

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA INFORMATICA

Controllo in retroazione del rapporto aria-carburante in un motore a benzina con iniezione elettronica

Relatore

Prof. Zampieri Sandro

Laureando

Trevisan Gabriele

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

Data di laurea 24/09/2024

Sommario

Nella presente tesi di laurea triennale si presenta un metodo di controllo in retroazione per il rapporto aria-carburante in un motore 4 tempi alimentato a benzina e munito di iniezione elettronica. Il processo della determinazione di un controllore atto a tale scopo è reso non banale dalla forte non linearità del sensore di ossigeno nei gas di scarico. Inoltre si sta cercando di controllare un sistema caratterizzato da forti ritardi tra ingresso e uscita, dati dalla natura a eventi del processo di combustione nel motore in esame. Lo scopo ultimo del controllore è quello di mantenere il rapporto aria-carburante il quanto più vicino possibile al rapporto stechiometrico (14.7:1) per favorire il funzionamento del catalizzatore trivalente utilizzato per ridurre le emissioni di gas nocivi o dannosi per l'ambiente. In seguito all'individuazione di un tale controllore in condizioni di funzionamento ottime, si procederà alterando il sistema motore aggiungendo realistici ritardi e variazioni non previsti in fase di progettazione per verificare la robustezza del sistema di controllo utilizzato.

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Definizioni	1
1.2	Cenni storici	2
1.3	Il motore in esame	3
1.4	Convertitore catalitico trivalente	4
2	Modello fisico del motore	5
2.1	Selezione del modello	5
2.2	Iniettore	6
2.3	Modello del collettore di aspirazione	7
2.4	Camera di combustione e collettore di scarico	10
2.5	Sensore di ossigeno	11
2.5.1	Rappresentazioni del rapporto aria-carburante	12
2.5.2	Linearizzazione attorno a un equilibrio	13
2.5.3	Equazione linearizzata del sensore di ossigeno	14
2.6	Modello a blocchi del motore	15
2.7	Funzione di trasferimento non razionale	15
3	Controllo in retroazione	17
3.1	Specifiche di progetto	17
3.2	Valutazione schemi di controllo	17
3.3	Progettazione del controllore I	18
3.4	Progettazione del controllore PI	19
3.5	Metodo Ziegler-Nichols in circuito aperto	20
3.5.1	MATLAB PID Tuner	22
4	Valutazione del controllore	23
4.1	Approssimazione del sensore di ossigeno	23
4.2	Valutazione tramite MATLAB	24

4.3	Controllore modificato	25
4.3.1	Metodo Ziegler-Nichols in circuito chiuso	25
4.3.2	Controllore ottenuto sperimentalmente	26
5	Un modello più accurato	29
5.1	Tempi morti e di apertura	29
5.1.1	Invecchiamento delle componenti	30
6	Conclusione	33
6.1	Valutazione dei risultati	33
6.2	Eventuali sviluppi futuri	34
	Bibliografia	35

Elenco delle figure

1.1	Schema fisico del motore	3
1.2	Efficienza di un convertitore catalitico a tre vie [5]	4
1.3	Sezione di un convertitore catalitico [6]	4
2.1	Modello fisico del motore	6
2.2	Quantità di carburante iniettata rispetto alla durata della pulsazione [10]	6
2.3	Rappresentazione della divisione del flusso nel collettore di aspirazione	7
2.4	Risposta al gradino della FdT per il collettore di aspirazione	9
2.5	Risposta sensore ossigeno vs rapporto aria-carburante	11
2.6	F/A vs Voltaggio del sensore O2	12
2.7	Modello Simulink con input di tipo F/A	12
2.8	Linearizzazione del sensore di ossigeno tramite $h_{lin}(y)$	13
2.9	Schema a blocchi del sensore di ossigeno linearizzato	14
2.10	Schema a blocchi ottenuto	15
2.11	Approssimata di Padé per $\tau = 0.2$	16
3.1	Diagramma di Bode e risposta allo scalino per il sistema con controllore C_I	19
3.2	Diagramma di Bode e risposta allo scalino per il sistema con controllore $C_{PI}(s)$	20
3.3	Grafici per l'identificazione dei parametri necessari	21
3.4	Diagramma di bode e risposta al gradino per il sistema con controllore $C_{PIZN}(s)$	21
3.5	Diagramma di bode e risposta al gradino per il sistema con controllore ottimizzato tramite PID Tuner	22
3.6	Risposta del sistema con approssimazione del sensore tramite $h(u)$	22
4.1	In rosso la funzione $h(x)$, in grigio i dati sperimentali del sensore	23
4.2	Modello a blocchi del sistema con approssimazione del sensore tramite $h(u)$	24
4.3	Risposta del sistema con approssimazione del sensore tramite $h(u)$	25
4.4	Risposta del sistema con $\bar{K}_p = 0.1724925$	26
4.5	Risposta del sistema con $K_p = 0.45\bar{K}_p$ e $I = 0.8\bar{T}$	26
4.6	Risposta del sistema con controllore ottenuto sperimentalmente	27

5.1	Sezione di un iniettore [9]	29
5.2	In blu la risposta del sistema senza modifiche, in rosso il sistema con i nuovi blocchi	30
5.3	In blu il sistema con gli iniettori simulati, in rosso con $\tau = 0.2s$	31
5.4	In blu il sistema con gli iniettori simulati, in rosso con $\tau = 0.5s$	31
6.1	Risposta di un sensore di ossigeno di tipo wideband [3]	34

Capitolo 1

Introduzione

Sin dai primi tempi dall'invenzione del motore a combustione, efficienza, consumi ed emissioni sono le caratteristiche che si è sempre cercato di migliorare: i motori, infatti, sono diventati sempre più puliti e performanti.

Dall'avvento dell'iniezione elettronica nei motori prodotti in massa negli ultimi anni dell'80 è stato possibile portare queste migliorie anche nelle comuni automobili civili.

Questa tecnologia consiste in una serie di sensori ed attuatori in grado di monitorare il flusso d'aria entrante nel motore e determinare la corretta quantità di carburante da iniettare.

Nella presente tesi, ci si concentrerà nel controllo della quantità di carburante iniettata in regime stazionario.

1.1 Definizioni

Prima di addentrarsi nello studio di questo sistema, risulta utile definire le unità di misura e le quantità adoperate durante l'elaborato.

La principale unità di misura è il rapporto aria-carburante con le sue varie rappresentazioni; la sua forma più utilizzata è AFR (Air Fuel Ratio) definito come:

$$AFR = \frac{m_{aria}}{m_{carb}} \quad (1.1)$$

Dove m_{aria} e m_{carb} rappresentano, rispettivamente, la massa d'aria e di carburante entrante nel motore, espresse nelle medesime unità di misura, solitamente $\frac{mg}{mg}$. Il valore ottimale per garantire una completa combustione con il minimo delle emissioni, nel caso il carburante sia comune benzina, è: $AFR = 14.7:1$ (14.7 unità di aria per ogni unità di carburante). È importante osservare come all'*aumentare* e al *diminuire* della quantità di carburante il valore AFR, rispetti-

vamente, *diminuisca e aumenti*. Questa formulazione è utile in quanto molto intuitiva e di facile interpretazione.

