minimizzano la funzione f.

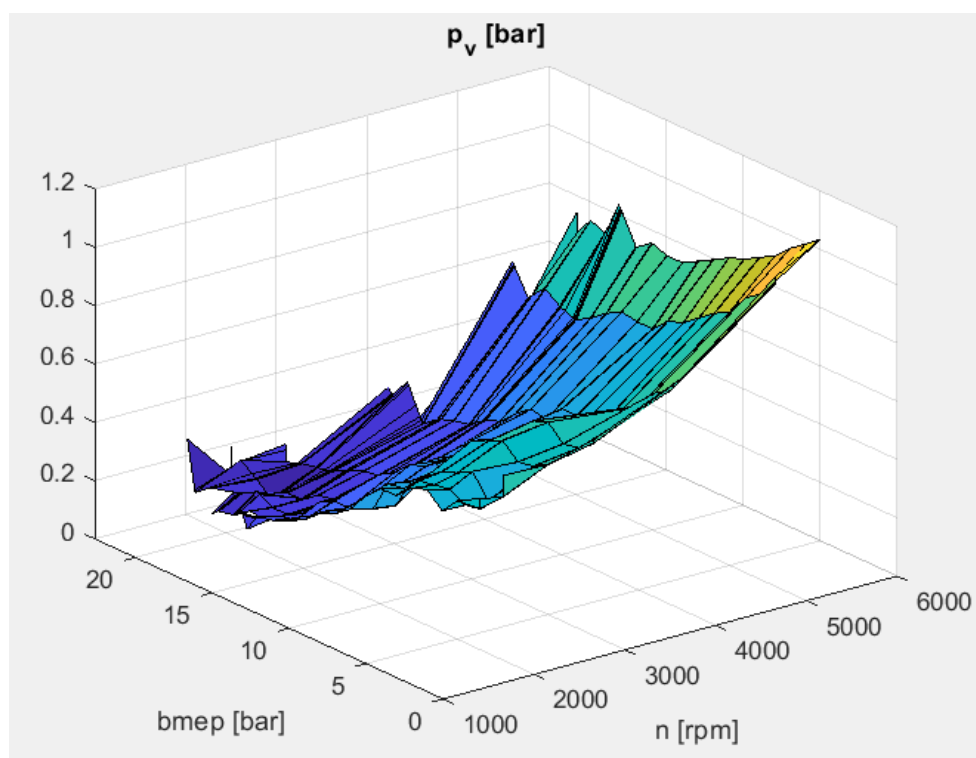


Figura 55: pressione a vuoto calcolata come differenza tra pressione media indicata e pressione media effettiva

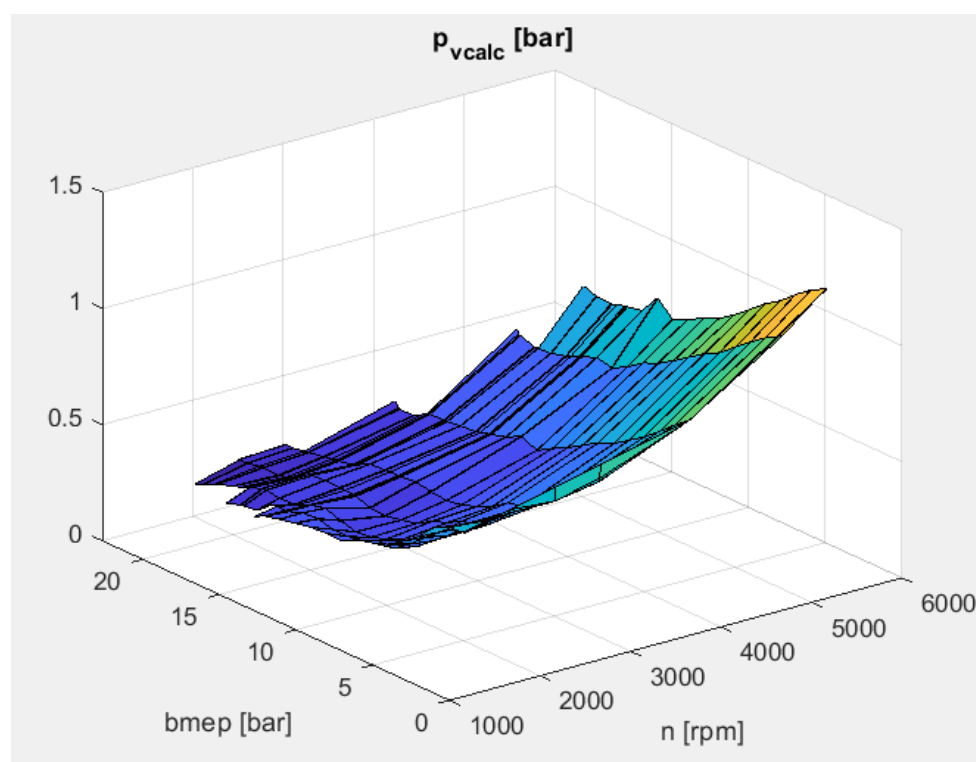


Figura 56: andamento della pressione a vuoto calcolata attraverso la relazione di Chen-Flynn

4.6 CALCOLO DI m_b IN FUNZIONE DEI VALORI DI $bsfc$

Per avere un confronto tra le diverse grandezze fornite viene calcolata la massa di combustibile iniettata (figura 57) in funzione dei valori di $bsfc$ (valore ritenuto più affidabile) secondo la formula (14):

$$m_{b_{bsfc}} = \frac{P_u \cdot bsfc}{3,6 \cdot 4 \cdot \frac{n}{120}} \quad (14)$$

È quindi possibile definire l'errore relativo (figura 58) tra i valori calcolati e quelli forniti secondo la formula (15):

$$\Delta_{m_b} = \frac{m_{b_{bsfc}} - m_b}{m_b} \cdot 100 \quad (16)$$

4.7 CALCOLO DEI COEFFICIENTI DI RIEMPIMENTO

È possibile calcolare i coefficienti di riempimento nei vari punti del piano quotato in funzione delle condizioni di riferimento o dell'ambiente di aspirazione (a monte del filtro aria) o del collettore di aspirazione (a valle dell'intercooler).

In entrambi i casi si procede calcolando la densità dell'aria nelle condizioni di riferimento da cui è possibile calcolare la quantità di aria ideale (figura 60-61) introdotta nelle condizioni di riferimento:

$$\rho_{air_{rif}} = \frac{p_{air_{rif}}}{R \cdot T_{air_{rif}}} \cdot 100 \quad (17)$$

$$m_{air_{id}} = \rho_{air_{rif}} \cdot \frac{iV}{4} \quad (18)$$

La quantità di aria effettivamente aspirata ad ogni ciclo (figura 59) è calcolata in funzione della quantità di combustibile iniettato e del rapporto stechiometrico:

$$m_{air_{eff}} = \alpha_{st} \cdot \lambda \cdot m_b \quad (19)$$

I coefficienti di riempimento possono quindi essere calcolati come rapporto tra la massa effettivamente aspirata e la massa ideale calcolata nelle rispettive condizioni di riferimento (figure 62-63):

$$\lambda_v = \frac{m_{air_{eff}}}{m_{air_{id}}} \quad (20)$$

Vengono inoltre calcolati i coefficienti di riempimento considerando anche la massa di EGR (figura 64) reintrodotta in camera di combustione (figure 65-66):

$$\lambda_v = \frac{m_{air,eff} + m_{EGR}}{m_{air,id}} \quad (21)$$

in entrambi i casi si considerano come condizioni di riferimento sia le condizioni all'ambiente di aspirazione che le condizioni al collettore di aspirazione.

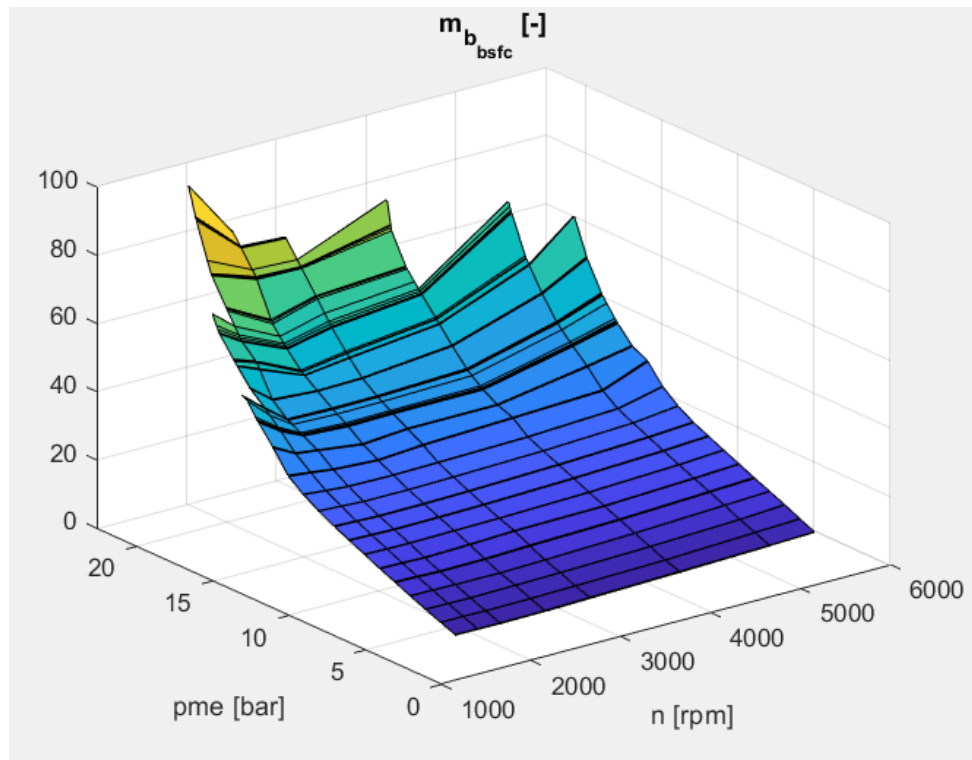


Figura 57: massa di combustibile iniettato calcolata dai valori di bsfc

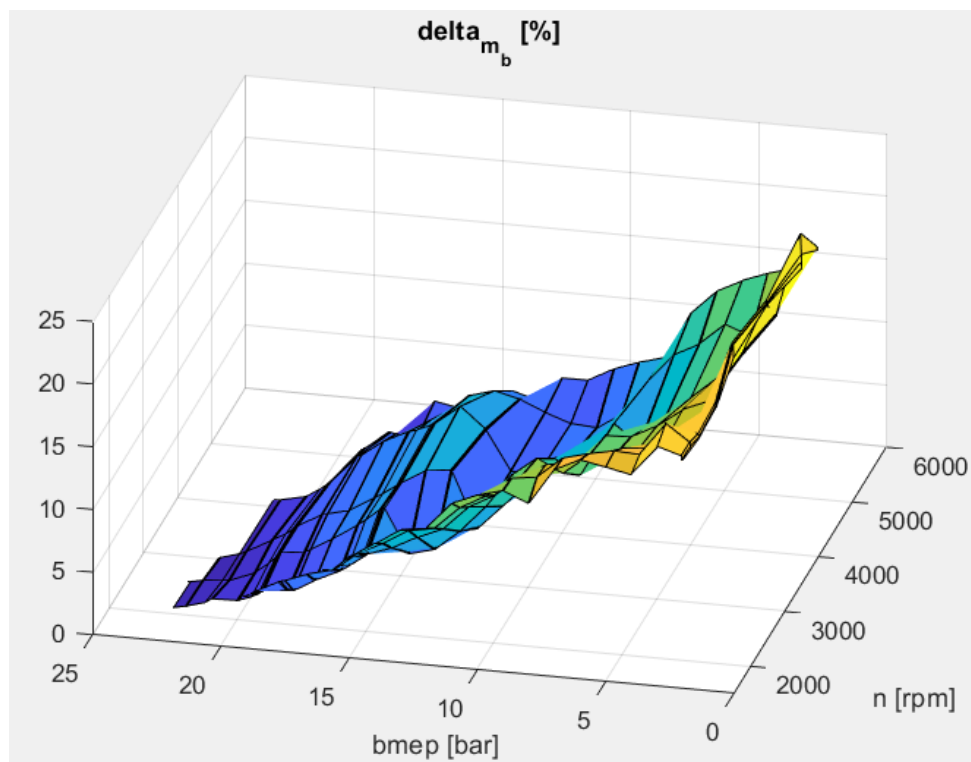


Figura 58: differenza percentuale tra i valori di massa di combustibile iniettata calcolata dai valori di bsfc e i valori dichiarati

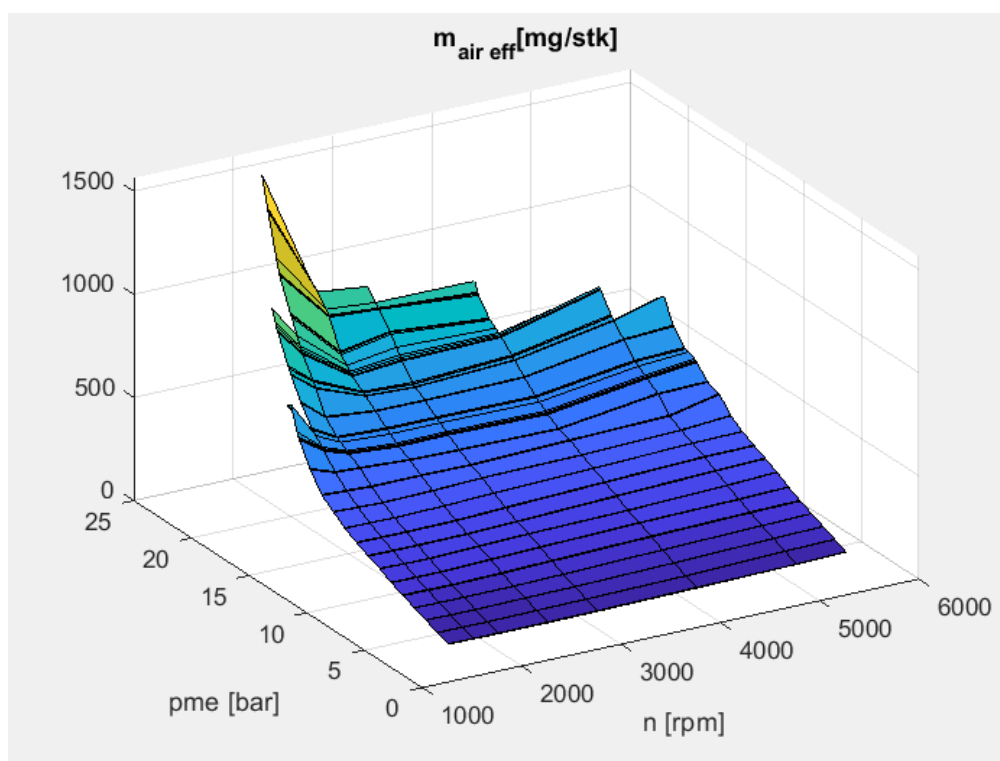


Figura 59: quantità di aria effettivamente aspirata ad ogni corsa di aspirazione

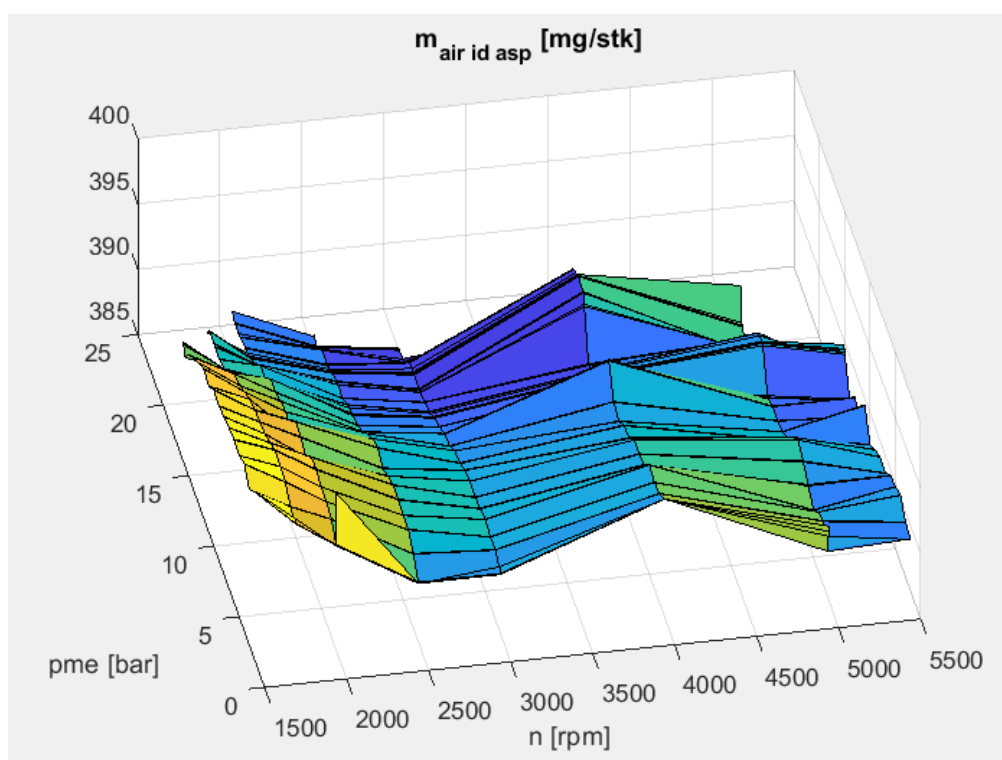


Figura 60: quantità di aria idealmente aspirata in riferimento alle condizioni dell'ambiente di aspirazione

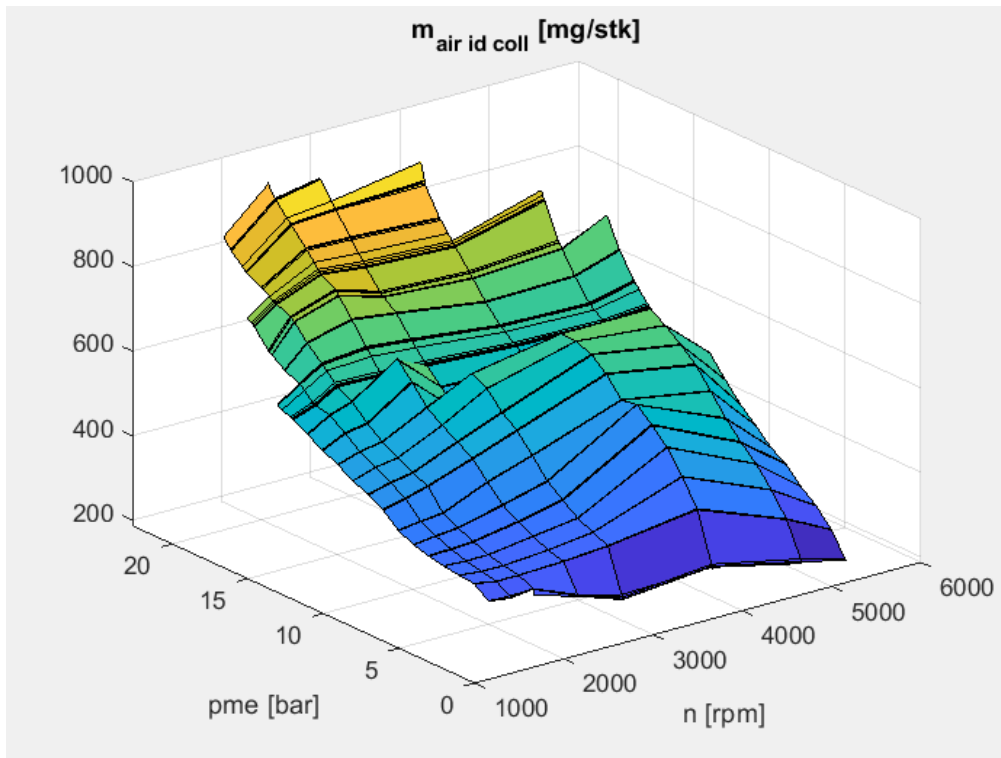


Figura 61: quantità di aria idealmente aspirata in riferimento alle condizioni del collettore