AFR non è, però, sempre la miglior rappresentazione: all'utilizzo di carburanti diversi, corrisponde un diverso rapporto stechiometrico e, di conseguenza, un AFR ottimale differente. Risulta, perciò, comodo normalizzare AFR rispetto al rapporto stechiometrico del carburante utilizzato. Il valore ottenuto viene denominato lambda (λ) e definito come:

$$\lambda = \frac{AFR}{AFR_{stoic}} \quad (1.2)$$

Dove AFR è il rapporto aria-carburante da convertire in λ e AFR_{stoic} è il rapporto aria-carburante stechiometrico per il carburante utilizzato.

λ segue lo stesso andamento di AFR con il variare della quantità di carburante rispetto a quella di aria. Il valore $\lambda = 1$ indica un rapporto stechiometrico.

Un'ulteriore metodo per rappresentare il rapporto aria-carburante è tramite l'inverso di AFR: F/A , calcolato come:

$$F/A = \frac{1}{AFR} = \frac{m_{carb}}{m_{aria}} \quad (1.3)$$

Il valore stechiometrico, in rappresentazione F/A , è $F/A = \frac{1}{AFR_{stoic}} \approx 0.068$.

Nonostante questa forma sia meno intuitiva rispetto alle due presentate sopra, risulta più utile nelle applicazioni matematiche in quanto, se m_{aria} è costante, F/A è proporzionale a m_{carb} .

1.2 Cenni storici

Il catalizzatore è uno strumento che permette di trasformare le emissioni nocive della combustione in prodotti meno pericolosi per l'uomo e la natura.

Tale dispositivo necessita, però, del mantenimento del rapporto stechiometrico della miscela aria-carburante per permettere ai metalli di convertire i gas nocivi.

Questo ha portato da subito notevoli problemi dovuti al non ottimale rapporto aria-carburante ottenuto dall'utilizzo di carburatori, che spesso portavano ad ottenere una miscela grassa.

Si è cercato di ovviare a questo problema iniettando aria nei gas di scarico prima del catalizzatore, ma con relativamente scarsi risultati dati dall'utilizzo di un sistema passivo e non controllato.

Questi sistemi primitivi permettevano di rimuovere solamente CO e idrocarburi. Con la comparsa dell'iniezione elettronica e, di conseguenza, la possibilità di mantenere vicino al valore stechiometrico il rapporto aria-carburante, si è potuto adottare il catalizzatore trivalente che utilizziamo tuttora.

Quest'ultimo necessita, però, di un preciso controllo del rapporto aria-carburante in quanto ha la massima efficienza di conversione a un rapporto $\lambda = 1$ (stechiometrico per la benzina). In questo elaborato si svilupperà un controllore in retroazione per mantenere il dato rapporto aria-carburante il più vicino possibile alla massima efficienza del catalizzatore.

1.3 Il motore in esame

Verrà considerato un motore monocilindrico a 4 tempi alimentato a benzina con accensione a candela ed equipaggiato con un sistema di iniezione elettronica.

Nel motore in esame è presente un catalizzatore trivalente, indispensabile strumento per ridurre le emissioni di gas nocivi dovuti alla combustione del carburante.

Per questa analisi il motore verrà mantenuto in regime stazionario.

Durante la fase di progettazione si assumerà che gli iniettori siano perfetti, ossia che rispondano immediatamente e senza errore alcuno ai comandi impartiti dal controllore.

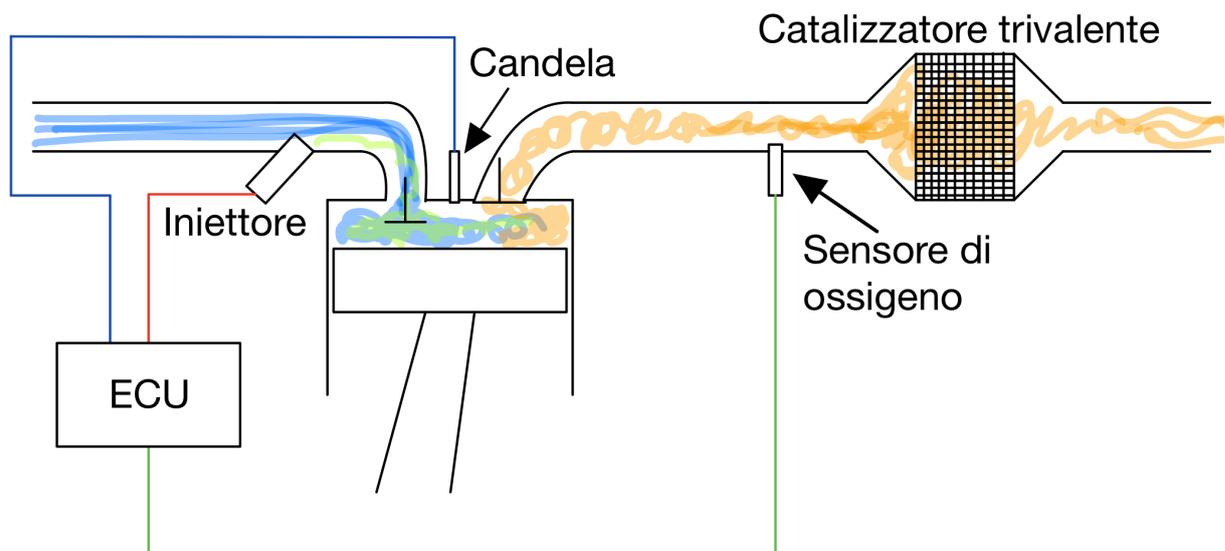


Figura 1.1: Schema fisico del motore

1.4 Convertitore catalitico trivalente

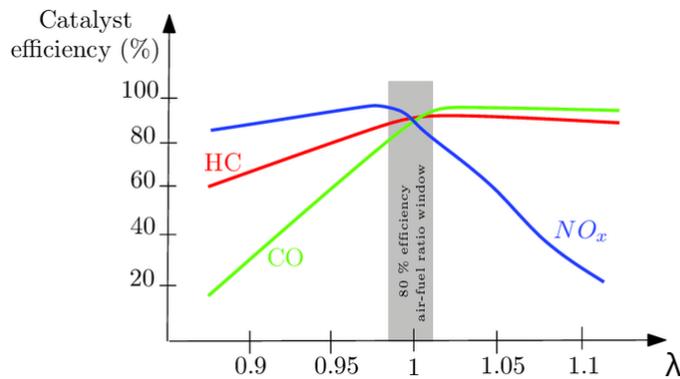


Figura 1.2: Efficienza di un convertitore catalitico a tre vie [5]

Il principale dispositivo utilizzato per limitare l'emissione di gas nocivi dei motori a combustione è il convertitore catalitico trivalente, così chiamato perché agisce sui tre principali agenti inquinanti prodotti dalla combustione: monossido di carbonio (CO), idrocarburi (H_nC_m) e ossidi di azoto (NO_x).

Questo importante componente, una volta raggiunta la temperatura di lavoro, ottiene la sua massima efficienza di conversione a un rapporto aria-carburante di $\lambda = 1$, come mostrato nella figura 1.2.

Per poter convertire le sostanze inquinanti, il catalizzatore trivalente necessita di piccole escursioni grasso / magro. Durante il periodo magro, immagazzina l'ossigeno in eccesso e converte gli ossidi di azoto in azoto e ossigeno. Durante la fase grassa, il catalizzatore impiega l'ossigeno immagazzinato per meglio trasformare idrocarburi e monossido di carbonio in H_2O e CO_2 [4].

Questi dispositivi sono sensibili anche alla temperatura di utilizzo: una miscela troppo grassa, per un periodo di tempo prolungato, può portare al surriscaldamento e alla deteriorazione del catalizzatore. Durante la fase subito successiva all'avviamento del motore, per velocizzare il raggiungimento della temperatura ottimale del catalizzatore, viene iniettata una miscela più grassa e ritardato il momento di accensione della scintilla. Così facendo, si aumenta la temperatura dei gas di scarico e, di conseguenza, quella del convertitore catalitico.



Figura 1.3: Sezione di un convertitore catalitico [6]

Capitolo 2

Modello fisico del motore

Per procedere con la progettazione del controllore è opportuno fare un passo intermedio e approfondire il modello scelto per la rappresentazione fisica del motore, per poi passare al modello a blocchi dello stesso.

2.1 Selezione del modello

Allo scopo di sviluppare il controllore è fondamentale individuare un modello sufficientemente completo, per catturare la maggior parte delle caratteristiche del motore, ma, allo stesso tempo, trattabile con le tecniche conosciute.

Si è, perciò, scelto di adottare un modello scomponibile nelle seguenti componenti:

- Collettore d'aspirazione
- Iniettore
- Camera di combustione
- Collettore di scarico
- Sensore di ossigeno nei gas di scarico
- Catalizzatore

I singoli sottosistemi essenziali per lo studio del motore e le loro interazioni sono riportati nello schema seguente.

Ciascuna delle componenti riportate nello schema ha un impatto non trascurabile sulle trasformazioni subite dagli ingressi e relativi ritardi.

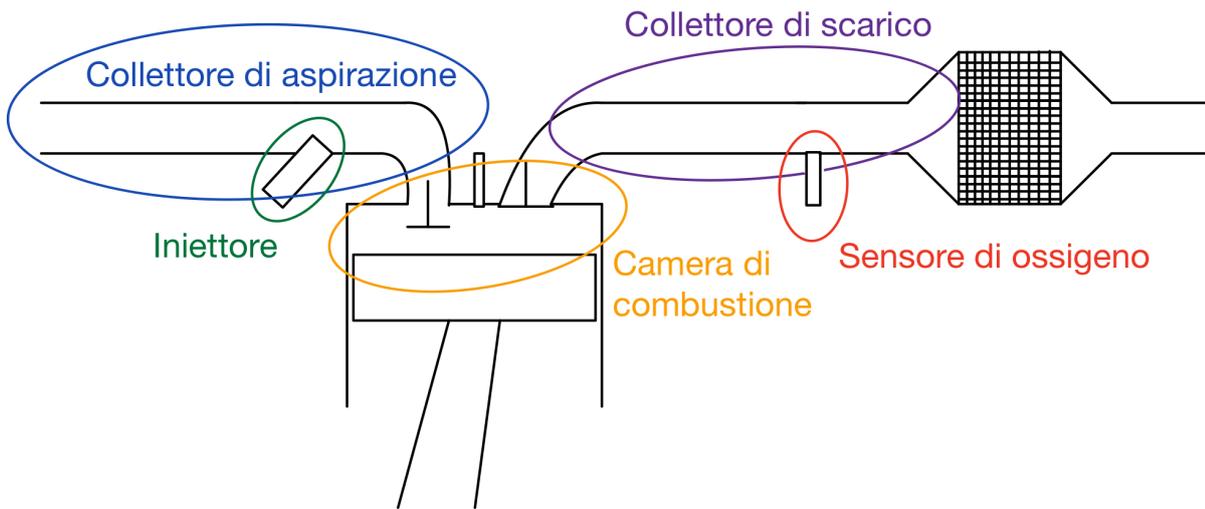


Figura 2.1: Modello fisico del motore

2.2 Iniettore

L'iniettore è l'attuatore che trasforma il segnale di controllo ricevuto dal controllore nella quantità di carburante iniettata.

Gli iniettori sono pilotati a onde quadre e si definisce "pulsazione" il tempo totale di iniezione richiesto dalla centralina motore, ossia, il tempo totale *comandato* di apertura dell'iniettore. Questo segnale presenta due valori: alto e basso, il primo apre e mantiene in posizione l'iniettore, il secondo lo chiude.

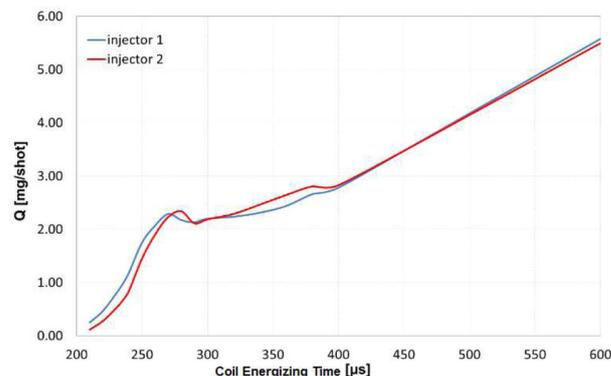


Figura 2.2: Quantità di carburante iniettata rispetto alla durata della pulsazione [10]

Com'è possibile vedere dal grafico in figura 2.2, sotto un valore critico di pulsazione, l'iniettore non si trova più in un regime di funzionamento lineare, ma presenta importanti non linearità. Allo scopo di questo studio, si suppone che l'iniettore considerato sia dimensionato correttamente per il motore e sia, pertanto, in grado di rimanere nella regione di funzionamento lineare nello stato del motore richiesto per questo elaborato.