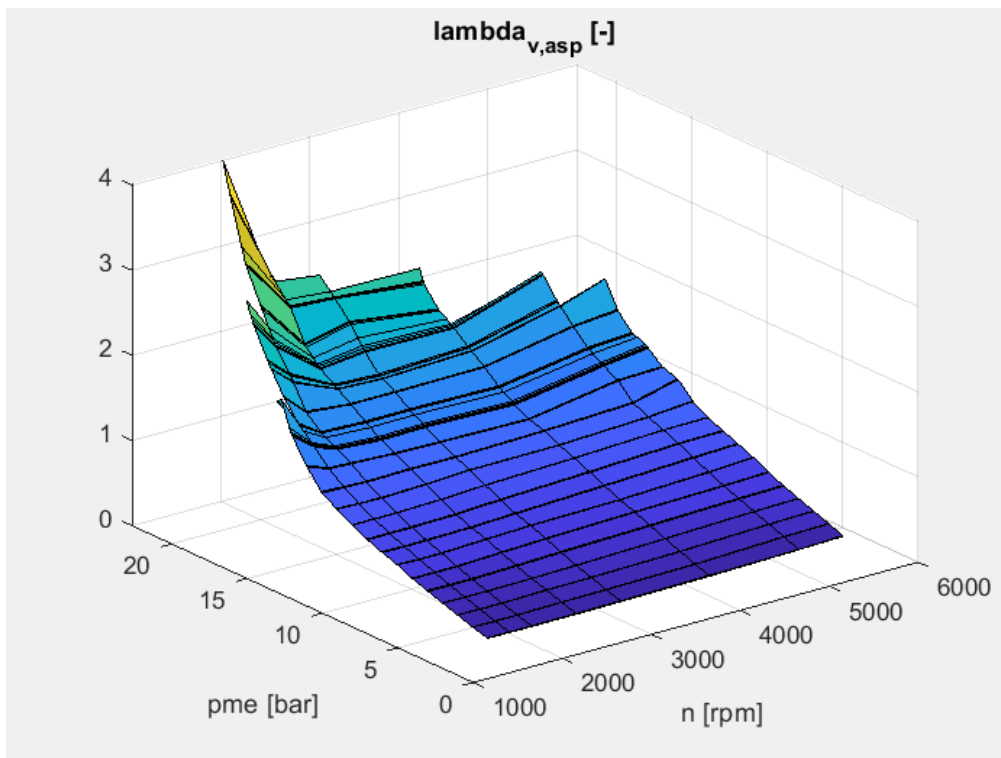


Figura 62: coefficiente di riempimento in riferimento alle condizioni dell'ambiente di aspirazione

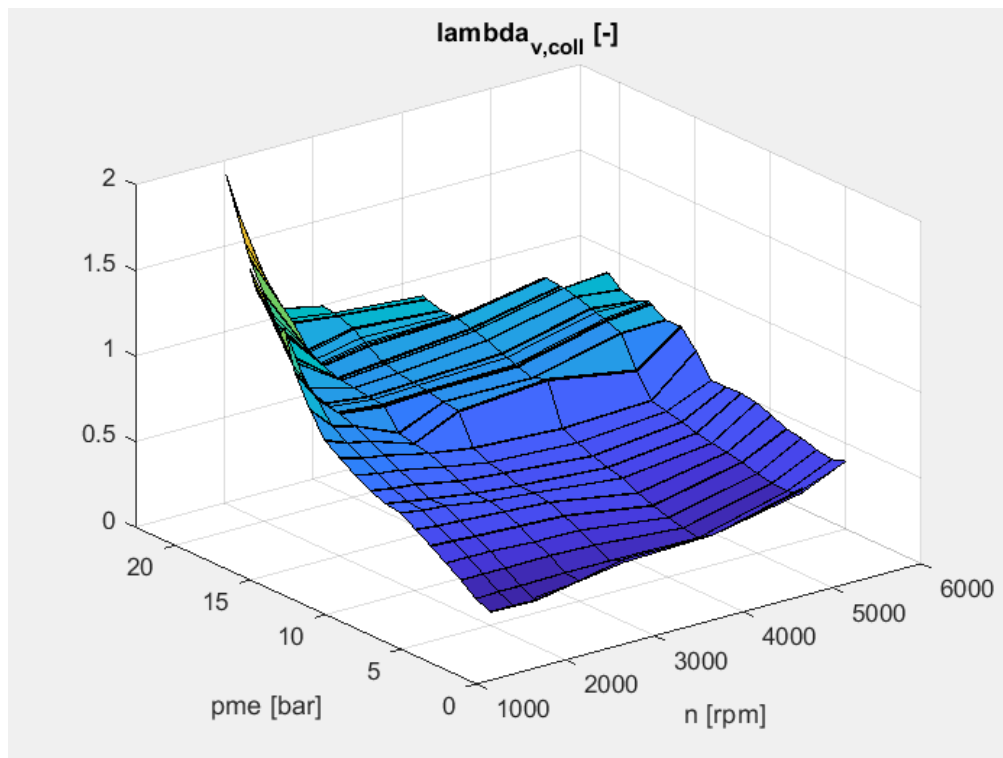


Figura 63: coefficiente di riempimento in riferimento alle condizioni del collettore

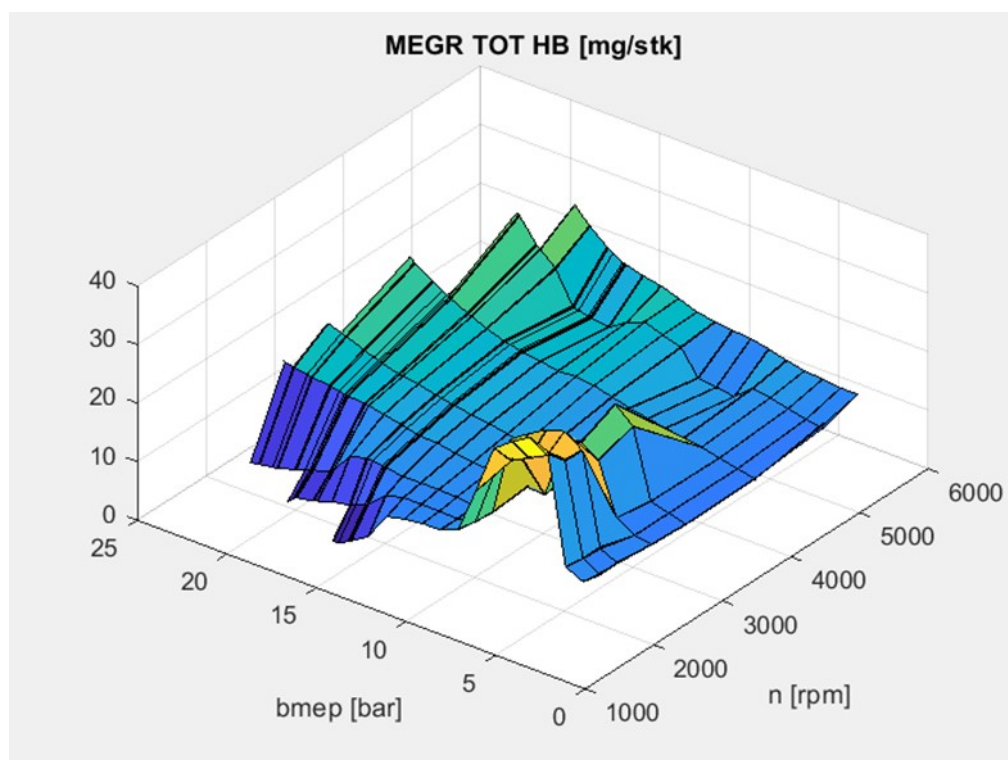


Figura 64: quantità di gas ricircolati

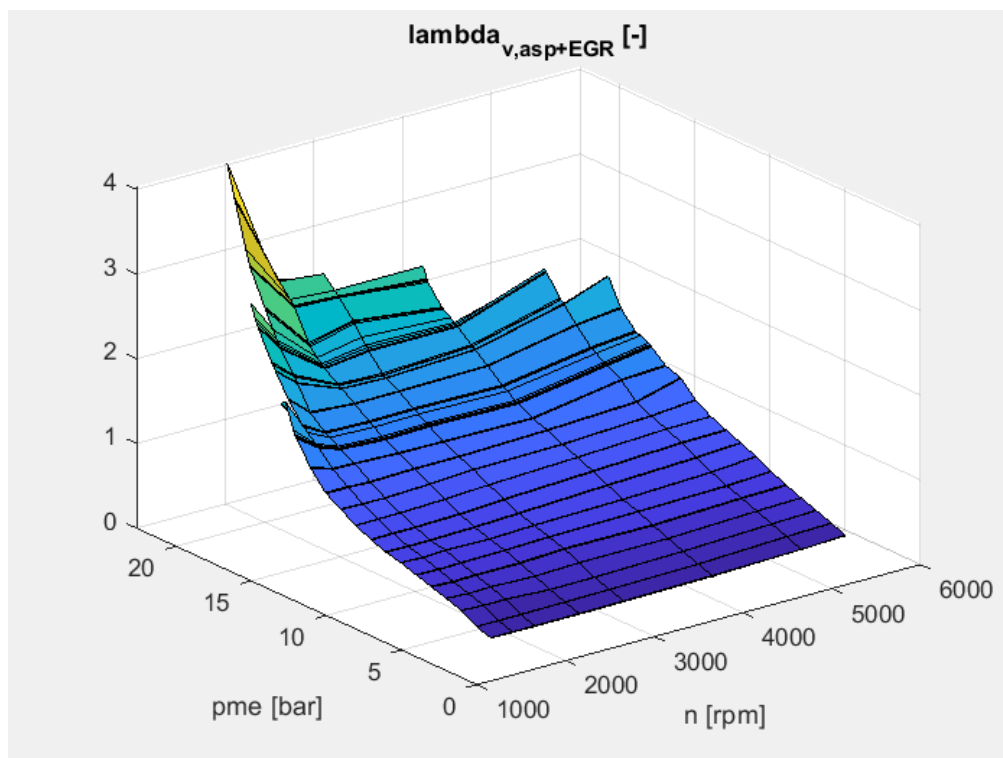


Figura 65:coefficiente di riempimento in riferimento alle condizioni di aspirazione considerando anche la quantità di EGR

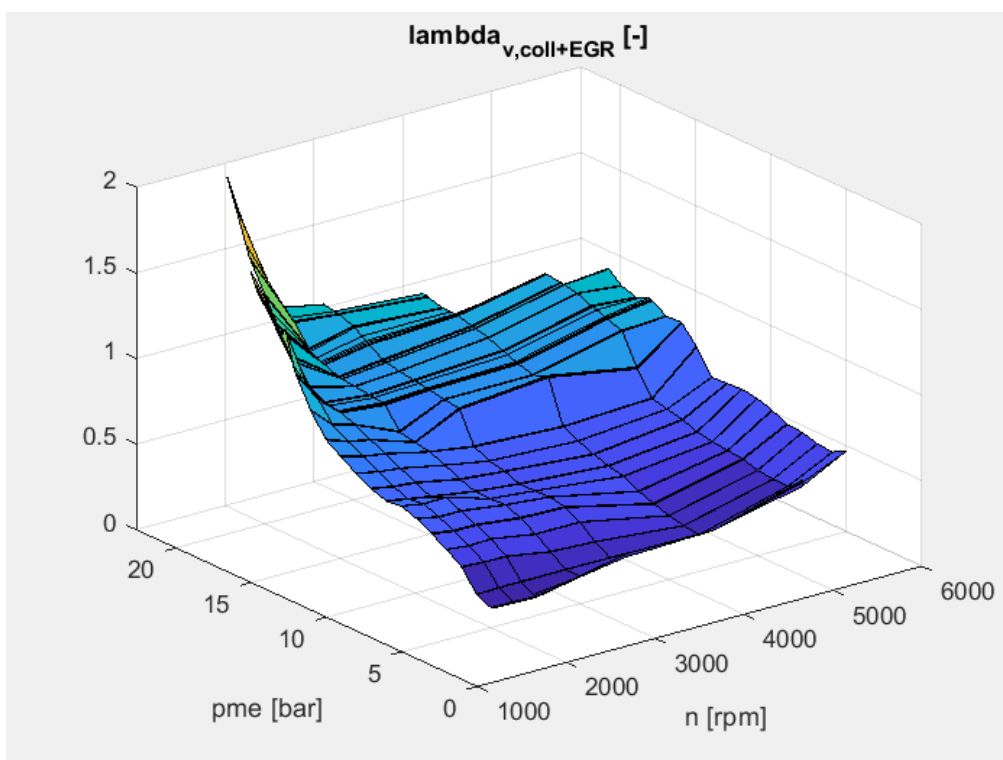


Figura 66: coefficiente di riempimento in riferimento alle condizioni del collettore considerando anche la quantità di EGR

Capitolo 5

Valutazione ciclo di pressione

Per valutare l'andamento della pressione in camera è necessario applicare il primo principio della termodinamica al volume definito dalla camera di combustione nella fase di compressione, combustione ed espansione (in cui si ha un volume che si può considerare chiuso trascurando i trafiletti di gas tra le sedi valvole e all'interfaccia stantuffo-canna).

Contemporaneamente dev'essere considerata la legge di combustione definita dalla funzione di Wiebe in modo da definire il contributo di calore introdotto dal combustibile. [2]

5.1 DESCRIZIONE DEL CODICE

Il codice relativo alla valutazione della pressione in camera è costituito dal codice principale ("Main") e da due funzioni da esso richiamate ("Wiebe" e "Pressure_Woschni").

Il codice *Main* effettua la lettura tramite "xlsread" di ciascuna riga del file Excel e ne estrae le variabili utili alla valutazione del ciclo di pressione (m_{fb} , IVC , p_{coll} , T_{coll} ,...).

Successivamente richiama prima la funzione "Wiebe" che riceve in ingresso i valori di m_{fb} e restituisce i parametri della funzione di Wiebe (par. 5.5) che si adattano meglio ai valori m_{fb} forniti e poi la funzione "Pressure_Woschni" che implementa effettivamente i modelli utili a valutare l'andamento della pressione in camera e a calcolare le grandezze da confrontare con i valori sperimentali forniti (es. p_{max} , $p_{R,max}$, $IMEPH$...).

Come ultima istruzione il codice "Main" scrive i risultati ottenuti nel foglio "Results" dello stesso file iniziale in modo da avere un confronto immediato con i valori forniti.

5.2 CALCOLO DELLA SUPERFICIE DELLA CAMERA

È utile calcolare le superfici laterali della camera di combustione in funzione dell'angolo di rotazione della manovella “ θ ” utile successivamente per il calcolo dello scambio termico verso l'esterno. In particolare, vengono considerati i termini relativi a stantuffo, testa e canna:

$$S_{stantuffo} = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \quad (22)$$

$$S_{testa} = k_t \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \quad (23)$$

Il termine $k_t = 1.1$ tiene conto della non planarità della testa nel caso di motori ad accensione comandata. Per il calcolo della superficie della canna in funzione dell'angolo di manovella (figura 67) si considera lo spostamento assiale dello stantuffo rispetto al PMS:

$$x_{\vartheta} = [r \cdot (1 - \cos(\theta)) + \frac{1}{\Lambda} \cdot (1 - \cos(\beta))] \quad (24)$$

in cui l'angolo di biella β è calcolato nel modo seguente:

$$\beta = \pm \sqrt{(1 - \Lambda^2 \cdot \sin^2(\theta))} \quad (25)$$

$$\Lambda = \frac{r}{l} \quad (3)$$

$$S_{canna(\vartheta)} = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot x_{(\vartheta)} \quad (26)$$

5.3 CALCOLO DEL VOLUME DELLA CAMERA

Il calcolo del volume della camera in funzione dell'angolo di manovella (figura 68) è calcolato a partire dai valori di alesaggio, corsa e di rapporto di compressione geometrico.

Il volume totale unitario è dato dalla somma di volume morto e di cilindrata unitaria:

$$V_{tot,u} = V_{m,u} + V_u \quad (27)$$

In cui vale $V_u = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot c \quad (28)$

e il volume morto unitario è dato da $V_{m,u} = \frac{V_u}{\varepsilon - 1} \quad (29).$

Il volume della camera è definito in funzione dello spostamento assiale del pistone e di conseguenza del valore angolare θ :

$$V_{(\theta)} = V_m + S_{stantuffo} \cdot x_{(\theta)} \quad (30)$$

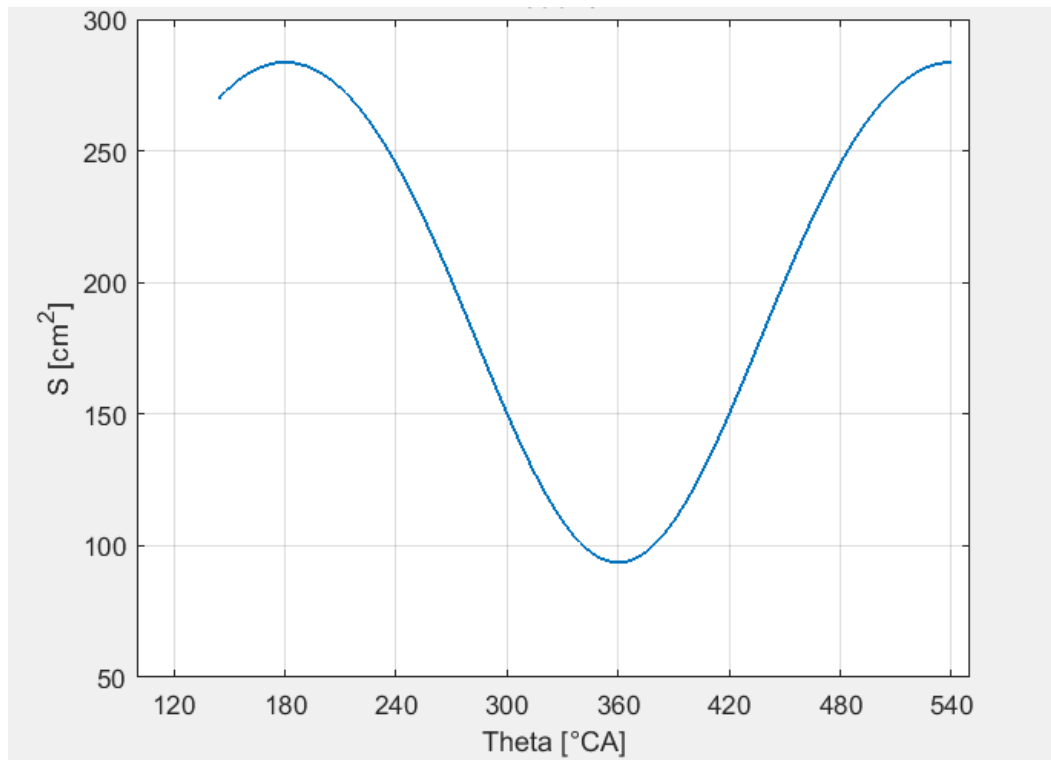


Figura 67: andamento della superficie della camera di combustione in funzione dell'angolo di manovella