2.3 Modello del collettore di aspirazione

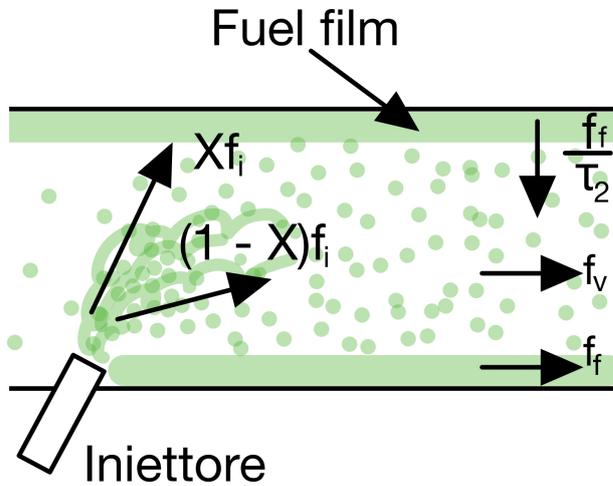


Figura 2.3: Rappresentazione della divisione del flusso nel collettore di aspirazione

Il collettore di aspirazione, in un motore dotato di iniezione al collettore, può essere modellato tramite un flusso del carburante a due fasi. [1]

Questo modello consiste nella rappresentazione di due flussi distinti: uno denominato "Lento", aderente alle pareti e, di conseguenza, rallentato rispetto al flusso principale, detto flusso "Veloce". Quest'ultimo è composto dal carburante vaporizzato sospeso nell'aria passante nel collettore.

Per il modello in questione si assume che metà del carburante faccia parte del flusso lento e l'altra metà di quello veloce ($X = 0.5$).

Tali flussi sono caratterizzati da diverse costanti di tempo quantificabili tramite il modello proposto in [1].

Nel presente elaborato verranno utilizzati i valori presentati in [7], ossia:

$$\tau_1 = 0.02s \text{ per indicare il ritardo del "Fast fuel"}$$

$$\tau_2 = 1s, \text{ per lo "Slow fuel"}$$

Nel modello in esame il collettore ospita l'iniettore, per questo vengono a crearsi delle dinamiche tra il collettore e la massa di carburante iniettata.

Al momento dell'iniezione, è inevitabile che una percentuale X del carburante si vada a condensare direttamente sulle pareti del collettore d'aspirazione, mentre la restante parte $1 - X$ rimane sotto forma di vapore e non interagisce con il collettore.

Si consideri X costante nel seguente elaborato, in quanto in regime stazionario.

A causa di questo fenomeno, si crea uno strato di carburante condensato, chiamato "Fuel film" che può essere trattato come un serbatoio avente un flusso in ingresso (parte del carburante iniettato) e uno in uscita, proporzionale alla quantità di carburante accumulato.

La quantità di carburante entrante in camera di combustione è, perciò, la somma del carburante vaporizzato e di quello evaporato dallo strato di carburante condensato.

I processi dello "Slow fuel" e "Fast fuel" sono descritti da Hendricks in [8] tramite le equazioni seguenti differenziali:

$$\ddot{m}_{fv}(t) = \frac{1}{\tau_1}(-\dot{m}_{fv}(t) + (1 - X)\dot{m}_{fi}(t)) \quad (2.1)$$

$$\ddot{m}_{ff}(t) = \frac{1}{\tau_2}(-\dot{m}_{ff}(t) + X\dot{m}_{fi}(t)) \quad (2.2)$$

$$\dot{m}_f(t) = \dot{m}_{fv}(t) + \dot{m}_{ff}(t) \quad (2.3)$$

Dove:

\dot{m}_{fi} è il flusso di carburante iniettato,

\dot{m}_{fv} è il flusso di carburante vaporizzato,

\dot{m}_{ff} è il flusso di carburante che si condensa sulle pareti del collettore,

\dot{m}_f è la quantità totale di carburante entrante nella camera di combustione,

X è la percentuale di carburante che si condensa sulle pareti del collettore di aspirazione,

τ_1 rappresenta il tempo necessario al carburante vaporizzato per raggiungere la camera di combustione,

τ_2 rappresenta il tempo impiegato dal carburante condensato per evaporare.

L'equazione 2.1 rappresenta il carburante vaporizzato che non raggiunge immediatamente la camera di combustione, ma necessita di tempo per percorrere i condotti del collettore di aspirazione.

Eq. 2.2 descrive il comportamento del carburante condensato, tramite la costante di tempo τ_2 .

Infine, il carburante entrante in camera di combustione è dato dalla somma dei due flussi.

Per rendere più intuitive le equazioni di cui sopra è possibile esprimere le derivate della massa come flusso:

$$f_v(t) = \dot{m}_{fv}(t) \quad (2.4)$$

$$f_f(t) = \dot{m}_{ff}(t) \quad (2.5)$$

$$f_t(t) = \dot{m}_{fv}(t) + \dot{m}_{ff}(t) = f_v(t) + f_f(t) \quad (2.6)$$

Le equazioni di Hendricks diventano, quindi:

$$\dot{f}_v(t) = \frac{1}{\tau_1}(-f_v(t) + (1 - X)f_i(t)) \quad (2.7)$$

$$\dot{f}_f(t) = \frac{1}{\tau_2}(-f_f(t) + Xf_i(t)) \quad (2.8)$$

$$f_t(t) = f_v(t) + f_f(t) \quad (2.9)$$

Dalle equazioni differenziali, tramite trasformata di Laplace, si arriva alla funzione di trasferimento del collettore.

Dall'Eq. 2.7:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}\{\dot{f}_v(t) = \frac{1}{\tau_1}(-f_v(t) + (1 - X)f_i(t))\} &\rightarrow \\ sF_v(s) &= \frac{1}{\tau_1}(-F_v(s) + (1 - X)F_i(s)) \leftrightarrow \\ \tau_1 sF_v(s) &= (1 - X)F_i(s) - F_v(s) \leftrightarrow \\ (1 + s\tau_1)F_v(s) &= (1 - X)F_i(s) \leftrightarrow \\ F_v(s) &= \frac{1 - X}{s\tau_1 + 1}F_i(s) \end{aligned} \quad (2.10)$$

Analogamente, da 2.2 si ottiene la funzione di trasferimento:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}\{\dot{f}_f(t) = \frac{1}{\tau_2}(-f_f(t) + Xf_i(t))\} &\rightarrow \\ sF_f(s) &= \frac{1}{\tau_2}(-F_f(s) + XF_i(s)) \leftrightarrow \\ \tau_2 sF_f(s) &= XF_i(s) - F_f(s) \leftrightarrow \\ (1 + s\tau_2)F_f(s) &= XF_i(s) \leftrightarrow \\ F_f(s) &= \frac{X}{s\tau_2 + 1}F_i(s) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Che, sostituite in 2.9, portano a:

$$F_t(s) = F_v(s) + F_f(s) = \frac{1 - X}{s\tau_1 + 1}F_i(s) + \frac{X}{s\tau_2 + 1}F_i(s) \quad (2.12)$$

Si ottiene, quindi, la funzione di trasferimento G_{in} :

$$G_{in}(s) = F_t(s) = \frac{(1 - X)s\tau_2 + Xs\tau_1 + 1}{(1 + s\tau_1)(1 + s\tau_2)} \quad (2.13)$$

Nonostante $G_{in}(s)$ sia stata ricavata utilizzando il flusso di carburante, nel caso del presente elaborato, è valida anche applicandola al rapporto F/A.

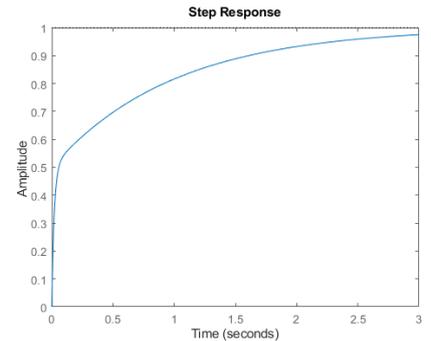


Figura 2.4: Risposta al gradino della FdT per il collettore di aspirazione

Questo perché, essendo il motore in regime stazionario, il flusso d'aria è costante e, di conseguenza, il rapporto F/A è direttamente proporzionale al flusso di carburante.

La rappresentazione del fenomeno così trovata è una buona approssimazione per il comportamento del carburante una volta a contatto con il collettore d'aspirazione.

2.4 Camera di combustione e collettore di scarico

Essendo il processo di combustione ciclico, si ha, inevitabilmente, un ritardo tra iniezione del carburante (Fase di aspirazione) e la produzione di un output da parte del processo (Fase di scarico).

Il ritardo in questione può essere calcolato come:

$$\frac{2}{\frac{RPM}{60}} \quad (2.14)$$

Dove RPM è la misura della velocità di rotazione del motore in rotazioni al minuto.

Il numeratore 2 è utilizzato in quanto il motore in esame lavora nel ciclo Otto (4 Tempi), perciò ogni fase deve attendere 2 giri dell'albero motore per essere ripetuta. A tale valore va sommato il tempo impiegato dai gas di scarico per raggiungere il sensore di ossigeno.

In [7] è proposto un valore di $\tau_d = 0.2s$ che, tramite la precedente formula, può essere associato a una velocità di rotazione riconducibile a un regime di minimo (idle).

Assumendo che le sostanze entranti in camera di combustione siano solamente l'aria aspirata dal motore e il carburante iniettato, per cui non siano presenti altri agenti nel processo, è possibile affermare che il rapporto tra i singoli elementi chimici è costante. Questo perché durante la combustione aria e carburante vengono ricombinati in altre sostanze senza che vengano aggiunti o rimossi elementi. Di conseguenza, il rapporto tra le molecole di ossigeno e tutti gli altri componenti dei gas, in qualunque punto del motore, è costante. Se ne conclude che il rapporto aria-carburante rimane inalterato dal processo di combustione.

È possibile, quindi, rappresentare la camera di combustione tramite una pura traslazione nel tempo.

Per rappresentare il suddetto ritardo si utilizza la seguente funzione di trasferimento non razionale:

$$G_{comb}(s) = e^{-\tau_d s} = e^{-0.2s} \quad (2.15)$$

2.5 Sensore di ossigeno

Il sensore di ossigeno, comunemente chiamato anche "sonda lambda", posizionato a contatto col flusso dei gas di scarico, è uno strumento necessario per verificare che il corretto rapporto aria-carburante sia stato immesso e consumato in camera di combustione.

Questo dispositivo permette, perciò, di verificare e controllare le emissioni del motore.

In questa tesi sarà proposta, allo scopo di sviluppare il controllore, una versione linearizzata di questo sensore.

Il dispositivo non è ideale: presenta un ritardo nella lettura e un comportamento simile a quello di un interruttore, è, infatti, conosciuto anche con il nome di "Switching Oxygen Sensor".

$\tau = 0.1s$ è il tempo di risposta del sensore di ossigeno, tiene conto della miscelazione dei gas nel collettore di scarico e i tempi di lettura e aggiornamento del sensore. [2]

È possibile rappresentare questo comportamento tramite una funzione di ritardo del sensore [7]:

$$H_{lag}(s) = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (2.16)$$

Ottenuta dall'equazione differenziale di primo ordine:

$$\tau \dot{y}(t) + y(t) = u(t) \quad (2.17)$$

La sola funzione di trasferimento indicata non è in grado, però, di catturare il comportamento del sensore di ossigeno che, in prossimità del valore $\lambda = 1$, si comporta quasi come un interruttore, passando da 0v a 1v anche per piccole variazioni di λ .

Il sensore d'ossigeno utilizzato è di tipo "Narrow Band", ossia presenta una forte sensibilità a cambiamenti nella miscela aria-carburante vicino al rapporto stechiometrico.

Come si può notare dal grafico, il comportamento di tale sensore è fortemente non lineare. [11]

Per poter utilizzare gli strumenti conosciuti è, quindi, indispensabile approssimare tramite una funzione lineare il sensore.

A causa dell'importante non linearità intrinseca alla risposta di questo sensore, una sua linearizzazione è da considerarsi poco affidabile e si deve, perciò, valutare accuratamente le prestazioni del controllore ottenuto dall'analisi di tale sistema con

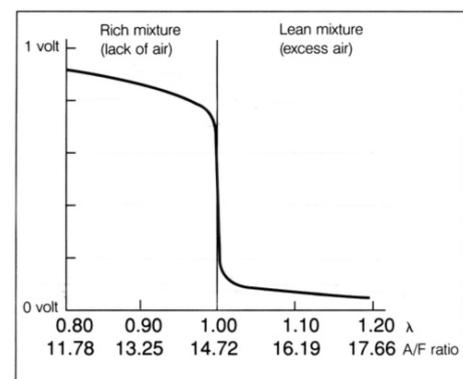


Figura 2.5: Risposta sensore ossigeno vs rapporto aria-carburante

un'approssimazione del sensore più realistica.

2.5.1 Rappresentazioni del rapporto aria-carburante

Come anticipato in 1.1, è possibile rappresentare la quantità di aria rispetto al carburante entrante in camera di combustione in diverse modalità: Il rapporto tra aria e carburante (A/F), il suo inverso (F/A) e il valore λ .

Nonostante sia più intuitivo utilizzare il valore A/F , questo presenta degli importanti problemi nel modello, poiché, essendo inversamente proporzionale alla quantità di carburante entrante in camera di combustione, rende non lineari alcune equazioni utilizzate, in particolare, quelle del collettore d'aspirazione.

Per non incorrere nell'inconveniente della rappresentazione A/F , è sufficiente utilizzare la rappresentazione F/A , il cui valore aumenta linearmente con l'aumentare della quantità di carburante iniettata.