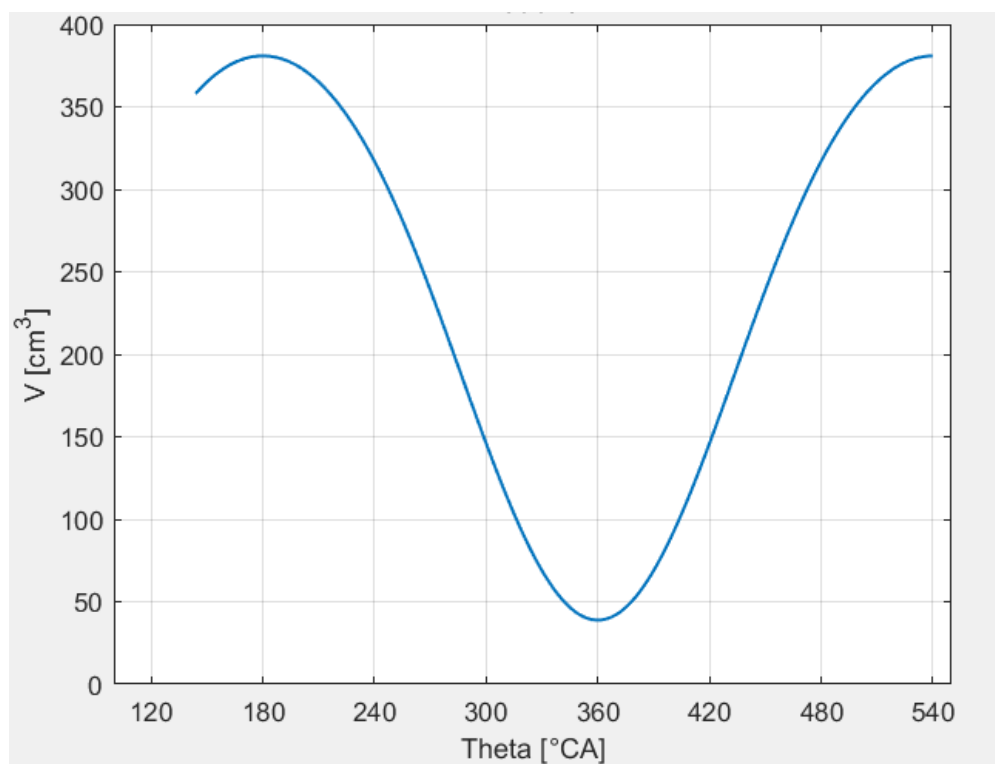


Figura 68: andamento del volume della camera di combustione in funzione dell'angolo di manovella

5.4 CALCOLO DELLA MASSA IN CAMERA

Il calcolo della massa intrappolata in camera di combustione è effettuato a partire dalle condizioni di pressione e temperatura nel collettore e del volume della camera all'istante di IVC applicando la funzione di stato per i gas perfetti:

$$m_{tot} = \frac{p_{coll} \cdot V_{ICV}}{R \cdot T_{coll}} \quad (31)$$

Il valore ottenuto è quindi comprensivo di massa d'aria fresca, massa di combustibile iniettato, massa di EGR e massa di gas residui:

$$m_{tot} = m_a + m_b + m_{EGR} + m_{res} \quad (32)$$

5.5 CALCOLO DELLA PRESSIONE A MOTORE TRASCINATO

Il calcolo della pressione a motore trascinato (figura 69) viene effettuato nell'ipotesi di compressione ed espansione politropica di esponenti costanti rispettivamente definiti da y_{comp} e y_{exp} (33).

Anche in questo caso vengono prese come riferimento la pressione atmosferica e il volume della camera all'istante di IVC, distinguendo la fase di compressione dalla fase di espansione:

$$\begin{cases} p_{motored,i} = p_{atm} \cdot \left(\frac{V_{IVC}}{V_i}\right)^{y_{comp}} & \text{se } i < i_{TDC} \\ p_{motored,i} = p_{TDC} \cdot \left(\frac{V_{TDC}}{V_i}\right)^{y_{exp}} & \text{se } i > i_{TDC} \end{cases} \quad (33)$$

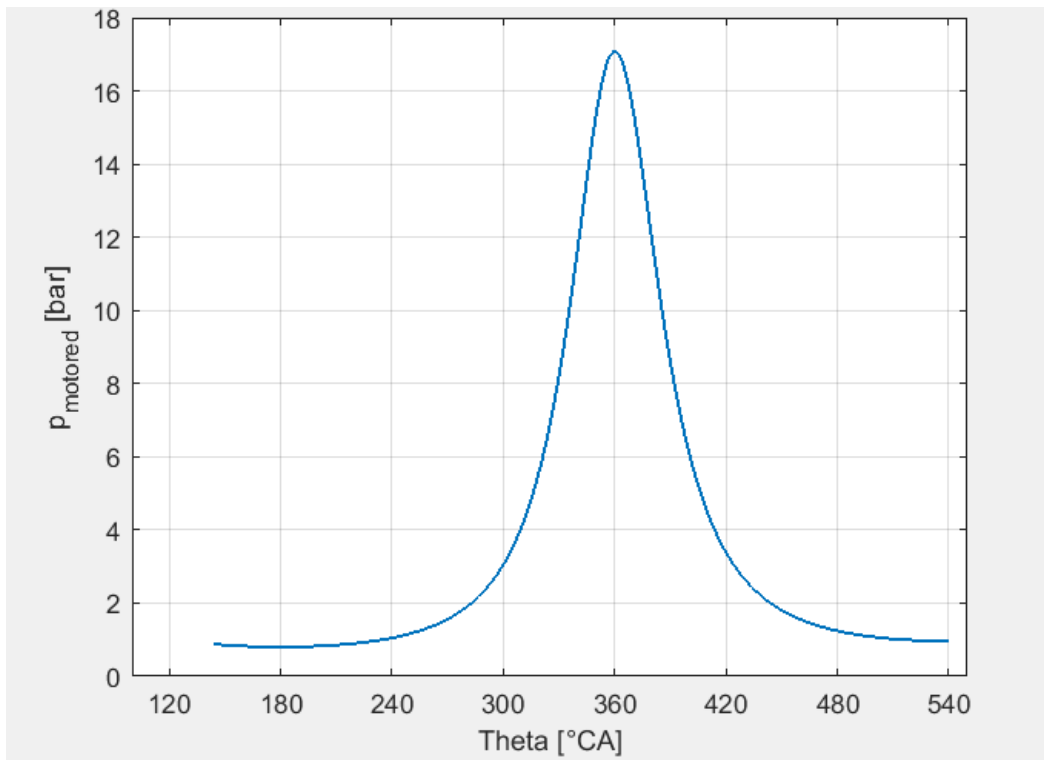


Figura 69: andamento della pressione in camera a motore trascinato (senza combustione)

5.6 CALCOLO PARAMETRI FUNZIONE DI WIEBE

Vengono calcolati i parametri della funzione di Wiebe a partire dai valori di MFB relativi alle frazioni di massa bruciata di 5%, 10%, 50% e 90%:

$$x_b = 1 - e^{-a \cdot \left(\frac{\vartheta - \vartheta_0}{\vartheta_f - \vartheta_0} \right)^{m+1}} \quad (34)$$

La funzione “Wiebe” in Matlab (figura 70) determina, attraverso la funzione ‘*lsqnonlin*’, i valori di a , m , ϑ_f e ϑ_0 che minimizzano l’errore tra i valori reali di MFB forniti e quelli calcolati dalla stessa funzione di Wiebe.

Inoltre, impone che per $\vartheta = \vartheta_0$ MFB sia pari a 0% mentre per $\vartheta = \vartheta_f$ MFB sia pari a 100% applicando 3 iterazione tramite ciclo “for” su questi due valori in modo da aumentare la precisione della funzione stessa (figura 71).

I valori di MFB forniti sono forniti dal software “CONCERTO” [4] a partire dall’andamento del rilascio di calore calcolato dai valori di pressione misurati e volume della camera:

$$dQ_{ht} + dQ_{ch} = \frac{1}{k_i - 1} \cdot [k \cdot p_i \cdot (V_{i+1} - V_{i-1}) + V_i \cdot (p_{i+1} - p_{i-1})] \quad (35)$$

La formula deriva dall’applicazione del I principio della termodinamica per un sistema chiuso:

$$\delta Q = \delta L + dU^* \quad (36)$$

in cui è definita la variazione dell’energia interna totale:

$$dU^* = dU_{ch} + dU_{th} = m_b \cdot H_i \cdot dx_b + m \cdot c_v \cdot dT = -dQ_{ch} + m \cdot c_v \cdot dT \quad (37)$$

e il lavoro svolto dal sistema verso l’esterno:

$$\delta L = p \cdot dV \quad (38)$$

Si considera l’equazione di stato dei gas perfetti

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad (39)$$

da cui si ottiene

$$m \cdot dT = \frac{1}{R} \cdot (p \cdot dV + V \cdot dp) \quad (40)$$

Sostituendo i vari termini nella (36) si ottiene:

$$dQ_{ht} + dQ_{ch} = p \cdot dV + \frac{c_v}{R} \cdot (p \cdot dV + V \cdot dp) \quad (41)$$

$$dQ_{ht} + dQ_{ch} = \frac{k}{k-1} \cdot p \cdot dV + \frac{1}{k-1} \cdot V \cdot dp \quad (42)$$

Riscrivendola per un sistema discretizzato si ottiene quindi la formula (35).

```

13 - f=@(A) ((mfb(:)-(1-exp(-A(1)*((mfb_deg(:)-A(3))/(A(4))))).^ (A(2)+1))))).^2+...
14 - ((exp(-A(1)*((A(5)-A(3))/(A(4))))).^ (A(2)+1))))).^2+...
15 - (1-(exp(-A(1)*((A(5)-A(4)-A(3))/(A(4))))).^ (A(2)+1))))).^2); |
16
17 - x0=[0,0,theta_0,delta_theta_0,theta_0+delta_theta_0];
18
19 - [B,t]=lsqnonlin(f,x0);
20
21 - a=real(B(1));
22 - m=real(B(2));
23 - theta_0 =real(B(3));
24 - delta_theta_0 =real(B(4));
25 - theta_f=real(B(5));

```

Figura 70: istruzioni contenute nella funzione Wiebe (APPENDICE B) in cui attraverso la funzione "lsqnonlin" si trovano i valori dei parametri relativi alla funzione di Wiebe () che minimizzano la differenza tra i valori forniti e i valori calcolati con gli stessi parametri applicati alla funzione

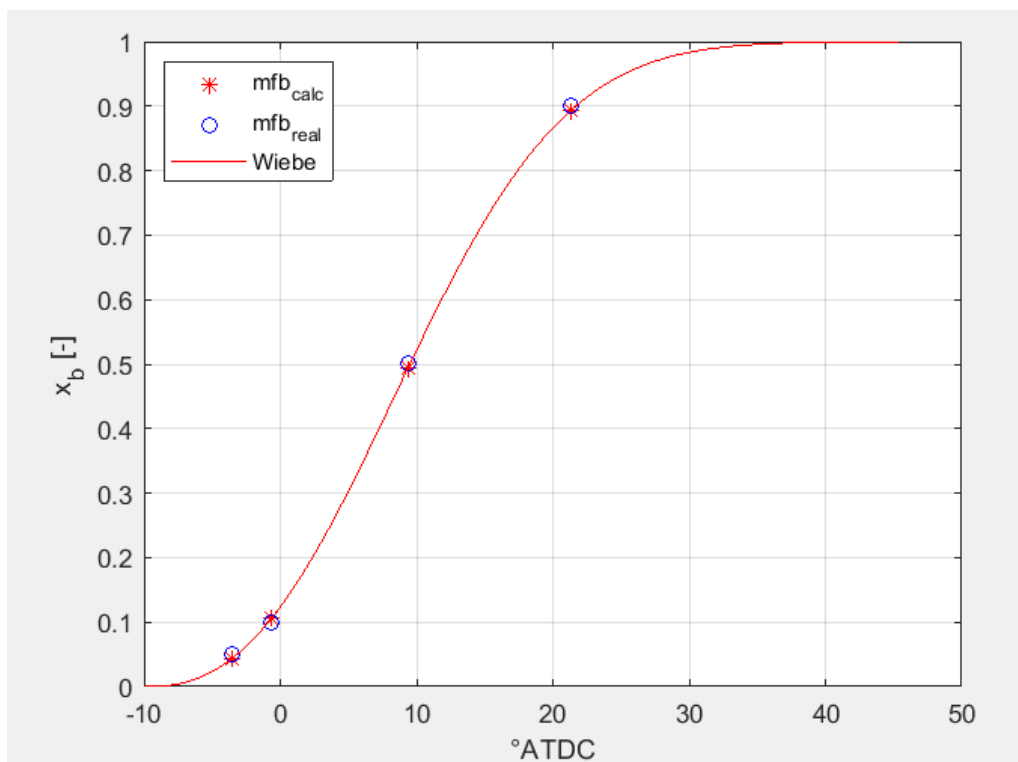


Figura 71: esempio di andamento ricavato attraverso la funzione implementata (punto 1500 x 8)

5.7 CALCOLO DELLA PRESSIONE IN CAMERA

È effettuato il calcolo della pressione in camera a considerando l'andamento della funzione di Wiebe ricavato (figura 72).

La pressione ad ogni istante di discretizzazione è calcolata invertendo la formula (1):

$$p_{i+1} = p_{i-1} + \frac{1}{V_i} \cdot [(k_i - 1) \cdot (dQ_{ch} + dQ_{ht}) - k_i \cdot p_i \cdot (V_{i+1} - V_{i-1})] \quad (36)$$

Il termine di scambio termico con le pareti dQ_{ht} è calcolato secondo il modello di scambio termico di Woschni che definisce nel seguente modo la potenza termica scambiata con le pareti (figura 73):

$$\dot{Q}_{ht,i} = h_{Wh,i} \cdot [S_{testa} \cdot (T_i - T_{testa}) + S_{stantuffo} \cdot (T_i - T_{stantuffo}) + S_{canna,i} \cdot (T_i - T_{canna})] \quad (37)$$

in cui è definito il coefficiente di scambio termico globale (figura 74):

$$h_{Wh,i} = 3.26 \cdot d^{-0.2} \cdot p_i^{0.8} \cdot w_i^{0.8} \cdot T_i^{-0.55} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (38)$$

in cui w_i è la velocità media locale del gas stimata dalla seguente formula:

$$w_i = C_1 \cdot v_m + C_2 \cdot \frac{V_i \cdot T_r}{p_r \cdot V_r} \cdot (p_i - p_{motored}) \left[\frac{m}{s} \right] \quad (39)$$

considerando come valori di riferimento T_r, p_r e V_r i relativi valori all'istante di IVC e come valori assunti da C_1 e C_2 i rispettivamente di 2.28 e $3.24 \cdot 10^{-3}$ nella fase di combustione ed espansione, e di 2.28 e 0 nella fase di compressione.

I valori delle temperature di testa, stantuffo e canna sono assunte costanti nel modo seguente:

$$\begin{aligned} T_{testa} &= 550K \\ T_{stantuffo} &= 450K \\ T_{canna} &= 400K; \end{aligned}$$

v_m è la velocità media dello stantuffo $\left(\frac{c}{2} \cdot n\right)$ (40) mentre la temperatura all'istante i -esimo è ottenuta dall'equazione di stato dei gas perfetti (figura 75):

$$T_i = \frac{p_i \cdot V_i}{m_{tot} \cdot R} [K] \quad (41)$$

Il calore scambiato attraverso le pareti ad ogni istante angolare della discretizzazione è quindi dato da:

$$dQ_{ht,i} = \frac{\dot{Q}_{ht,i}}{\omega} \cdot d\vartheta = \frac{\dot{Q}_{ht,i}}{\omega} \cdot (\vartheta_{i+1} - \vartheta_{i-1}) [J] \quad (42)$$

ricordando che $\dot{Q}_{ht,i} = \frac{dQ_{ht,i}}{dt}$ (43) e $\omega = \frac{d\vartheta}{dt}$ (44).

Il termine chimico del rilascio di calore è invece dato da

$$dQ_{ch} = H_i \cdot dm_b \quad (45)$$

e considerando che vale

$$dm_b = m_b \cdot dx_b \quad (46)$$

si ottiene

$$dQ_{ch} = m_b \cdot H_i \cdot dx_b \quad (47) .$$

Per il sistema discretizzato la formula (36) diventa quindi:

$$p_{i+1} = p_{i-1} + \frac{1}{V_i} \cdot \left[(k_i - 1) \cdot \left[(x_{b,i+1} - x_{b,i-1}) \cdot m_b \cdot H_i - k_i \cdot p_i \cdot (V_{i+1} - V_{i-1}) + \frac{\dot{Q}_i}{\omega} \cdot (\vartheta_{i+1} - \vartheta_{i-1}) \right] \right] \quad (48)$$

Per il calcolo dei valori di k viene applicata la formula di Gatowsky [5] :

$$k_{(i)} = 1.392 - 8.13 \cdot 10^{-5} \cdot T(i) \quad (49)$$

```

104 - T(i)=p_L(i)*V(i)/10/(m_tot*R); %[K]
105
106 - k(i)=1.392-8.13*10^-5*T(i);
107
108 - w(i) = C_1*U/1000+C_2*(V_u/V(IVC))*T(IVC)/p_L(IVC)*(abs((p_L(i-1)-p_motored(i))))); %[m/s]
109
110 - h(i) = 3.26*(d*10^-3)^(-0.2)*(p_L(i)*10^2)^(0.8)*w(i)^0.8*T(i)^-0.55; %[W/m^2K]
111
112 - Q(i) = h(i)*(S_testa*(T_testa-T(i))+S_canna(i)*(T_canna-T(i))...
113         +S_stantuffo*(T_stantuffo-T(i)))*10^-6; %[W]
114
115 - p_L(i+1)=p_L(i-1)+1/V(i)*((k(i)-1)*((x_bw(i+1)-x_bw(i-1))*m_b*H_i*10+...
116         (10*Q(i)/omega)*(theta(i+1)-theta(i-1)))-k(i)*p_L(i)*(V(i+1)-V(i-1))); %[bar]

```

Figura 72: istruzioni relative al calcolo della pressione in camera, sono inserite in un ciclo for che scorre tutti i punti tra IVC ed EVO della discretizzazione

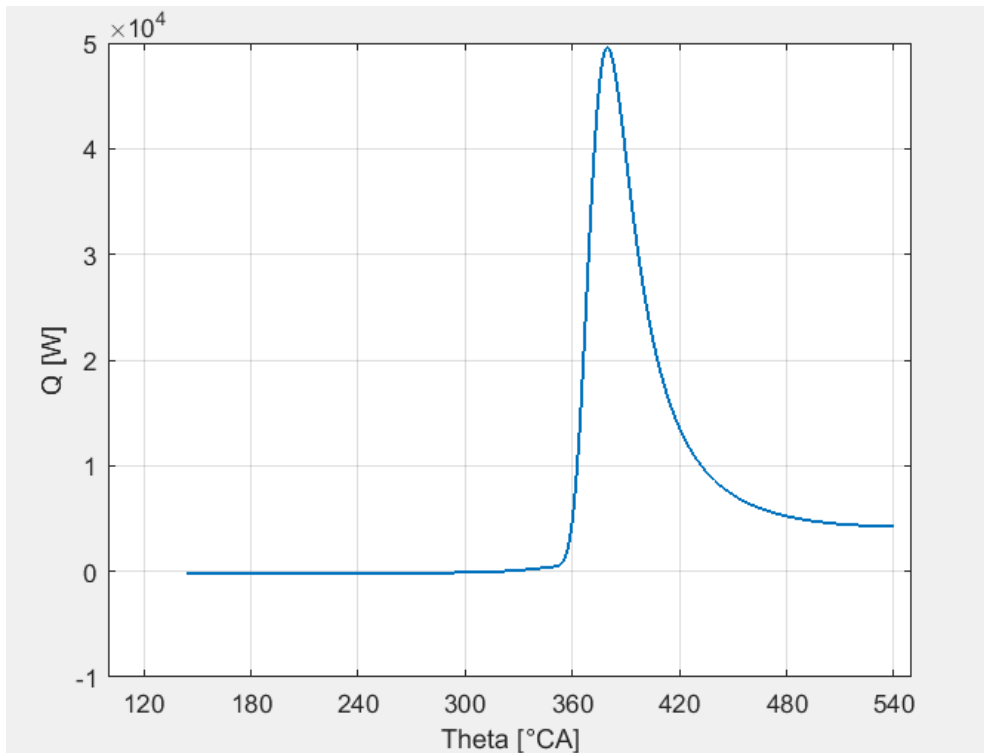


Figura 73: andamento dello scambio termico a parete stimato secondo il modello di Woschni