È visibile nella figura 2.7 il comportamento del sistema basato su questa rappresentazione, che rispetta quello atteso: un picco magro all'inizio e, successivamente, il raggiungimento dell'equilibrio a regime.

Se finora è stato possibile discutere dei vari fenomeni presenti all'interno di un motore a combustione adoperando, in modo intercambiabile, le unità di misura

AFR, F/A e λ , è ora necessario, allo scopo della linearizzazione del sensore di ossigeno, usare la rappresentazione F/A .

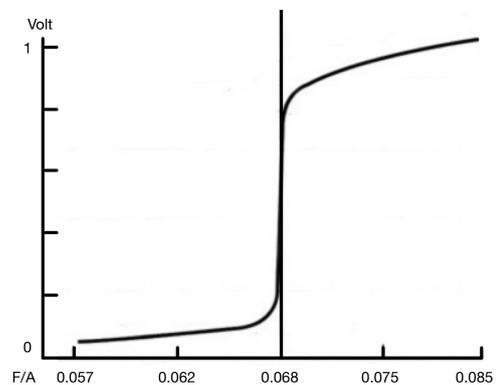


Figura 2.6: F/A vs Voltaggio del sensore O2



Figura 2.7: Modello Simulink con input di tipo F/A

2.5.2 Linearizzazione attorno a un equilibrio

Per ottenere una linearizzazione accettabile, è necessario procedere alla linearizzazione del sensore attorno a un equilibrio.

In questo caso si è scelto come equilibrio il punto $(\bar{u}, \bar{z}) = (\frac{1}{14.7}, 0.45)$, dove \bar{u} rappresenta il segnale in ingresso al sensore, quindi, il rapporto F/A e \bar{z} è l'uscita del sensore in Volt.

Imponendo l'equilibrio nell'equazione 2.17 si ottiene:

$$\begin{cases} \dot{y}(t) = 0 \\ u(t) = \bar{u} \\ y(t) = \bar{y} \\ \tau \dot{y}(t) + y(t) = u(t) \end{cases} \rightarrow \bar{y} = \bar{u} \quad (2.18)$$

Chiamata $h(y)$ la funzione in grado rappresentare la risposta non lineare del sensore di ossigeno, l'equilibrio cercato si ottiene con $h(\bar{y}) = \bar{z}$ che, per le equazioni 2.18, è equivalente a $h(\bar{u}) = \bar{z}$. È, perciò, sufficiente trovare una linearizzazione di $h(y)$, $h_{lin}(y)$, che soddisfi $h_{lin}(\bar{u}) = \bar{z}$.

$$h_{lin}(y) = 223.5(y - \bar{u}) + \bar{z} = 223.5(y - \frac{1}{14.7}) + 0.45 \quad (2.19)$$

La linearizzazione è stata effettuata tramite una retta passante per il punto di equilibrio selezionato e con una pendenza tale da approssimare in maniera soddisfacente l'intervallo $I_{F/A} = [\frac{1}{15.0}, \frac{1}{14.3}] \approx [0.0667, 0.0699]$, tipica banda di funzionamento di un motore a benzina.

Com'è possibile notare in figura 2.8, l'approssimazione lineare è buona nell'intervallo $I_{F/A}$, ma diventa pessima se y è al di fuori di $I_{F/A}$.

Si definisce $K_{O_2} = 223.5$.

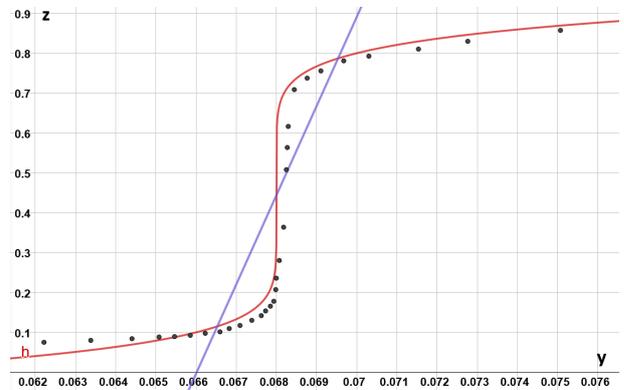


Figura 2.8: Linearizzazione del sensore di ossigeno tramite $h_{lin}(y)$

2.5.3 Equazione linearizzata del sensore di ossigeno

Combinando le due equazioni ricavate finora per il sensore di ossigeno, si arriva alla funzione di trasferimento cercata:

$$H_{O_2}(s) = K_{O_2} \cdot H_{lag}(s) = \frac{K_{O_2}}{1 + \tau s} \quad (2.20)$$

$H_{O_2}(s)$ può essere rappresentata tramite lo schema a blocchi seguente:

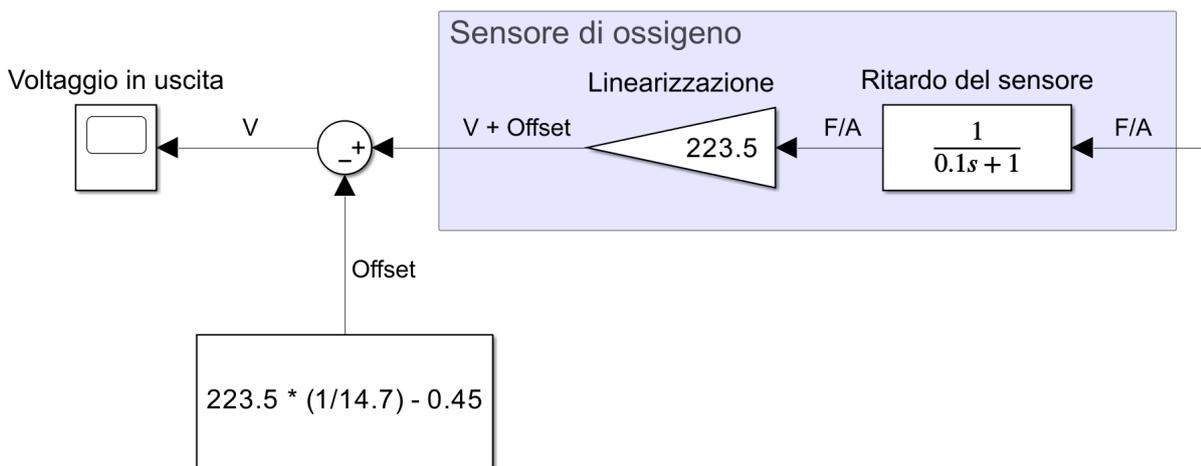


Figura 2.9: Schema a blocchi del sensore di ossigeno linearizzato

È importante osservare come il sensore linearizzato abbia come uscita un segnale che si discosta dal valore atteso di una costante $223.5 \cdot \frac{1}{14.7} - 0.45$, questo è dovuto dal fatto che la funzione $h_{lin}(y)$ non passa per l'origine. Sarà, quindi, indispensabile applicare questa differenza anche all'ingresso del controllore, in quanto, sommare una costante al valore per annullare questo effetto (Come in figura) renderebbe il sistema MISO (Multiple Input Single Output), con uno degli ingressi la costante.

2.6 Modello a blocchi del motore

Abbiamo ora tutto l'occorrente per costruire uno schema a blocchi completo per il sistema da controllare.

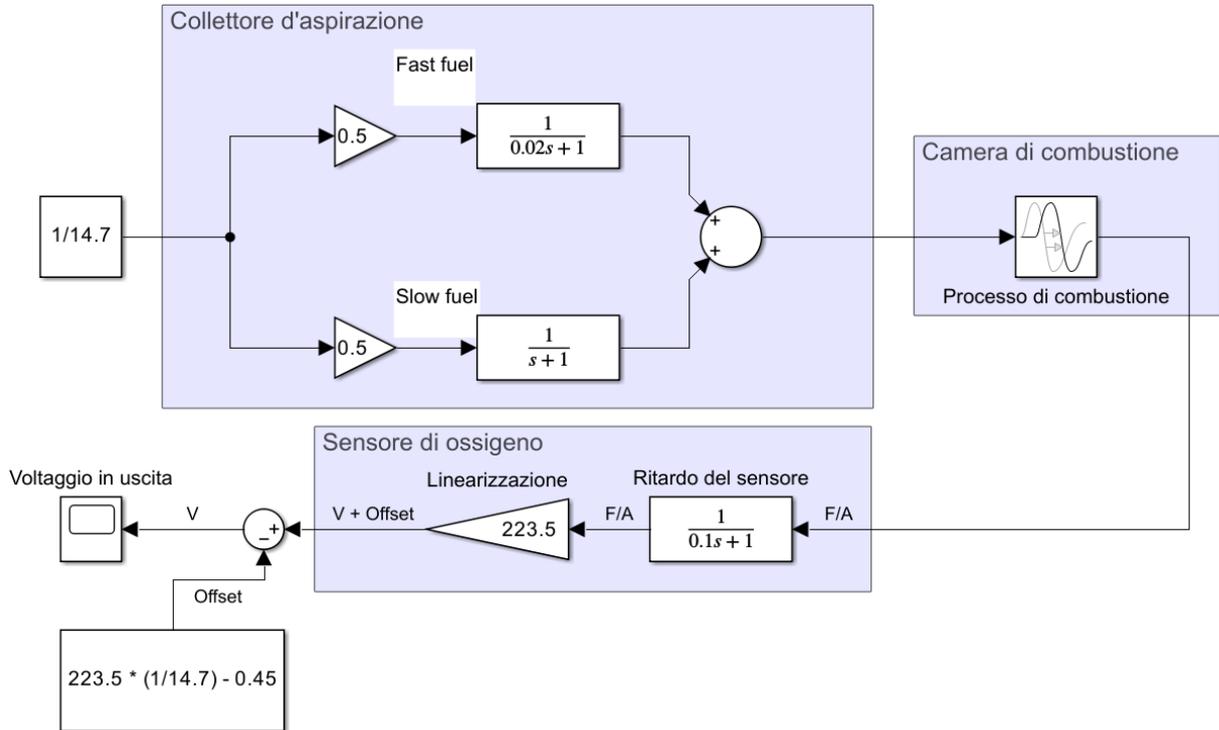


Figura 2.10: Schema a blocchi ottenuto

Dallo schema a blocchi è banale ricavare la seguente funzione di trasferimento dall'ingresso $U(s)$ all'uscita $V_\lambda(s)$:

$$W(s) = \frac{V_\lambda(s)}{U(s)} = \frac{1 + s\tau_1(1 - X) + s\tau_2 X}{(1 + s\tau_2)(1 + s\tau_1)} \cdot e^{-s\tau_d} \cdot \frac{K_{O_2}}{1 + s\tau} \quad (2.21)$$

La risposta al gradino, in figura 2.7, mostra, inoltre, che il sistema in catena aperta è stabile a regime.

2.7 Funzione di trasferimento non razionale

Come è facile notare dall'equazione della funzione di trasferimento 2.21, la presenza del termine $e^{-s\tau}$ la rende non razionale e, pertanto, di difficile trattazione con i tradizionali metodi di analisi.

Un metodo per mitigare questo problema è quello di ricorrere alle approssimate di Padé: funzioni di trasferimento razionali in grado di approssimare con una certa precisione i ritardi.

Un'altra metodologia è quella di avvalersi delle funzionalità di calcolo numerico fornite da MATLAB e mantenere la FdT come non razionale.

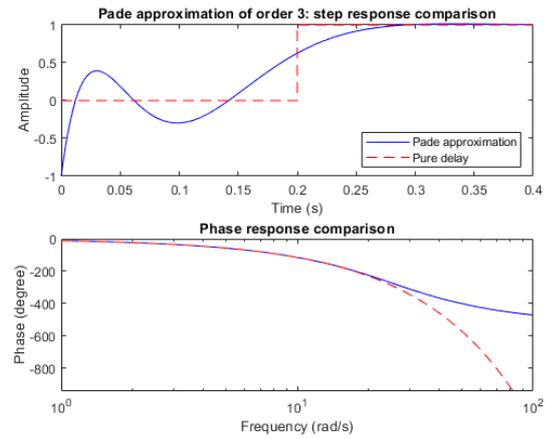


Figura 2.11: Approssimata di Padé per $\tau = 0.2$

Capitolo 3

Controllo in retroazione

Il sistema in studio è particolarmente delicato dal momento che presenta stringenti specifiche di controllo e un non trascurabile ritardo tra input e output.

3.1 Specifiche di progetto

Si sta sviluppando il controllore su un'approssimazione lineare di un sensore con risposta estremamente non lineare. È, dunque, possibile che il lavoro svolto in questa fase dovrà essere rivisitato all'inserimento nel modello di una miglior' approssimazione del sensore

Le specifiche sono dettate dalla necessità di mantenere il quanto più vicino possibile al rapporto stechiometrico la composizione dei gas di scarico. Per permettere al catalizzatore di lavorare alla massima efficienza è vitale rimanere a $\pm 1\%$ da $\lambda = 1$.

Il tempo di assestamento deve essere il più corto possibile.

3.2 Valutazione schemi di controllo

Essendo la specifica dell'errore a regime molto stringente, è indispensabile inserire un termine integrale nel controllore, per poter raggiungere il target, poiché, il sistema è di tipo 0 e, senza un polo nell'origine, porterebbe ad un errore al gradino costante.

La funzione di trasferimento per un controllore I è del tipo:

$$C_I(s) = \frac{I}{s} \quad (3.1)$$

3.3 Progettazione del controllore I

Per sviluppare il controllore di tipo I, è sufficiente selezionare il tempo di risposta t_r desiderato e ricavare la pulsazione di attraversamento ω_a tramite l'approssimazione $t_r \approx \frac{2}{\omega_a}$. Per questo controllore, viene selezionato un tempo di risposta $t_r = 1s$, per cui, si ottiene $\omega_a = 2rad/s$.