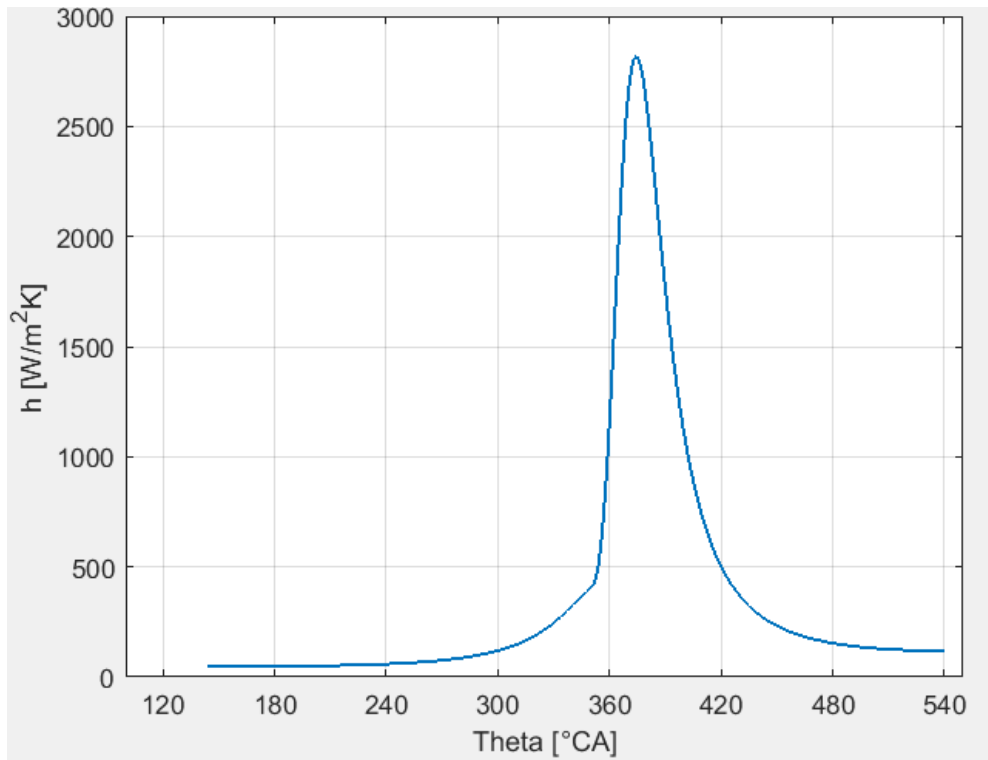


Figura 74: andamento del coefficiente di scambio termico valutato secondo il modello di Woschni

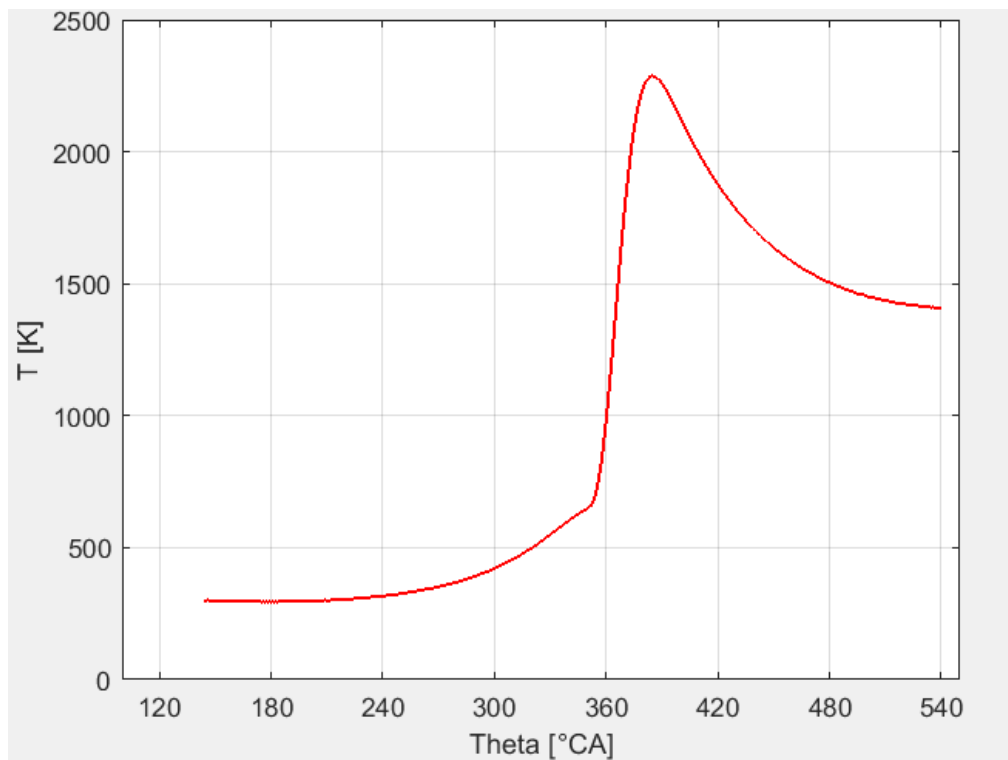


Figura 75: andamento della temperatura in camera calcolata dal ciclo ricostruito

5.8 CALCOLO DI HRR E NHRR

È possibile ora calcolare il rilascio netto di calore (Net Heat Release Rate) con la seguente formula:

$$NHRR_i = \frac{k_i}{k_i - 1} \cdot p_i \cdot \frac{(V_{i+1} - V_{i-1})}{(\vartheta_{i+1} - \vartheta_{i-1})} + \frac{1}{k_i - 1} \cdot V_i \cdot \frac{(p_{i+1} - p_{i-1})}{(\vartheta_{i+1} - \vartheta_{i-1})} \quad [J/^\circ] \quad (50)$$

Analogamente è possibile ricalcolare il rilascio di calore lordo (Heat Release Rate) sottraendo il termine di scambio termico con le pareti al calcolo del NHRR (figura 76):

$$HRR_i = \frac{k_i}{k_i - 1} \cdot p_i \cdot \frac{(V_{i+1} - V_{i-1})}{(\vartheta_{i+1} - \vartheta_{i-1})} + \frac{1}{k_i - 1} \cdot V_i \cdot \frac{(p_{i+1} - p_{i-1})}{(\vartheta_{i+1} - \vartheta_{i-1})} - \frac{\dot{Q}_i}{\omega} \quad [J/^\circ] \quad (51)$$

A partire dai valori istantanei di HRR e NHRR (figura 78) vengono quindi calcolati i valori integrali (figura 79) dei rispettivi andamenti di rilascio di calore:

$$int_{NHRR} = \sum_i NHRR_i \quad [J] \quad (52)$$

$$int_{HRR} = \sum_i HRR_i \quad [J] \quad (53)$$

Le funzioni sommatoria vengono implementate in Matlab con la funzione “cumtrapz” (figura 77).

```

139 - HRR(i) = k(i)/(k(i)-1) * p_L(i)/10*(V(i+1)-V(i-1))/(theta(i+1)-theta(i-1)) + ...
140       1/(k(i)-1) * V(i)/10*(p_L(i+1)-p_L(i-1))/(theta(i+1)-theta(i-1));
141
142 - NHRR(i) = k(i)/(k(i)-1) * p_L(i)/10*(V(i+1)-V(i-1))/(theta(i+1)-theta(i-1)) + ...
143       1/(k(i)-1) * V(i)/10*(p_L(i+1)-p_L(i-1))/(theta(i+1)-theta(i-1)) + Q(i)/omega;

```

Figura 76: istruzioni di calcolo di Heat Release Rate e Net Heat Release Rate istantanei

```

172 - int_HRR = cumtrapz(theta(IVC:EVO-1), (HRR(IVC:EVO-1)));
173 - int_NHRR = cumtrapz(theta(IVC:EVO-1), (NHRR(IVC:EVO-1)));

```

Figura 77: istruzioni di calcolo dei valori integrali di Heat Release Rate e Net Heat Release Rate

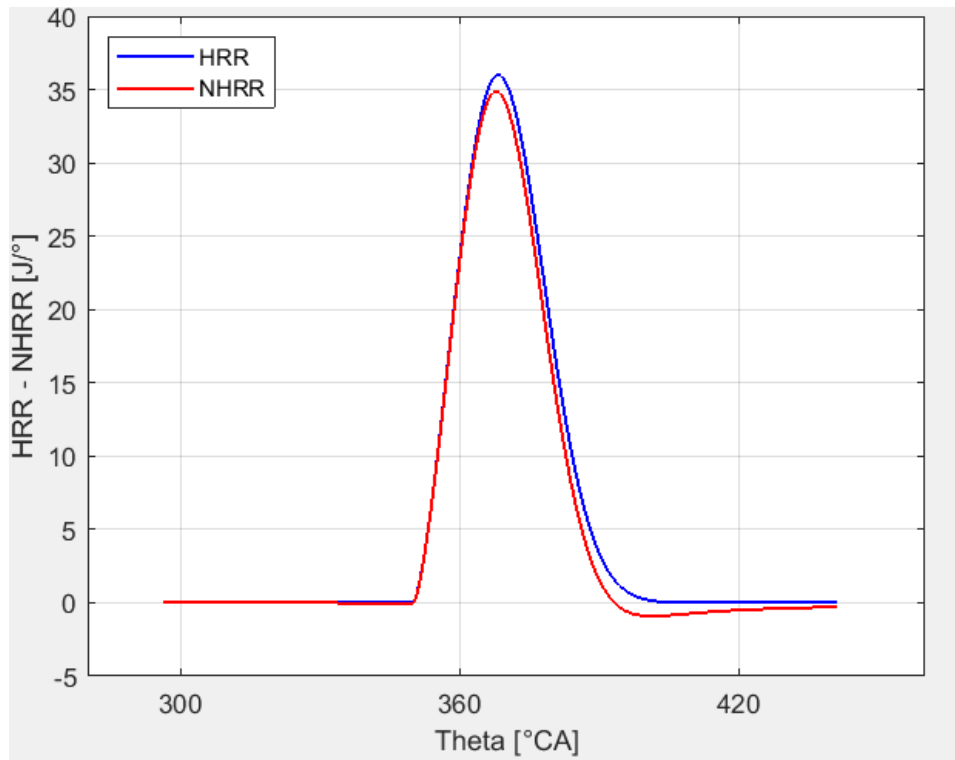


Figura 78: andamenti di Heat Release Rate e Net Heat Release Rate istantanei

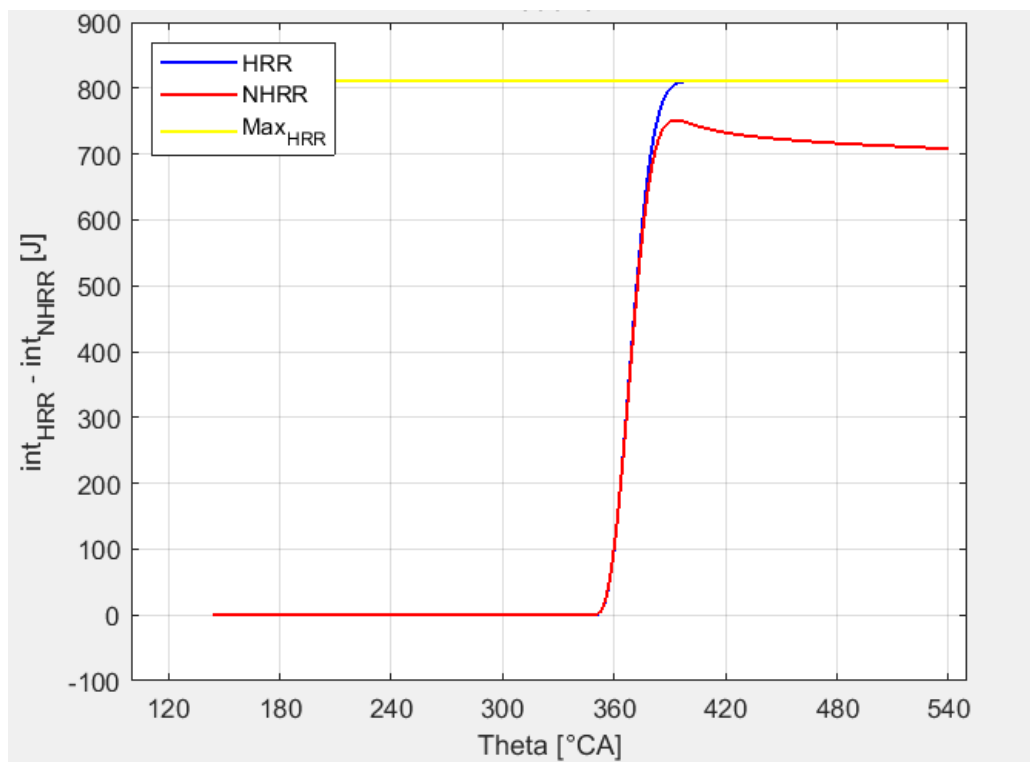


Figura 79: andamenti dei valori integrali di Heat Release Rate e Net Heat Release Rate, confrontabili con il massimo valore di Heat Release Rate

5.9 MASSIMA VARIAZIONE DI PRESSIONE IN CAMERA

Viene calcolato il massimo valore di variazione della pressione in camera rispetto all'angolo di manovella attraverso la formula (54):

$$p_{R,max,i} = \max\left(\frac{\Delta p_i}{\Delta \vartheta_i}\right) \quad (54)$$

In cui $\Delta p_i = p_{i+1} - p_i$ (55) .

Il codice Matlab utilizza le funzioni “max” e “diff” (figura 80) limitate all'intervallo angolare relativo al ciclo di pressione ricostruito.

```
151 - | p_r_max=max(diff(p_L(IVC:EVO))./diff(theta(IVC:EVO)));
```

Figura 80: istruzione di calcolo del massimo valore di variazione di pressione in camera

5.10 CALCOLO DI IMEPH

Il calcolo della pressione media indicata lorda è effettivamente calcolabile dal ciclo di pressione ricostruito considerando l'intervallo angolare del ciclo da 180° a 540° rispetto al punto morto di inizio aspirazione.

Il calcolo è eseguito applicando la formula (56):

$$imep_{h,calc} = \frac{\sum_{\vartheta=180^{\circ}}^{\vartheta=540^{\circ}} p_i \cdot \Delta V_i}{V_u} \quad (56)$$

Anche in questo caso il codice implementa la sommatoria tramite la funzione “cumtrapz” (figura 81).

```
157 - | imep_h=cumtrapz(V(180*d_theta:540*d_theta),p_L(180*d_theta:540*d_theta))/V_u;
158
159 - | imep_h=imep_h(end);|
160
```

Figura 81: istruzioni del codice per il calcolo di IMEP_H attraverso la funzione “cumtrapz”

5.11 CALCOLO DI MFB DALL'ANDAMENTO DI HRR

viene effettuato il ricalcolo di mfb dal valore integrale di HRR secondo la formula (57)

$$mfb = \frac{int_{HRR}}{m_b \cdot H_i} \quad (57)$$

in cui $m_b \cdot H_i$ rappresenta il massimo valore raggiungibile di int_{HRR} .

Il codice Matlab implementa un ciclo di ricerca degli indici relativi ai valori notevoli di mfb (5%, 10%, 50% e 90%) identificando il valore più vicino (essendo un sistema discretizzato non è detto che ci siano esattamente i valori di mfb ricercati).

Si osserva che i valori ricalcolati scostano dai valori iniziali al massimo di 2° di angolo di manovella.

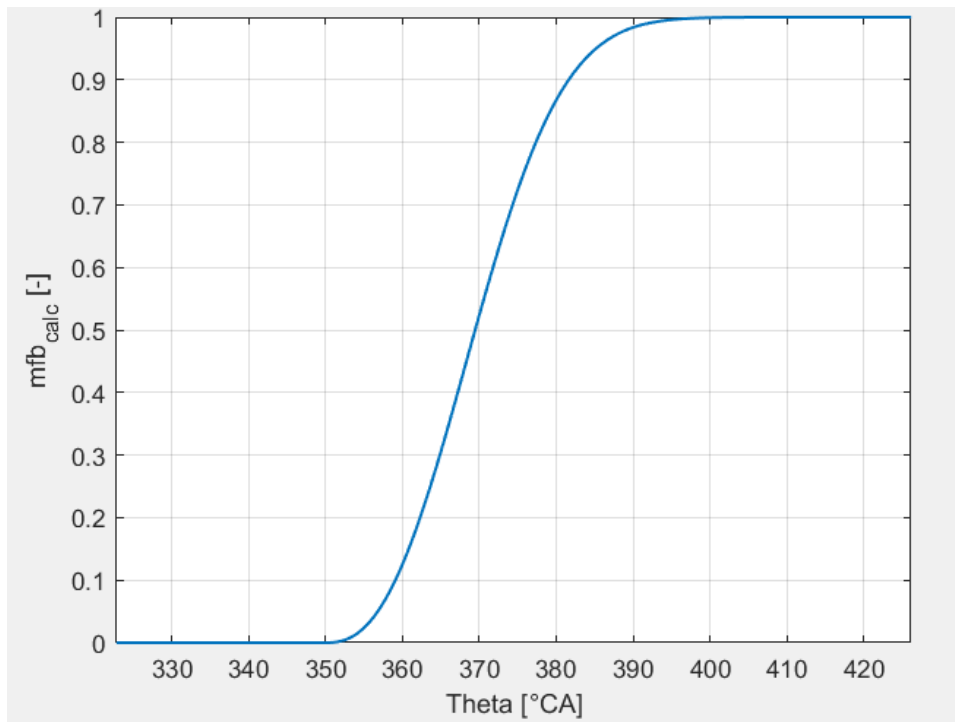


Figura 82: rappresentazione grafica dell'andamento di mfb ricalcolato dall'andamento di HRR

Capitolo 6

Considerazioni su alcuni punti valutati

È quindi possibile analizzare alcuni punti notevoli calcolati con il codice, in generale per ogni regime di rotazione si considerano un punto a basso carico, un punto a carico intermedio e un punto ad alto carico (full load).

I risultati relativi a tutti i punti possono essere visionati nel foglio “Results” del file Excel di partenza.

Tabella 1: dati relativi ad alcuni punti analizzati

rpm	b MEP	imep_h	r_c	p_max	p_r_max	imep_h_calc	r_c_calc	p_max_calc	p_r_max_calc	ERR_imep_h	ERR_R_c	ERR_p_max	ERR_p_r_max
[rpm]	[bar]	[bar]	[-]	[bar]	[bar/°]	[bar]	[-]	[bar]	[bar/°]	[%]	[%]	[%]	[%]
1500	2,01	3,05	5,21	20,81	0,73	3,89	5,20	19,28	0,86	27,40	-0,15	-7,34	17,41
1500	10,01	10,5	8,91	50,40	2,37	11,98	8,96	50,97	2,35	14,09	0,51	1,14	-0,75
1500	15,68	15,81	9,75	57,72	3,95	18,13	9,76	57,33	2,83	14,67	0,11	-0,67	-28,27
1750	2,02	3	5,27	16,47	0,68	3,88	5,28	19,30	0,79	29,39	0,24	17,15	15,95
1750	12,02	12,34	9,28	52,84	2,21	14,18	9,31	54,63	2,11	14,87	0,25	3,40	-4,38
1750	19,46	19,43	9,74	62,15	2,63	23,55	9,75	67,54	2,72	21,22	0,12	8,68	3,60
2000	2,01	3,01	5,41	14,77	0,54	3,89	5,44	17,62	0,64	29,11	0,57	19,27	18,99
2000	11,99	12,31	9,07	55,80	2,42	14,17	9,07	57,96	2,37	15,14	0,05	3,87	-2,07
2000	22,5	22,75	9,72	67,81	2,77	31,30	9,75	81,24	3,31	37,59	0,25	19,81	19,39
2500	2	3,16	6,45	15,57	0,67	3,91	6,45	18,29	0,70	23,67	-0,07	17,49	4,79
2500	12,97	13,48	8,57	57,86	2,26	15,43	8,61	59,65	2,34	14,48	0,51	3,09	3,46
2500	22,63	22,98	9,18	63,72	2,02	30,41	9,21	74,07	2,29	32,32	0,38	16,25	13,15
3000	2,01	3,26	7,56	15,82	0,7	4,15	7,56	19,05	0,66	27,42	0,06	20,41	-6,13
3000	11,99	12,66	8,57	56,99	2,23	14,73	8,61	61,38	2,41	16,34	0,47	7,70	8,04
3000	22,04	22,7	8,15	65,35	2	29,19	8,26	72,49	2,32	28,59	1,41	10,93	15,83
4000	1,96	3,43	8,64	15,66	0,53	4,44	8,66	20,30	0,64	29,57	0,24	29,60	21,23
4000	12,01	13,1	8,97	62,41	2,59	15,38	9,00	68,17	2,66	17,38	0,30	9,22	2,64
4000	21,26	22,96	8,15	69,65	2,7	31,06	8,26	78,38	2,86	35,26	1,41	12,54	6,10
5000	2,05	3,95	9,59	19,75	0,8	4,94	9,60	23,51	0,89	25,00	0,07	19,06	11,30
5000	11,01	12,74	9,49	60,18	2,64	15,07	9,49	67,87	2,45	18,28	0,08	12,78	-7,05
5000	19,19	22,01	8,15	71,05	4,38	29,57	8,26	75,51	2,94	34,35	1,41	6,27	-32,86
5500	2,02	4,14	9,78	22,61	1,07	5,05	9,79	23,25	0,99	22,10	0,13	2,82	-7,70
5500	11,01	13,14	9,78	65,39	3,29	15,57	9,79	69,30	2,97	18,47	0,12	5,97	-9,88
5500	17,81	21,13	8,15	72,10	4,42	28,55	8,26	76,99	3,13	35,10	1,41	6,79	-29,27

Le grandezze considerate per effettuare il confronto tra valori calcolati e valori forniti sono pressione media indicata lorda, rapporto di compressione efficace, pressione massima raggiunta in camera e massima variazione di pressione in camera.

La scelta di queste grandezze per il confronto è dovuta al fatto che sono le variabili calcolate in modo più affidabile sul ciclo di pressione a valvole chiuse (per esempio la valutazione della pressione media indicata netta richiederebbe di conoscere l'andamento di pressione dell'intero ciclo e quindi anche durante le fasi di ricambio fluido a valvole aperte)

Si osserva dalla tabella che il modello sovrastima sempre (eccetto per il punto 1500 x 2 e 1500 x Full Load) il valore di pressione massima in camera.

In tutti i casi si ha invece una sovrastima dei valori di imep_h essendo una grandezza ottenuta dall'integrale del segnale di pressione su parte del ciclo.

L'errore relativo al rapporto di compressione (R_c) risulta invece generalmente di entità molto ridotta dato che è dovuto all'istante di attuazione della chiusura della valvola di aspirazione ed è stato considerato come valore “cardine” per la valutazione del ciclo di pressione.

Gli errori relativi a pressione massima (p_max) e variazione massima di pressione (p_r_max) risultano di valore piuttosto variabile a seconda dei differenti casi considerati

6.1 1500 rpm

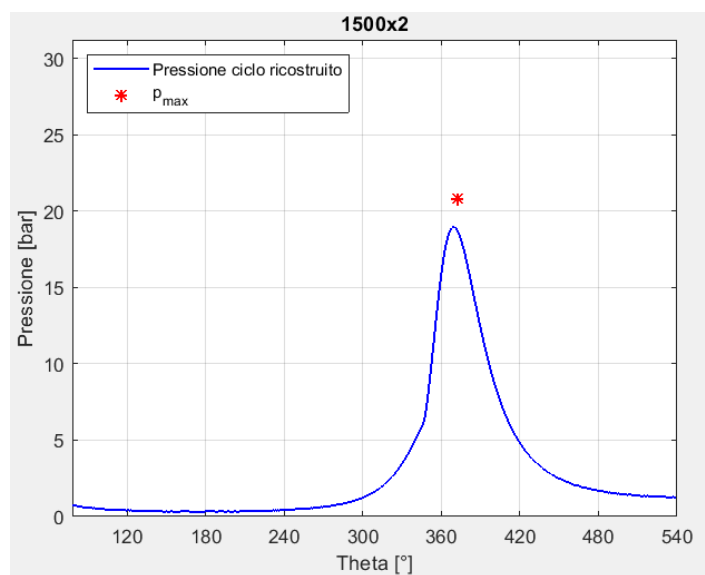


Figura 83: andamento pressione ciclo ricostruito punto 1500 x 2

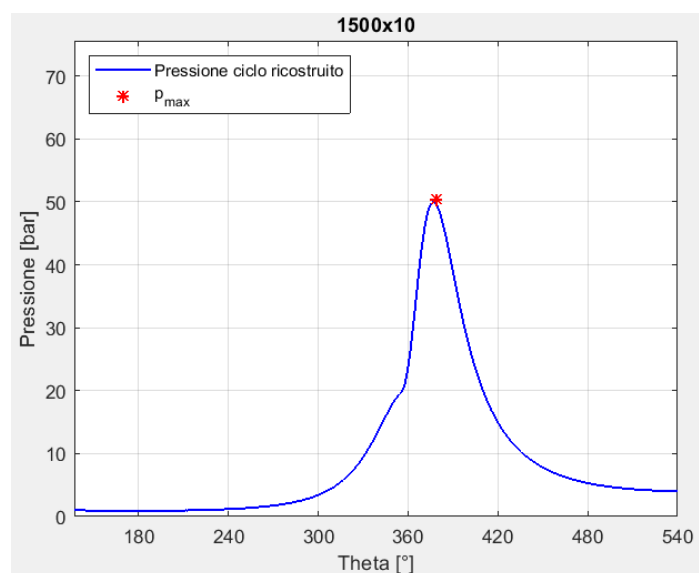


Figura 84: andamento pressione ciclo ricostruito punto 1500 x 10

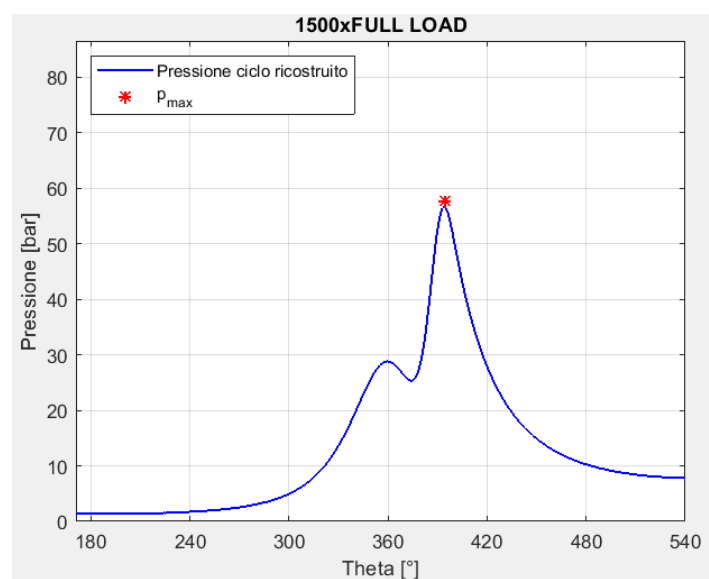


Figura 85: andamento pressione ciclo ricostruito punto 1500 x Full Load

6.2 1750 rpm

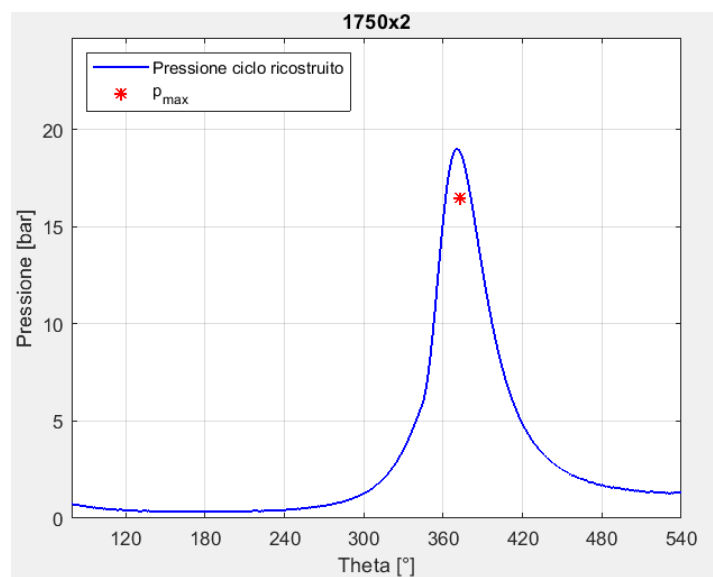


Figura 86: andamento pressione ciclo ricostruito punto 1750 x 2

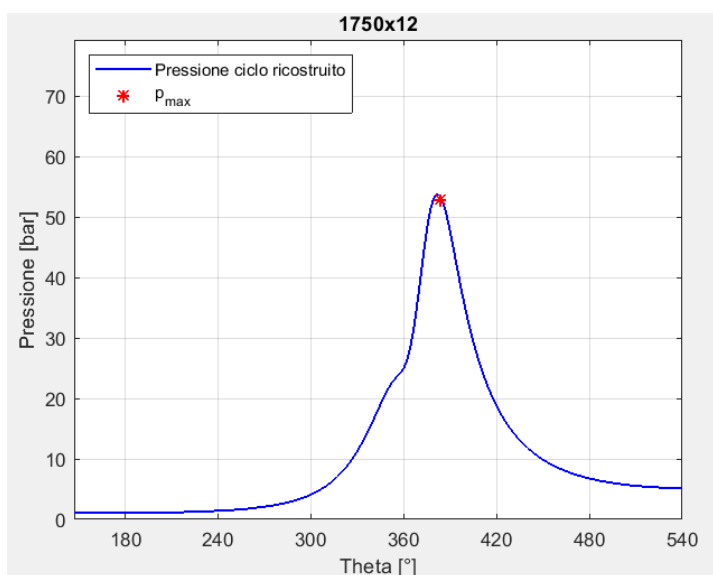


Figura 87: andamento pressione ciclo ricostruito punto 1750 x 12

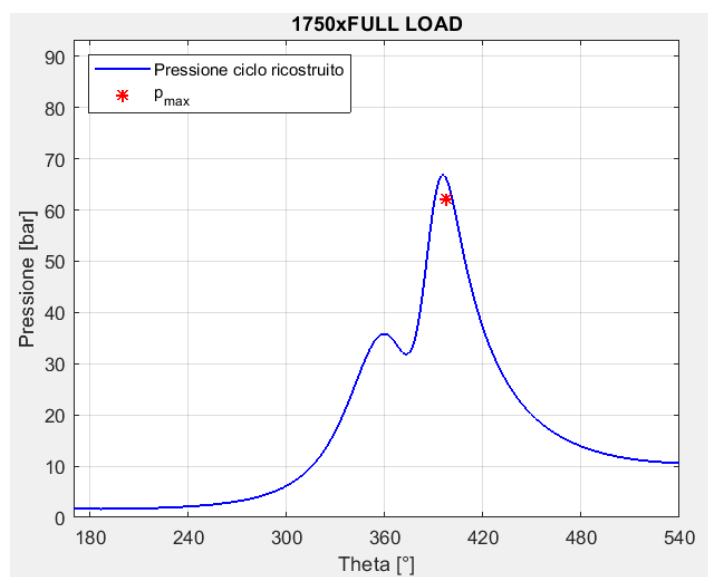


Figura 88: andamento pressione ciclo ricostruito punto 1750 x Full Load

6.3 2000 rpm

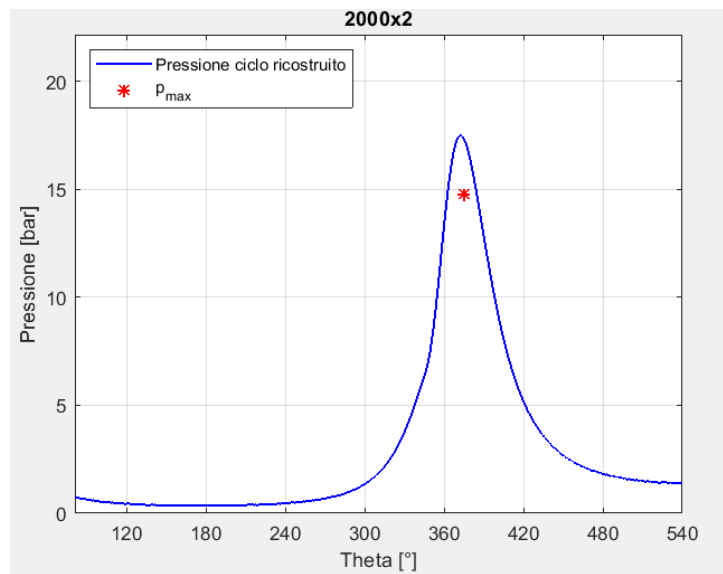
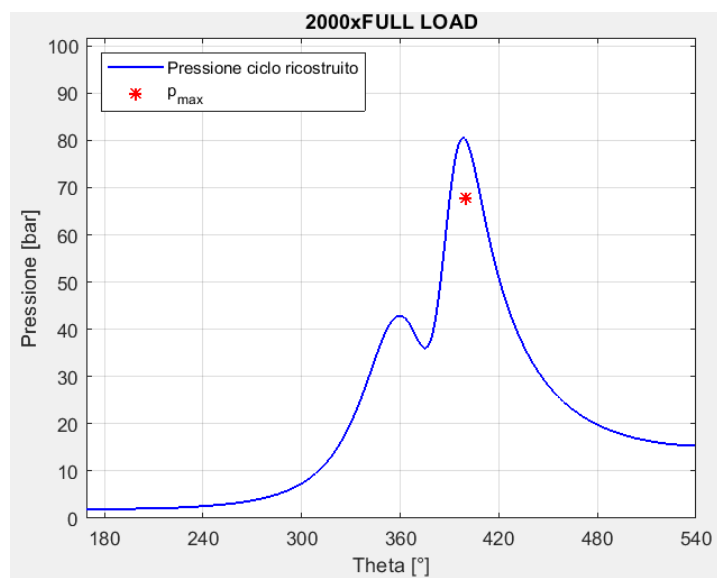
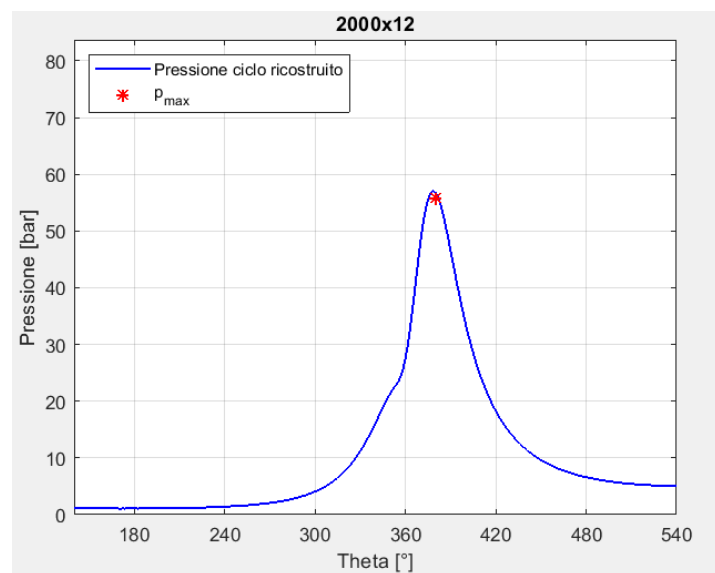


Figura 89



6.4 2500 rpm

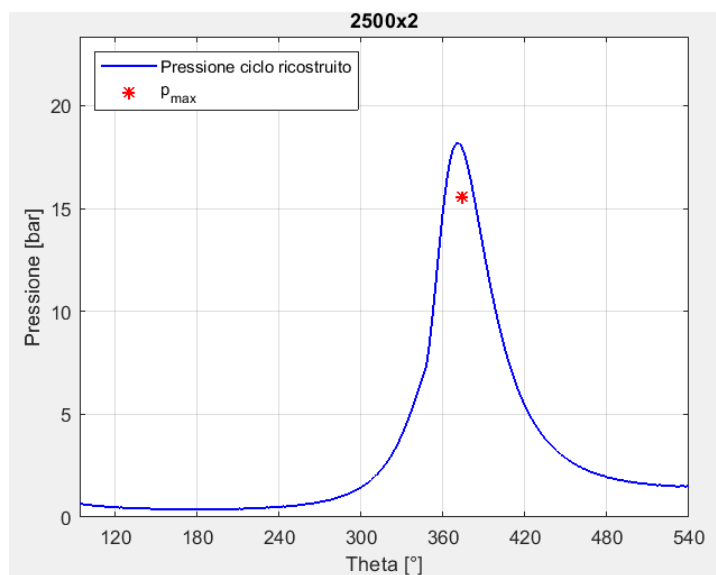


Figura 90: andamento pressione ciclo ricostruito punto 2500 x 2

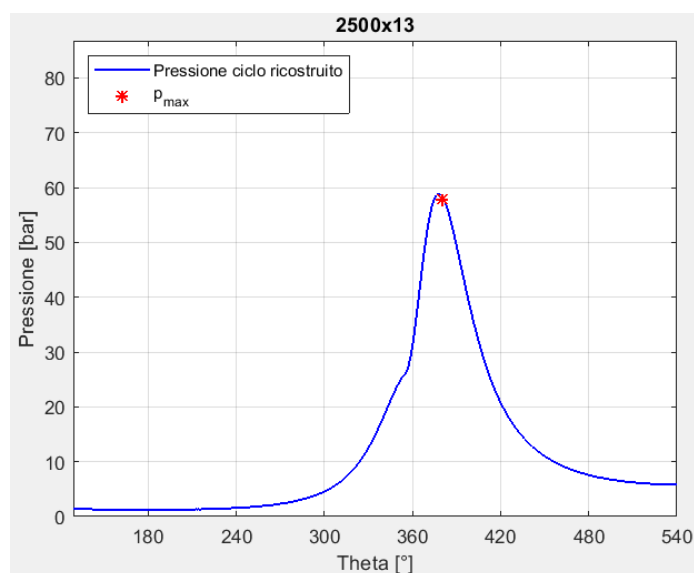


Figura 91: andamento pressione ciclo ricostruito punto 2500 x 13

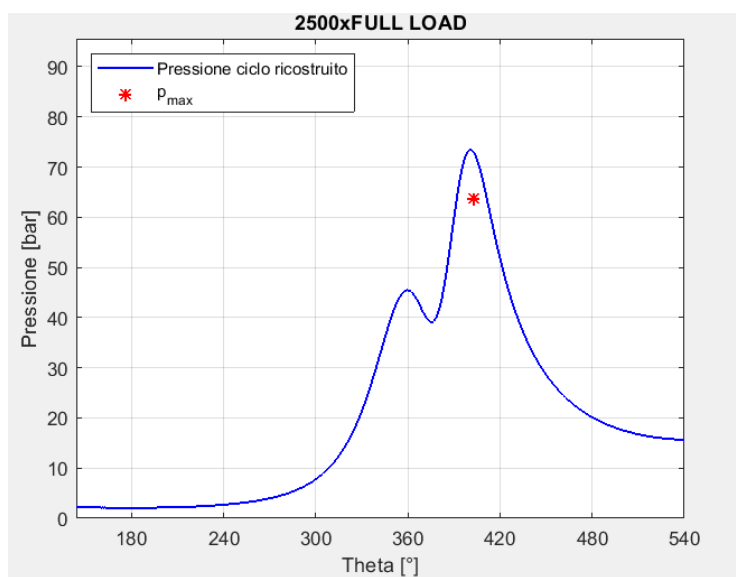
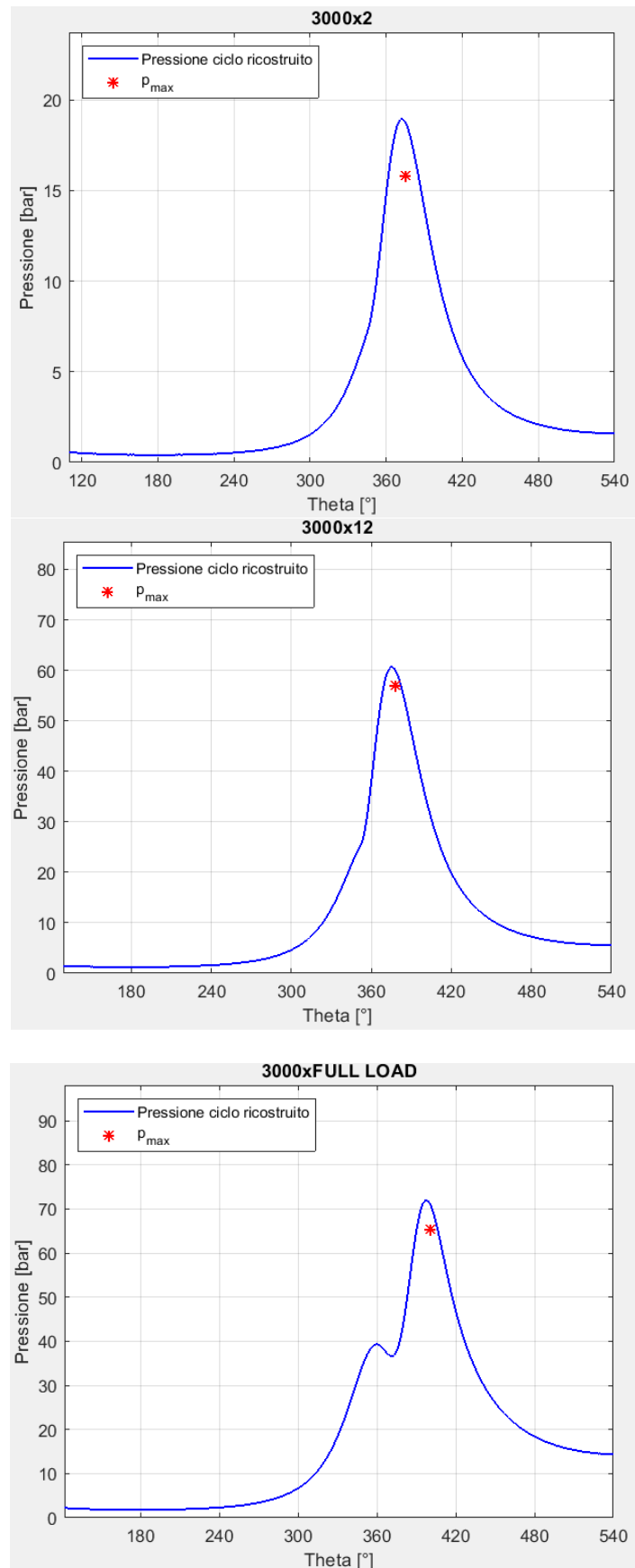


Figura 92: andamento pressione ciclo ricostruito punto 2500 x Full Load

6.5 3000 rpm



6.6 4000 rpm

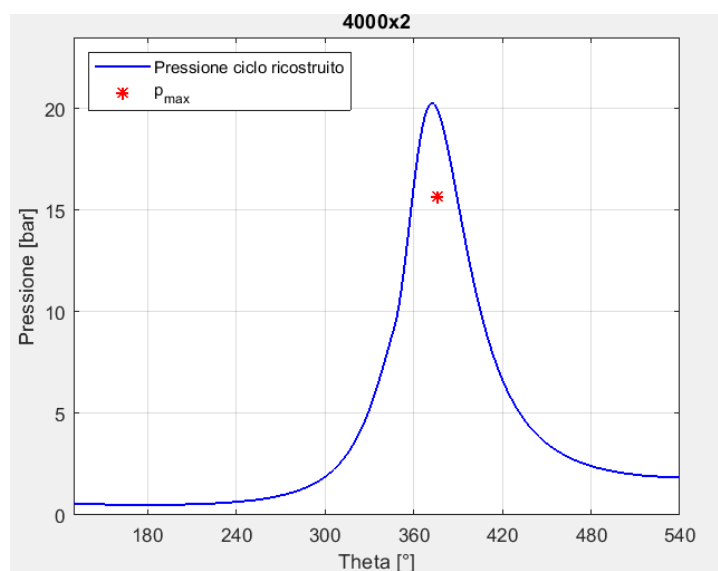


Figura 93: andamento pressione ciclo ricostruito punto 4000 x 2

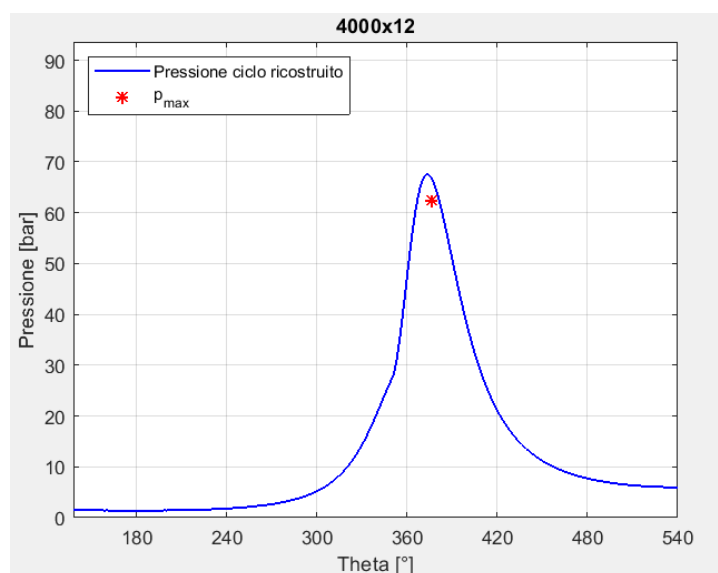


Figura 94: andamento pressione ciclo ricostruito punto 4000 x 12

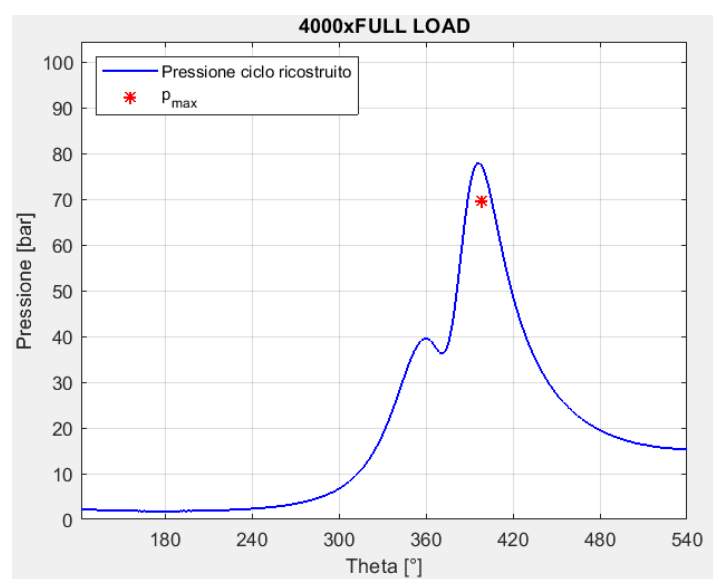
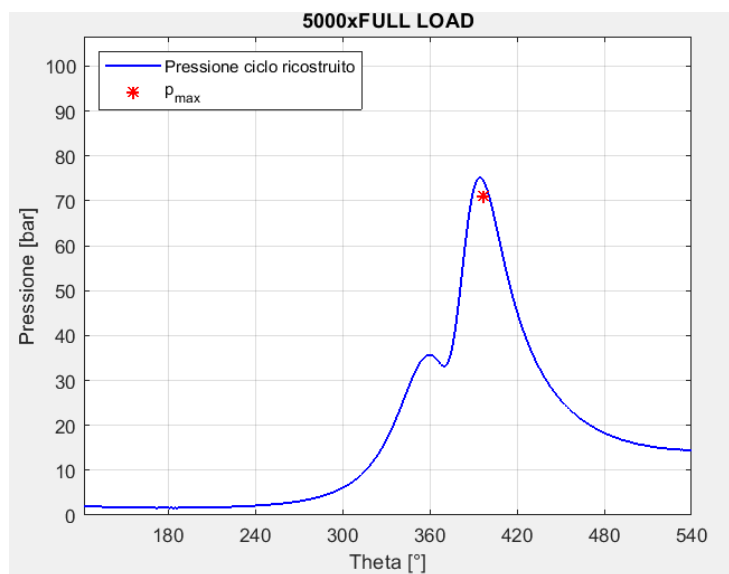
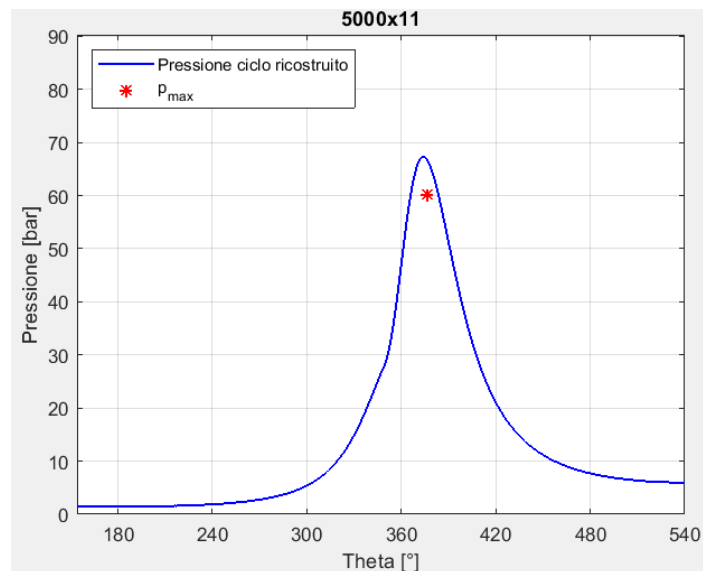
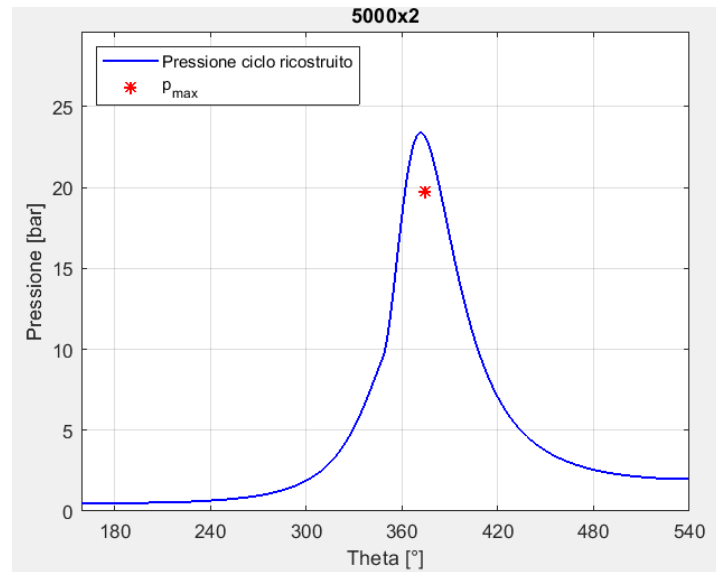


Figura 95: andamento pressione ciclo ricostruito punto 4000 x Full Load

6.7 5000 rpm



6.8 5500 rpm

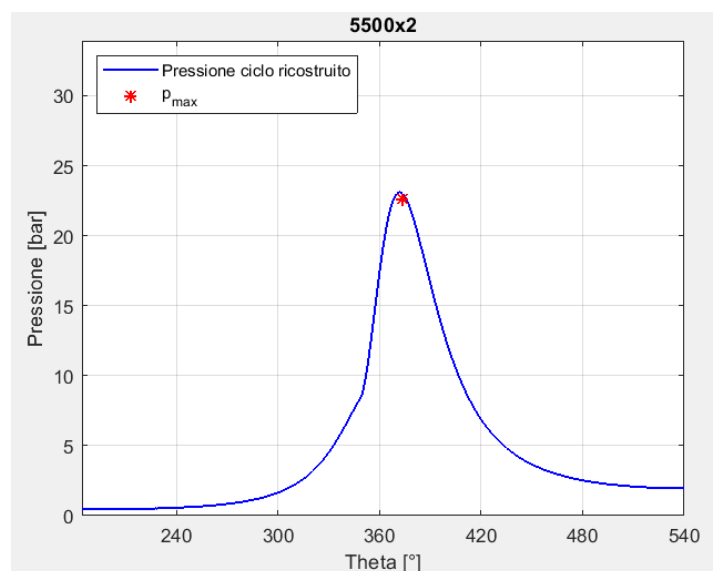


Figura 96: andamento pressione ciclo ricostruito punto 5500 x 2

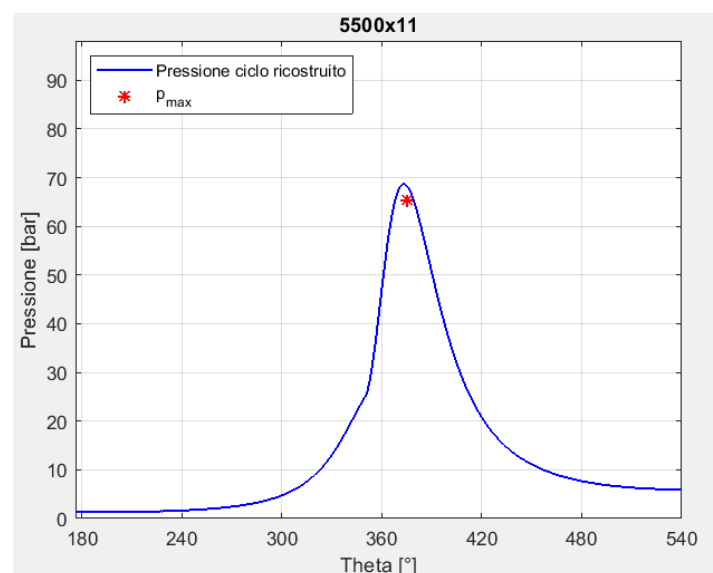


Figura 97: andamento pressione ciclo ricostruito punto 5500 x 11

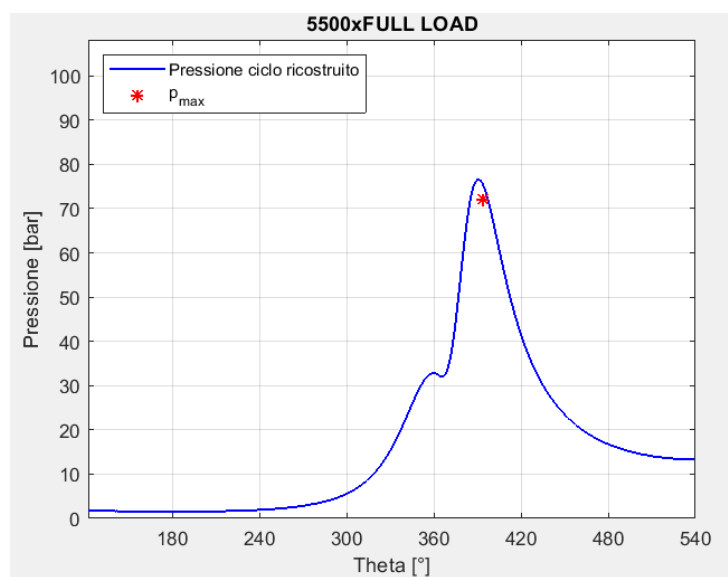


Figura 98: andamento pressione ciclo ricostruito punto 5500 x Full Load

Capitolo 7

Conclusioni

Lo sviluppo di un codice aperto come quello qua presentato permette all'utente di manipolare facilmente i modelli fisici utilizzati nel limite del contesto 0-D applicato per la camera di combustione utile alla previsione di alcune grandezze.

Inoltre, fornisce codice utile a rappresentare graficamente in differenti modalità (2D, 3D, diagrammi collinari...) sia le grandezze già fornite nei dati iniziali sia le grandezze calcolate dal codice stesso. Purtroppo, sono identificabili alcune anomalie sia a livello di piani quotati che del ciclo di pressione simulato:

- i coefficienti di riempimento presentano alcune zone con valori molto superiori all'unità anche nel caso in cui si considerano come riferimento le condizioni al collettore di aspirazione (quindi a valle del compressore)
- in molti casi gli errori sulle grandezze calcolate con il ciclo di pressione ricostruito risultano molto elevati (soprattutto relativamente a imep_h essendo un valore derivato dall'integrale del valore della pressione in camera con errori fino a circa il 40%)

Le principali cause degli errori citati potrebbero essere:

- incertezze sui valori delle quantità di combustibile iniettato (viene quindi ricalcolato dai valori di bsfc più affidabili rispetto ad una misura diretta della quantità)
- valori interpolati dalla funzione "*scatteredInterpolant*" in punti al limite o esterni al dominio considerato e quindi non reali
- incertezze del modello della funzione di Wiebe, che non sempre riesce a trovare dei valori dei parametri che facciano passare esattamente la funzione per i punti mfb forniti (si nota che l'andamento di pressione in camera è molto sensibile ai valori di mfb)
- incertezze sulle condizioni iniziali del ciclo di pressione (pressione, temperatura, massa totale in camera di combustione)
- utilizzo di parametri dello scambio termico di Woschni costanti tra i differenti punti del piano

Come futuro sviluppo del codice sarebbe utile verificare se sia possibile ottenere degli andamenti di funzione di Wiebe che passano esattamente per i punti forniti e definire un modello preciso per la stima della massa interna alla camera di combustione eventualmente sostituendo la legge dei gas perfetti con la legge dei gas reali.

Applicando un modello di efflusso attraverso le valvole si potrebbe ampliare l'andamento ricostruito della pressione in camera a tutto il ciclo motore, permettendo la valutazione quindi della pressione media indicata netta e di conseguenza anche della pressione media effettiva (in cui la pressione a vuoto può essere calcolato dai parametri della relazione di Chen-Flynn).

A riguardo del modello di scambio termico sarebbe invece fondamentale effettuare un *tuning* dei parametri sui ognuno dei punti fondamentali del piano quotato in modo da avere una stima più precisa dell'entità dello scambio termico a parete.

APPENDICE A

Elenco dei simboli, delle costanti e delle notazioni

asp=condizioni all'aspirazione

bme_p=break mean effective pressure (PME)

bsfc=break specific fuel consumption

c=84mm corsa

coll=condizioni al collettore

d=72mm alesaggio

EGR=Exhaust Gas Recirculation

EVO=Exhaust Valve Opening angolo dell'albero motore corrispondente di apertura della valvola di scarico

H_i=44 MJ/kg, potere calorifico inferiore del combustibile (Benzina)

ime_{p_gross}= Indicated Mean Effective Pressure Gross, pressione media indicata lorda (PMI lorda)

ime_{p_net}= Indicated Mean Effective Pressure Net, pressione media indicata lorda (PMI netta)

IVC=Intake Valve Closing angolo di rotazione dell'albero motore rispetto al TDC a cui corrisponde l'apertura della valvola di aspirazione

l=128.95 mm lunghezza di biella

m_b=massa di combustibile generica

mfb= mass fraction burned, angolo di manovella rispetto al TDC di fine compressione a cui corrisponde una determinata frazione di massa bruciata (es. 50% per mfb50)

PFI=Port Fuel Injection, sistema di iniezione del combustibile nel condotto di aspirazione

PME=Pressione Media Effettiva

R=287 J/kgK costante universale dei gas

r=c/2 raggio di manovella

rpm=revolution per minute, velocità di rotazione dell'albero motore in giri al minuto

x_b=frazione di massa bruciata

α=dosatura (rapporto air/fuel in massa)

α_{st}=14.6 (Benzina) dosatura stechiometrica (rapporto air/fuel stechiometrico)

β=angolo di biella (angolo formato tra asse cilindro e asse biella)

ε=9.8 rapporto di compressione geometrico

θ=angolo di manovella

λ= α/α_{st} dosatura relativa

Λ=r/l rapporto di allungamento

ρ=densità volumetrica

ω=velocità di rotazione

APPENDICE B

Codici

PianiQuotati

```

clc
clear
close all

%% DATI

c=84; %mm
r_c=9.8;
H_i=44000; %[kJ/kg]
R=287; %[J/kgK]
alpha_st=14.6;
iV=1368; %[cm^3]

%% LETTURA FILE

rpm_WOT = xlsread('20150506_PQ_FIRE170CV_OnlyData_v1','P177:W177');
BMEP_WOT = xlsread('20150506_PQ_FIRE170CV_OnlyData_v1','P178:W178');

[N,T]=xlsread('20150506_PQ_FIRE170CV_OnlyData_v1','Data','A1:FT170');

for(i=1:size(N,2))%colonne

    m=1;

    for(j=2:size(N,1))%righe

        el_n=N(j,i);
        A(m,i)=el_n;

        if(isnan(el_n))
            continue;
        end

        m=m+1;

    end

end

bmeq=A(:,123);
rpm=A(:,1);

[Xq,Yq] = meshgrid(sort(rpm),sort(bmeq));

bmeq_WOT_m = interp1(rpm_WOT, BMEP_WOT,
Xq(1,:), 'linear', 'extrap');
bmeq_mtx_m = repmat(bmeq_WOT_m,[length(Yq(:,1)),1]);
bmeq_pq_mtx_m = repmat(Yq(:,1),1,length(Xq(1,:)));

```

```

    bmep_WOT_m = interp1(rpm_WOT, BMEP_WOT,
Xq(1,:), 'linear', 'extrap');
    bmep_mtx_m = repmat(bmep_WOT_m, [length(Yq(:,1)), 1]);
    bmep_pq_mtx_m = repmat(Yq(:,1), 1, length(Xq(1,:)));

    B=Xq;

%% INTERPOLAZIONE DATI

for(i= 1:size(N,2))

    F=scatteredInterpolant(rpm,bmep,A(:,i), 'linear', 'none');

    vq1 = F(Xq,Yq);

    B(:, :, i)=vq1;

    ti=strcat(T(1,i), ' ', T(2,i), ' ');

    figure
    surf(Xq,Yq,vq1);
    title(ti);
    xlabel('n [rpm]');
    ylabel('bmep [bar]');
    drawnow

%     ti=strcat(T(1,i), 'SI.jpg');
%     saveas(gcf, char(ti));

end

% ESTRAZIONE VARIABILI UTILI

BSFC_g=B(:, :, 33);
imep_net=B(:, :, 71);
imep_gross=B(:, :, 76);
P_u=B(:, :, 98);
rpm=B(:, :, 1);
m_b_mean=mean(B(:, 1:end, 144:147), 3);
m_b_obj=B(:, :, 148);
m_egr=B(:, :, 96);
lambda=B(:, :, 69);
y_c=B(:, :, 124);
y_e=B(:, :, 129);
y_mean=(y_c+y_e)/2;
bmep=B(:, :, 123);
p_max=B(:, :, 118);
mfb_5_90=B(:, :, 18)-B(:, :, 3);
m_EGR=B(:, :, 96); %massa EGR [mg]

p_coll=B(:, :, 135); % pressione collettore di aspirazione [mbar]
p_asp=B(:, :, 99); % pressione ambiente di aspirazione [mbar]

T_asp=B(:, :, 153); %temperatura ambiente di aspirazione [°C]
T_coll=B(:, :, 163); %temperatura collettore di aspirazione [°C]

%% CALCOLO DEI RENDIMENTI

```

```

eta_u=10^6*P_u./(4*m_b_obj.*rpm/120*H_i);%rendimento utile calcolato
a partire da P_u e m_b

eta_u_q=1./(H_i*BSFC_g/1000/3600);%rendimento utile calcolato a
partire dai bsfc dichiarati

eta_m_net=bmep./imep_net; %rendimento organico con imep_net

eta_m_gross=bmep./imep_gross; %rendimento organico con imep_gross

eta_lim=1-1./(r_c.^(y_e-1));%rendimento limite calcolato con rapporto
di compressione geometrico
                                % e con k dei gas di scarico

[a,b,l]=find(lambda<1);

    for(i=1:size(a))

        eta_lim(a(i),b(i))=eta_lim(a(i),b(i))*lambda(a(i),b(i));%
approssimazione per miscele ricche

    end

eta_thetai=eta_u_q./(eta_m_net.*eta_lim);

p_v=imep_net-bmep;

%% RIEMPIMENTI

rho_air_asp=p_asp*100/R./(T_asp+273); %[kg/m^3]
rho_air_coll=p_coll*100/R./(T_coll+273); %[kg/m^3]

m_id_asp=rho_air_asp*iV/4; %[mg]
m_id_coll=rho_air_coll*iV/4; %[mg]

m_air_eff=alpha_st*lambda.*m_b_mean; %[mg]

l_v_asp=m_air_eff./(m_id_asp);
l_v_coll=m_air_eff./(m_id_coll);

l_v_asp_EGR=(m_air_eff+m_EGR)./(m_id_asp);
l_v_coll_EGR=(m_air_eff+m_EGR)./(m_id_coll);

figure
surf(Xq,Yq,m_air_eff);
title('m_{air eff} [mg/stk]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('pme [bar]');
drawnow

figure
surf(Xq,Yq,m_id_asp);
title('m_{air id asp} [mg/stk]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('pme [bar]');
drawnow

```

```
figure
surf(Xq,Yq,m_id_coll);
title('m_{air id coll} [mg/stk]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('pme [bar]');
drawnow
```

```
figure
surf(Xq,Yq,l_v_coll);
title('lambda_{v,coll} [-]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('pme [bar]');
drawnow
```

```
figure
surf(Xq,Yq,l_v_asp);
title('lambda_{v,asp} [-]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('pme [bar]');
drawnow
```

```
figure
surf(Xq,Yq,l_v_coll_EGR);
title('lambda_{v,coll+EGR} [-]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('pme [bar]');
drawnow
```

```
figure
surf(Xq,Yq,l_v_asp_EGR);
title('lambda_{v,asp+EGR} [-]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('pme [bar]');
drawnow
```

```
%% CALCOLO DI m_b DA bsfc
```

```
m_b_bsfc=1000*(P_u.*BSFC_g./3600)./(4*rpm./120);
```

```
Dm_b=(m_b_bsfc-m_b_mean)./m_b_mean*100;
```

```
figure
surf(Xq,Yq,m_b_bsfc);
title('m_{b_{bsfc}} [-]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('pme [bar]');
drawnow
```

```
figure
surf(Xq,Yq,Dm_b);
title('delta_{m_b} [%]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('bmep [bar]');
drawnow
```

```
%% RELAZIONE CHEN-FLYNN
```

```
imep_gross_ch=A(:,71);
imep_net_ch=A(:,76);
rpm_ch=A(:,1);
bmep_ch=A(:,123);
p_max_ch=A(:,118);
p_v_ch=imep_gross_ch-bmep_ch;

f=@(D) p_v_ch-
(D(1)+D(2).*p_max_ch+D(3)*c/2.*rpm_ch/1000+D(4).*(c/2*rpm_ch/1000).^2
);
x0=[0,0,0,0];

[H,t]=lsqnonlin(f,x0)
```

```
p_v_calc=H(1)+H(2).*p_max_ch+H(3)*c/2.*rpm_ch/1000+H(4).*(c/2*rpm_ch/
1000).^2;
```

```
F=scatteredInterpolant(rpm_ch,bmep_ch,p_v_calc);
p_v_calc=F(Xq,Yq);
p_v_calc(bmep_pq_mtx_m > bmep_mtx_m ) = NaN;
```

```
figure
surf(Xq,Yq, p_v_calc);
title(' p_v_calc');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('bmep [bar]');
drawnow
```

```
%% GRAFICI
```

```
figure
surf(Xq,Yq,eta_u);
title('eta_u [-]');
hold on
xlabel('n [rpm]');
ylabel('bmep [bar]');
drawnow
```

```
figure
C=[0:1000:8000 8000:500:12500];
[c,h]=contour(Xq,Yq,eta_u);
clabel(c,h);
hold on
plot(rpm_WOT,BMEP_WOT,'--r');
title('eta_u [g/kWh]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('bmep [bar]');
drawnow
```

```
figure
C=[100:25:475];
[c,h]=contour(Xq,Yq,BSFC_g,C);
clabel(c,h);
hold on
```



```

plot(rpm_WOT,BMEP_WOT,'--r');
title('bsfc [g/kWh]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('bmep [bar]');
drawnow

```

```

figure
surf(Xq,Yq,BSFC_g);
title('bsfc [g/kWh]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('bmep [bar]');
drawnow

```

```

figure
surf(Xq,Yq,P_u);
title('P_u [kW]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('bmep [bar]');
drawnow

```

```

figure
C=[5:5:115];
[c,h]=contour(Xq,Yq,P_u,C);
clabel(c,h);
hold on
plot(rpm_WOT,BMEP_WOT,'--r');
title('P_u [kW]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('bmep [bar]');
drawnow

```

```

figure
surf(Xq,Yq,m_b_mean);
title('m_b [mg/stk]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('bmep [bar]');
drawnow

```

```

figure
C=[0:0.025:1];
[c,h]=contour(Xq,Yq,eta_u,C);
clabel(c,h);
hold on
plot(rpm_WOT,BMEP_WOT,'--r');
title('eta_u [-]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('bmep [bar]');
drawnow

```

```

figure
surf(Xq,Yq,eta_u);
title('eta_u [-]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('bmep [bar]');
drawnow

```

```

figure

```

```

C=[0:0.025:1];
[c,h]=contour(Xq,Yq,eta_u_q,C);
clabel(c,h);
hold on
plot(rpm_WOT,BMEP_WOT,'--r');
title('eta_u_q [-]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('bmep [bar]');
drawnow

figure
surf(Xq,Yq,eta_u_q);
title('eta_u_q [-]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('bmep [bar]');
drawnow

figure
C=[0:0.1:4];
[c,h]=contour(Xq,Yq,p_v,C);
clabel(c,h);
hold on
plot(rpm_WOT,BMEP_WOT,'--r');
title('p_v[bar]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('bmep [bar]');
drawnow

figure
surf(Xq,Yq,p_v);
title('p_v [bar]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('bmep [bar]');
drawnow

figure
surf(Xq,Yq,p_v_calc);
title('p_v_{calc} [bar]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('bmep [bar]');
drawnow

figure
surf(Xq,Yq,p_max);
title('p_{max} [bar]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('bmep [bar]');
drawnow

figure
C=[0:0.05:0.9, 0.9:0.02:1,0.99];
[c,h]=contour(Xq,Yq,eta_m_net,C);
clabel(c,h);
hold on
plot(rpm_WOT,BMEP_WOT,'--r');
title('eta_m_{net} [-]');
xlabel('n [rpm]');

```

```

ylabel('bmep [bar]');
drawnow

figure
C=[0:0.05:0.9, 0.9:0.02:1,0.99];
[c,h]=contour(Xq,Yq,eta_m_gross,C);
clabel(c,h);
hold on
plot(rpm_WOT,BMEP_WOT,'--r');
title('eta_m_{gross} [-]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('bmep [bar]');
drawnow

```

```

figure
surf(Xq,Yq,eta_m_net);
title('eta_m_{net} [-]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('bmep [bar]');
drawnow

```

```

figure
surf(Xq,Yq,eta_m_gross);
title('eta_m_{gross} [-]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('bmep [bar]');
drawnow

```

```

figure
C=[0:0.02:1];
[c,h]=contour(Xq,Yq,eta_lim,C);
clabel(c,h);
hold on
plot(rpm_WOT,BMEP_WOT,'--r');
title('eta_{lim} [-]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('bmep [bar]');
drawnow

```

```

figure
surf(Xq,Yq,eta_lim);
title('eta_{lim} [-]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('bmep [bar]');
drawnow

```

```

figure
C=[0:0.05:1];
[c,h]=contour(Xq,Yq,eta_thetai,C);
clabel(c,h);
hold on
plot(rpm_WOT,BMEP_WOT,'--r');
title('eta_{thetai} [-]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('bmep [bar]');
drawnow

```

```
figure
surf(Xq,Yq,eta_thetai);
title('eta_{thetai} [-]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('bmep [bar]');
drawnow
```

```
figure
surf(Xq,Yq,lambda);
title('lambda [-]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('bmep [bar]');
drawnow
```

```
figure
surf(Xq,Yq,mfb_5_90);
title('mfb_{05} to mfb_{90} [°CA]');
xlabel('n [rpm]');
ylabel('bmep [bar]');
drawnow
```

```
P=max(B(:,1:end,98))
C_u=max(B(:,1:end,57))
bsfc_min=min(B(:,1:end,33))
```

```
figure
[ax,hlines,fh] = jzplotys({rpm_ch,P,rpm_ch,C_u,rpm_ch,bsfc_min},[1 1
1],[1500 5500],100);
xlabel('n [rpm]');
ylabel(ax(1),'P [kW]');
ylabel(ax(3),'C [Nm]');
ylabel(ax(5),'BSFC [g/kWh]');
```

RICOSTRUZIONE CICLO DI PRESSIONE

Main

```

clc
clear
close all

for(i=4:169)

    line_n=strcat('A',int2str(i),':','FZ',int2str(i));

    line=xlsread('20150506_PQ_FIRE170CV_OnlyData_v1','Data',line_n);

[N,T]=xlsread('20150506_PQ_FIRE170CV_OnlyData_v1','Data',strcat('B',i
nt2str(i)));

    if(length(line)==0)

        i=i+1;
        k=1;
        j=j+1;

        %close all

        continue
    end

    mfb=[line(3),line(8),line(13),line(18)];

    IVC_deg=line(177);% [°]
    EVO_deg= 540;% [°]

    n=line(1); %[rpm]
    imep=line(71); %[bar]
    bmep=line(123);
    r_c=line(149);
    lambda_a=1/line(69);

    m_b=mean(line(144:147))/10^6; %[kg]
    m_b=(line(182))/10^6; %[kg]
    m_EGR= line(96)/10^6;%[kg]

    p_atm= line(99)/1000;% pressione atmosferica[bar]
    p_rel_mot=line(135)/1000;%pressione collettore aspirazione,
sovralimentato [bar]
    p_exh=line(114)/1000;%pressione motore uscita, sovralimentato
[bar]
    p_max=line(118); %[bar]

    y_comp=line(124);
    y_exp=line(129);

    theta_p_max=line(28);
    T_out=mean(line(172))+273;

```

```

T_coll=line(163)+273;

[a,m,theta_0,delta_theta]=Wiebe_v4(mfb,n,N,T);

[R_c,p,imep_clc,bmep_clc,imep_h,pmep,d_pmax,mfb_calc]=Pressure_Woschni(IVC_deg,EVO_deg,n,lambda_a,m_b,m_EGR,mfb,p_atm,p_rel_mot,...

p_exh,y_comp,y_exp,p_max,theta_p_max,imep,bmep,a,m,theta_0,delta_theta,T_coll,T_out,N,T);

W(i-3,1)=imep_h;
W(i-3,2)=R_c;
W(i-3,3)=p;
W(i-3,4)=d_pmax;

i

mfb_calc_arr(i-3,:)=mfb_calc;

%close all

end

%
xlswrite('20150506_PQ_FIRE170CV_OnlyData_v1',W,'Results','H2:K167');
%
xlswrite('20150506_PQ_FIRE170CV_OnlyData_v1',mfb_calc_arr,'Data','GA4:GD169');
```

Wiebe

```

function [a,m,theta_0, delta_theta_0] = Wiebe_v4(mfb,n_mot,N,Tx)

mfb_deg=[mfb(1) , mfb(2) ,mfb(3) , mfb(4)];

mfb=[0.05 , 0.1 , 0.5 , 0.9];

theta_0 = mfb_deg(1)-2;
delta_theta_0 = mfb_deg(4)-theta_0;
theta_f=mfb_deg(4);

for(i=1:3)

    f=@(A) ((mfb(:)-(1-exp(-A(1)*((mfb_deg(:)-
A(3))/(A(4))).^(A(2)+1))))).^2+...
    ((exp(-A(1)*((A(5)-A(3))/(A(4))).^(A(2)+1))))).^2+...
    (1-(exp(-A(1)*((A(5)-A(4)-A(3))/(A(4))).^(A(2)+1))))).^2);

    x0=[0,0,theta_0,delta_theta_0,theta_0+delta_theta_0];
    [B,t]=lsqnonlin(f,x0);

    a=real(B(1));
    m=real(B(2));
    theta_0 =real(B(3));
    delta_theta_0 =real(B(4));
    theta_f=real(B(5));

end

x = [theta_0:0.1:theta_f+10];

mfb_calc = 1-exp(-a*((mfb_deg-theta_0)/(delta_theta_0)).^(m+1));

Wiebe_f = 1-exp(-a*((x-theta_0)/(delta_theta_0)).^(m+1));

figure;
plot(mfb_deg ,mfb_calc , 'r*');
hold on
plot(mfb_deg,mfb,'bo');
hold on
plot(x , Wiebe_f , 'r');
legend('mfb_{calc}','mfb_{real}','Wiebe','Location','NorthWest');
hold on
xlabel('°ATDC');
ylabel('x_b [-]');
grid on

titl=strcat(int2str(n_mot),'x',int2str(N));

if(length(N)==0)

    titl=strcat(int2str(n_mot),'x',Tx);
end
title(titl);
end

```

Pressure_Woschni

```

function
[r_ceff,p_max_clc,imep_clc,bmep_clc,imep_h,pmep,p_r_max,mfb_calc_index]=
Pressure(IVC_deg,EVO_deg,n,lambda_a,m_b,m_EGR,mfb,p_atm,p_coll,p_exh,
...

y_comp,y_exp,p_max,theta_p_max,pmi,pme,a,m,start_comb,delta_theta_comb,
T_in,T_out,N,Txt)

d_theta=40;

theta=[0:1/d_theta:720]; %[deg°CA]

p_in_mot = 0.9*p_coll; %[bar]
p_out_mot= 1.1*p_exh; %[bar]

d=72; %[mm]
c=84; %[mm]
Vtot=1368; %[cm^3]
epsilon=9.8;
lambda=0.33; %rapporto di allungamento
U=2*c*n/60; %[mm/s]
omega=6*n; %[°/s]

k_t=1.3;
k_p=1;
R=287; %[J/kgK]
Hi=44*10^6; %[J/kg]
alpha_st=14.6;
alpha_r=0.7;
n_cil=4;

IVC=round(IVC_deg)*d_theta;
EVO=round(EVO_deg)*d_theta;
start_comb_i=round(start_comb+360)*d_theta+1; % indice relativo
all'istante di inizio combustione

alpha=alpha_st*lambda_a;

r=c/2; %[mm] raggio di manovella
V_u=Vtot/n_cil; %[cm^3] volume unitario
S=pi*d^2/4; %[mm^2] superficie stantuffo
V_mu=V_u/(epsilon-1); %[cm^3] volume morto unitario
x=r*[ (1-cos(theta*(pi)/180))+(1/lambda)*(1-sqrt(1-
(lambda*sin(theta*(pi)/180)).^2))]; %[mm] spazio percorso da stantuffo
V=V_mu+S*(x)/1000; %[cm^3] volume camera

%% Parametri Woschni

C_1=2.28;
C_2=8.24*10^-3;

%% RICOSTRUZIONE CICLO

```



```

% temperature di parete stimate

T_testa=500; %[K]
T_canna=400; %[K]
T_stantuffo=550; %[K]

% masse in cilindro

m_a=alpha*m_b; % massa d'aria [kg]
m_r=alpha_r*m_b; % massa gas residui [kg]

m_tot=p_in_mot*V(IVC)/(R*T_in)/10;

% superfici pareti

S_testa=pi/4*d^2*k_t; %[mm^2]
S_canna=pi*d*(x); %[mm^2]
S_stantuffo=pi/4*d^2*k_p; %[mm^2]

S_tot=S_testa+S_canna+S_stantuffo;

% funzione di Wiebe

x_bw=1-exp(-a*((theta(start_comb_i:length(theta))-
theta(start_comb_i))/(delta_theta_comb)).^(m+1)));
x_bw=[zeros(start_comb_i-1,1);x_bw'];

if(lambda_a<1)
    m_b=lambda_a*m_b; %correzione per miscele ricche
end

% calcolo pressioni ciclo trascinato

p_motored=[0.9*p_atm*(V(IVC)./V(IVC:360*d_theta)).^y_comp,...

0.9*p_atm*(V(IVC)./V(360*d_theta)).^y_comp*(V(360*d_theta)./V(360*d_theta:EVO)).^y_exp]; %[bar]

p_motored=[0.9*p_atm*ones(IVC-
1,1);p_motored';1.1*p_atm*ones(size(theta,2)-1-EVO,1)'];

p_o=[p_in_mot*(V(IVC)./V(IVC:360*d_theta)).^y_comp,...

p_in_mot*(V(IVC)./V(360*d_theta)).^y_comp*(V(360*d_theta)./V(360*d_theta:EVO)).^y_exp]; %[bar]

p_o=[p_in_mot*ones(IVC-1,1);p_o';p_in_mot*ones(size(theta,2)-1-EVO,1)'];

p_L=p_o;

T=T_in*ones(size(theta,2),1);

%% ricostruzione ciclo di pressione
%
figure

```

```

    titl=strcat(int2str(n),'x',int2str(N));

if(length(N)==0)
    titl=strcat(int2str(n),'x',Txt);
end

for(i=IVC-2:EVO)

    T(i)=p_L(i)*V(i)/10/(m_tot*R); %[K]

    k(i)=1.392-8.13*10^-5*T(i);

    w(i) = C_1*U/1000+C_2*(V_u/V(IVC))*T(IVC)/p_L(IVC)*(abs((p_L(i-1)-p_motored(i)))); %[m/s]

    h(i) = 3.26*(d*10^-3)^(-0.2)*(p_L(i)*10^2)^(0.8)*w(i)^0.8*T(i)^-0.55; %[W/m^2K]

    Q(i) = h(i)*(S_testa*(T_testa-T(i))+S_canna(i)*(T_canna-T(i))+S_stantuffo*(T_stantuffo-T(i)))*10^-6; %[W]

    p_L(i+1)=p_L(i-1)+1/V(i)*((k(i)-1)*(x_bw(i+1)-x_bw(i-1)))*m_b*Hi*10+...
        (10*Q(i)/omega)*(theta(i+1)-theta(i-1)))-
    k(i)*p_L(i)*(V(i+1)-V(i-1))); %[bar]

    if(mod(i,200)==0)

        yyaxis left
        plot(theta(IVC:i),p_L(IVC:i),'b-
',(theta_p_max+360),p_max,'r*','linewidth',1.2);
        ylabel('p [bar]');
        axis([IVC_deg EVO_deg 0 (p_max*1.5)]);
        hold on
        yyaxis right
        ylabel('x_b [-]');
        axis([IVC_deg EVO_deg 0 1]);
        plot(theta(IVC:i),x_bw(IVC:i)/max(x_bw),'r-');
        grid on
        title(titl);
        set(gca,'XTick',0:60:720);
        drawnow

    %
end

end

for(i=2:EVO-1)

    HRR(i)= k(i)/(k(i)-1).*p_L(i)/10*(V(i+1)-V(i-1))./(theta(i+1)-theta(i-1))+...
        1/(k(i)-1).*V(i)/10*(p_L(i+1)-p_L(i-1))./(theta(i+1)-theta(i-1))-Q(i)/(omega);

    NHRR(i)=k(i)/(k(i)-1).*p_L(i)/10*(V(i+1)-V(i-1))./(theta(i+1)-theta(i-1))+...

```

```

1/(k(i)-1).*V(i)/10*(p_L(i+1)-p_L(i-1))./(theta(i+1)-theta(i-
1));
end

p_L(EVO:end-1)=p_out_mot;

p_L(end)=p_in_mot;

p_r_max=max(diff(p_L(IVC:EVO))./diff(theta(IVC:EVO))); %[bar/°]

L_i=cumtrapz(V,p_L)/10;%[J]

imep_clc=L_i(end)/V_u*10; %[bar]

imep_h=cumtrapz(V(180*d_theta:540*d_theta),p_L(180*d_theta:540*d_theta))/V_u; %[bar]

imep_h=imep_h(end);

pmep=imep_h-imep_clc; %[bar]

p_max_clc=max(p_L);

p_v=1.0595-0.0094.*p_max_clc+-0.0062.*(n/1000)+3.4038*10^-
5.*(n/1000).^2;

bmep_clc=imep_clc-p_v;

r_ceff=V(IVC)/V(720*d_theta);

Q_tot=-cumtrapz(Q,theta(1:EVO));

int_HRR=cumtrapz(theta(IVC:EVO-1),(HRR(IVC:EVO-1)));
int_NHRR=cumtrapz(theta(IVC:EVO-1),(NHRR(IVC:EVO-1)));

max_HRR=m_b*max(x_bw)*Hi*ones(EVO-1,1)';

for(i=2:EVO-1)

    if(i<360*d_theta)

        k(i+1)=y_comp;

    else

        k(i+1)=y_exp;

    end
end

mfb_calc=int_HRR/(m_b*Hi);

err05=999999;
err10=999999;
err50=999999;
err90=999999;

```

```

for i=1:length(mfb_calc)

    delta05=abs(mfb_calc(i)-0.05);
    delta10=abs(mfb_calc(i)-0.10);
    delta50=abs(mfb_calc(i)-0.50);
    delta90=abs(mfb_calc(i)-0.90);

    if delta05<err05

        err05=delta05;

        indice05=i;
    end

    if delta10<err10

        err10=delta10;

        indice10=i;
    end

    if delta50<err50

        err50=delta50;

        indice50=i;
    end

    if delta90<err90

        err90=delta90;

        indice90=i;
    end

end

mfb_calc_index=(IVC+[indice05,indice10,indice50,indice90])/d_theta-
360+0.47;

%% Grafici

% figure
% plot(theta(IVC:EVO-1),mfb_calc,'linewidth',1.2);
% title(titl);
% xlabel('Theta [°CA]');
% ylabel('mfb_{calc} [-]');
% set(gca,'XTick',0:10:720);
% grid on
%
% figure
% plot(theta(IVC:EVO),p_motored(IVC:EVO),'linewidth',1.2);
% title(titl);
% xlabel('Theta [°CA]');

```

```

% ylabel('p_{motored} [bar]');
% set(gca,'XTick',0:60:720);
% grid on
%
% set(gcf,'defaultAxesColorOrder',[1 0 0]; [0 0 1]);
% plot(theta(IVC:EVO-1),p_L(IVC:EVO-1),'b-
', (theta_p_max+360),p_max,'r*','linewidth',1.2);
% axis([IVC_deg EVO_deg 0 (p_max*1.5)]);
% xlabel('Theta [°]');
% ylabel('Pressione [bar]');
% hold on
% grid on
% set(gca,'XTick',0:60:720);
% legend({'Pressione ciclo
ricostruito','p_{max}'},'location','northwest');
% title(titl);
% drawnow
%
% figure
% yyaxis left
% plot(theta(IVC:EVO-1),p_L(IVC:EVO-1),'b-
', (theta_p_max+360),p_max,'r*','linewidth',1.2);
% ylabel('p [bar]');
% axis([IVC_deg EVO_deg 0 (p_max*1.5)]);
% hold on
% yyaxis right
% ylabel('x_b [-]');
% axis([IVC_deg EVO_deg 0 1]);
% plot(theta(IVC:EVO-1),x_bw(IVC:EVO-1)/max(x_bw),'r-');
% grid on
% title(titl);
% set(gca,'XTick',0:60:720);
% drawnow
%
% figure
% plot(theta(IVC:EVO),w(IVC:EVO),'linewidth',1.2);
% title(titl);
% xlabel('Theta [°CA]');
% ylabel('w [m/s]');
% set(gca,'XTick',0:60:720);
% grid on
%
% figure
% plot(theta(IVC:EVO),S_tot(IVC:EVO)/100,'linewidth',1.2);
% title(titl);
% xlabel('Theta [°CA]');
% ylabel('S [cm^2]');
% set(gca,'XTick',0:60:720);
% grid on
%
% figure
% plot(theta(IVC:EVO),V(IVC:EVO),'linewidth',1.2);
% title(titl);
% xlabel('Theta [°CA]');
% ylabel('V [cm^3]');
% set(gca,'XTick',0:60:720);
% grid on

```

```

%
% figure
% plot(theta(IVC:EVO),h(IVC:EVO),'linewidth',1.2);
% title(titl);
% xlabel('Theta [°CA]');
% ylabel('h [W/m^2K]');
% set(gca,'XTick',0:60:720);
% grid on
%
% figure
% plot(theta(IVC:EVO),-Q(IVC:EVO),'linewidth',1.2);
% %title(titl);
% xlabel('Theta [°CA]');
% ylabel('Q [W]');
% set(gca,'XTick',0:60:720);
% grid on
% %
% figure
% % plot(theta((360+mfb(1)-
10)*d_theta:(360+mfb(4)+10)*d_theta),HRR((360+mfb(1)-
10)*d_theta:(360+mfb(4)+10)*d_theta),'b-',...
% % theta((360+mfb(1)-
10)*d_theta:(360+mfb(4)+10)*d_theta),NHRR((360+mfb(1)-
10)*d_theta:(360+mfb(4)+10)*d_theta),'r-','linewidth',1.2);
% plot(theta((360+mfb(1)-
60)*d_theta:(360+mfb(4)+60)*d_theta),HRR((360+mfb(1)-
60)*d_theta:(360+mfb(4)+60)*d_theta),'b-',...
% theta((360+mfb(1)-
60)*d_theta:(360+mfb(4)+60)*d_theta),NHRR((360+mfb(1)-
60)*d_theta:(360+mfb(4)+60)*d_theta),'r-','linewidth',1.2);
% title(titl);
% set(gca,'XTick',0:60:720);
% xlabel('Theta [°CA]');
% ylabel('HRR - NHRR [J/°]');
% legend({'HRR','NHRR'},'Location','northwest');
% grid on
%
figure
plot(theta(IVC:EVO-1),int_HRR,'b-',theta(IVC:EVO-1),int_NHRR,'r-
',theta(IVC:EVO-1),max_HRR(IVC:EVO-1),'y-','linewidth',1.2);
title(titl);
set(gca,'XTick',0:60:720);
xlabel('Theta [°CA]');
ylabel('int_{HRR} - int_{NHRR} [J]');
legend({'HRR','NHRR ','Max_{HRR}'},'Location','northwest');
grid on
drawnow

% figure
% plot(theta(IVC:EVO),T(IVC:EVO),'r','linewidth',1.2);
% hold on
% grid on
% xlabel('Theta [°CA]');
% ylabel('T [K]');
% set(gca,'XTick',0:60:720);
% title(titl);
%

```

```

% figure
% plot(theta,L_i,'linewidth',1.2);
% title(titl);
% set(gca,'XTick',0:60:720);
% xlabel('Theta [°CA]');
% ylabel('L_i [J]');
% grid on
%
% figure
% plot(theta(1:end-1),p_L(1:end-1),'linewidth',1.2);
% title(titl);
% set(gca,'XTick',0:60:720);
% xlabel('Theta [°CA]');
% ylabel('p [bar]');
% grid on
%
% figure
% plot(V,p_L,'linewidth',1.2);
% axis([min(V)-50 (max(V)+50) 0.5 (max(p_L)*1.2)]);
% title(titl);
% set(gca,'XTick',0:50:720);
% xlabel('V [cm^3]');
% ylabel('p [bar]');
% grid on
%
% figure
% loglog(V,p_L,'linewidth',1.2);
% axis([0.7*min(V) (1.3*max(V)) 0.5 (max(p_L)*1.2)]);
% title(titl);
% set(gca,'XTick',0:50:720);
% xlabel('V [cm^3]');
% ylabel('p [bar]');
% grid on

end

```

APPENDICE C

Cenni sull'approccio Multi-Wiebe

Nel caso in cui si voglia adattare il modello al caso di un motore ad accensione per compressione (Diesel) è necessario principalmente modificare il modello relativo all'andamento della frazione di massa bruciata.

Nei motori ad accensione comandata di nuova generazione ad iniezione diretta è consuetudine suddividere l'iniezione in più stadi (iniezioni pilota, pre-injection, main injection, post-injection e after injection (figura (99)) al fine di controllare principalmente i livelli di rumorosità e di inquinanti sviluppati con la combustione.

Il modello non può quindi più applicare una funzione di Wiebe semplice come visto per il motore ad accensione comandata ma è necessario definire la funzione di massa bruciata come la sommatoria di n finzioni di Wiebe, ciascuna relativa ad una iniezione [6]:

$$\chi_b = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \left(1 - e^{-a_i \left(\frac{\vartheta - \vartheta_{oi}}{\Delta \vartheta_i} \right)^{m_i+1}} \right) \text{ con } \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$$

Tale approccio è definito *Multi-Wiebe*, e nel caso trattato si propone di ricavare i parametri della sommatoria in funzione dei valori di mfb e di SOI di ciascuna iniezione forniti.

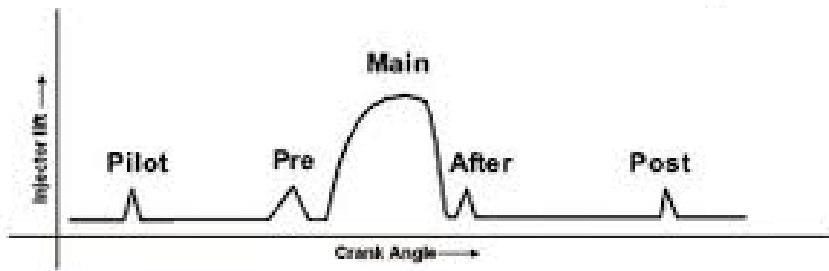


Figura 99: esempio di andamento delle iniezioni nel caso di un motore Diesel Common-Rail [7]

APPENDICE D

Cenni sulla valutazione dell'efflusso attraverso le valvole

È possibile stimare l'efflusso attraverso le valvole di aspirazione e scarico valutandolo associandole a dei condotti convergenti di area di efflusso variabile in funzione dell'alzata della valvola [2].

Ipotizzando di conoscere gli istanti di IVO, IVC, EVO ed EVC si possono costruire i diagrammi di alzata valvole (eventualmente forniti dal costruttore).

Conoscendo la geometria base della valvola è possibile ricavare l'area geometrica di efflusso:

$$A_{g(\vartheta)} = \pi \cdot d_v \cdot h_{v(\vartheta)} \cdot \cos\varphi$$

L'area di efflusso è ottenuta moltiplicando l'area geometrica per un coefficiente di efflusso c_d :

$$A_{e(\vartheta)} = c_d \cdot A_{g(\vartheta)}$$

Successivamente è possibile valutare la portata di gas in funzione del rapporto tra le pressioni a monte e valle della valvola.

In particolare, è necessario eseguire la distinzione tra il caso di rapporto critico delle pressioni e rapporto sub-critico delle pressioni ottenendo la portata di massa relativa a ciascun caso:

$$\begin{cases} \dot{m}_{(\vartheta)} = A_e \cdot \frac{p_{monte}}{\sqrt{R \cdot T_c}} \cdot k^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2 \cdot (k-1)}} & \text{se } \left(\frac{p_{valle}}{p_{monte}} \right) < \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \\ \dot{m}_{(\vartheta)} = A_e \cdot \frac{p_{monte}}{\sqrt{R \cdot T_c}} \cdot \left(\frac{p_{valle}}{p_{monte}} \right)^{\frac{1}{k}} \cdot \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \left(1 - \left(\frac{p_{valle}}{p_{monte}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)} & \text{se } \left(\frac{p_{valle}}{p_{monte}} \right) < \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \end{cases}$$

Questo modello dev'essere quindi applicato indipendentemente alle valvole di aspirazione e alle valvole di scarico considerando una discretizzazione dell'intervallo angolare relativo alle fasi di ricambio fluido (analogamente a quanto fatto per la fase relativa alla combustione).

Per ogni istante ϑ_i viene calcolata la portata in massa relativa alle valvole di aspirazione e scarico, e da questa si calcola la massa scambiata dal sistema $dm = \dot{m} \cdot dt$ aggiornando la massa contenuta nella camera rispetto all'istante precedente:

$$m_i = m_{i-1} + dm_{aspirazione} - dm_{scarico}$$

È quindi possibile aggiornare il valore di pressione e temperatura in camera applicando l'equazione di stato dei gas:

$$p_i = m_i \cdot R \cdot \frac{T_{i-1}}{V_i}$$

$$T_i = \frac{p_i \cdot V_i}{R \cdot T_i}$$

Il coefficiente di efflusso può essere stimato attraverso relazioni empiriche in funzione del rapporto $\frac{h_v}{d_v}$ presenti in letteratura.

Bibliografia e fonti

- [1] www.allpar.com/mopar/14.html
- [2] John B.L.Heywood, *"Internal combustion engine"*, McGraw-Hill, 1988
- [3] Chen, S. and Flynn, P., *"Development of a Single Cylinder Compression Ignition Research Engine"*, SAE Technical Paper 650733, 1965
- [4] AVL CONCERTO 4™, *"Experience the harmony Exploration Guide"*
- [5] Gatowski, J., Balles, E., Chun, K., Nelson, F. et al., *"Heat Release Analysis of Engine Pressure Data"*, SAE Technical Paper 841359, 1984 (vcalutazione k nel ciclo di pressione)
- [6] Engine Marcello Canova, Renaud Garcin, Shawn Midlam-Mohler, Yann Guezennec, *"A Control – Oriented Model of Combustion Process in a HCCI Diesel"*, IEEE American Control Conference, 2005
- [7] www.pmmonline.co.uk/technical/diesel-workshop-boom-or-combust/