Una volta portata la funzione di trasferimento 2.21 in forma di Bode, si ha:

$$W(s) = K_B \bar{W}(s) \quad (3.2)$$

con

$$\bar{W}(s) = \frac{(1 + \frac{s}{1.961})}{(1 + \frac{s}{50})(1 + \frac{s}{10})(1 + s)} \quad (3.3)$$

Applicando 3.1 si ottiene la seguente funzione di trasferimento, con la sola variabile I libera di variare:

$$W_{C_I}(s) = C_I(s) K_B \bar{W}(s) = \frac{I K_B}{s} \bar{W}(s) \quad (3.4)$$

Dal momento che la pulsazione di attraversamento indica la frequenza alla quale il modulo della funzione di trasferimento vale 1, si pone:

$$|W_{C_I}(j\omega_a)| = 1 \quad (3.5)$$

Ricordando che, per una funzione di trasferimento F vale $|F(s)| = \frac{|N|}{|D|}$, dove N e D sono, rispettivamente, numeratore e denominatore di F , si può scomporre il calcolo in:

$$|N_{W_{C_I}}| = |223.5| * |I| * |1 + \frac{2j}{1.961}| \approx 319.236I \quad (3.6)$$

e

$$|D_{W_{C_I}}| = |2j| * |1 + \frac{2j}{50}| * |1 + \frac{2j}{10}| * |1 + 2j| \approx 4.564 \quad (3.7)$$

Concludendo il calcolo:

$$|W_{C_I}(j\omega_a)| = \frac{|N_{W_{C_I}}|}{|D_{W_{C_I}}|} \approx \frac{319.236}{4.564} I \leftrightarrow I \approx 0.0143 \quad (3.8)$$

Applicando il controllore $C_I(s)$ al sistema, si osserva il seguente comportamento:

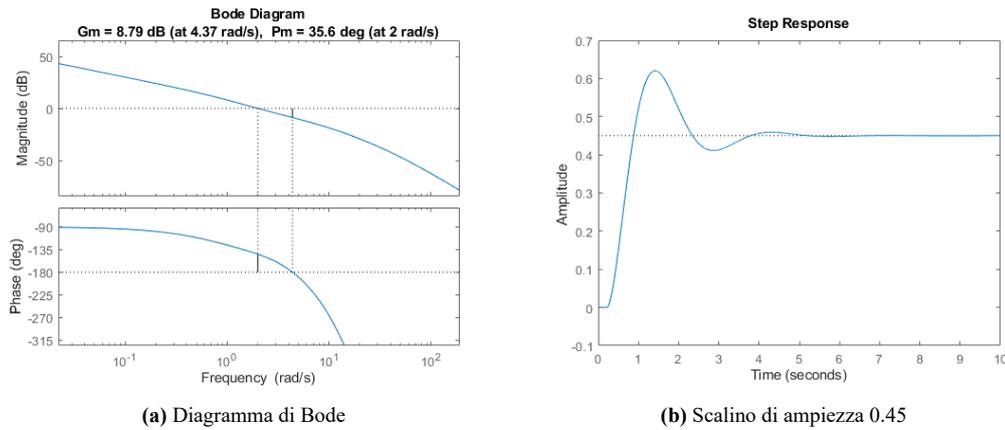


Figura 3.1: Diagramma di Bode e risposta allo scalino per il sistema con controllore C_I

Osservando il diagramma di Bode, si nota come il margine di fase P_m sia relativamente basso e il tempo di risposta sia lento, è opportuno, quindi, effettuare delle modifiche al controllore per migliorarne le prestazioni: questo può essere ottenuto tramite uno zero stabile, accuratamente posizionato.

3.4 Progettazione del controllore PI

L'aggiunta di uno zero al controllore I, lo rende di tipo PI:

$$C_{PI}(s) = \frac{I}{s} \left(1 + \frac{K_p}{I} s \right) \quad (3.9)$$

Per posizionare lo zero, serve identificare una nuova pulsazione di attraversamento desiderata, per esempio $\omega_a^* = 4 \text{ rad/s}$.

Tale ω_a^* è valida qualora l'innalzamento della fase richiesto per raggiungere $m_\varphi = 60^\circ$ sia minore di 90° .

$$m_\varphi(\omega_a^*) = 180 + (m_\varphi^*) = 180 - 174.2896 = 5.7104^\circ \quad (3.10)$$

Dove il valore di $m_\varphi^* = -174.2896$ è stato ottenuto tramite il comando MATLAB

```
[mag, phase, wout] = bode(W_CI, w_a_star)
```

Qualora fosse stato richiesto un innalzamento del margine di fase $m_\varphi(\omega_a^*)$ di più di 90° , sarebbe necessario aggiungere almeno un secondo zero.

Sfruttando l'approssimazione asintotica dei diagrammi di Bode:

$$|W_{C_I}(j\omega)|_{dB} \approx 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{\omega_a}{\omega}\right) \rightarrow$$

$$\frac{7.8}{20} = \log_{10}\left(\omega_a^* \cdot \frac{K_p}{I}\right) \leftrightarrow$$

$$\frac{K_p}{I} \approx 0.6158$$
(3.11)

Sostituendo, si ottiene $K_p = \frac{K_p}{I} \cdot I \approx 0.0088$.

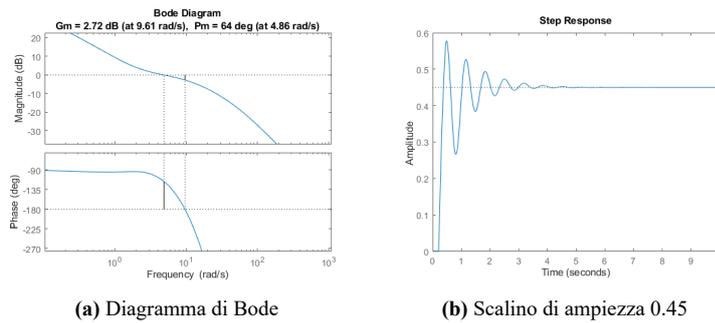


Figura 3.2: Diagramma di Bode e risposta allo scalino per il sistema con controllore $C_{PI}(s)$

Il controllore $C_{PI}(s)$ presenta un buon tempo di risposta e una sovraelongazione accettabile. Il margine di fase è buono, a un valore di circa 64° .

3.5 Metodo Ziegler-Nichols in circuito aperto

Il metodo Ziegler-Nichols è un processo per calcolare i termini di un controllore PID che non richiede un modello matematico del sistema da controllare. La sua versione in circuito aperto prevede lo studio della risposta del sistema al gradino unitario e una serie di semplici operazioni per determinare:

- Ritardo di trasporto T
- Costante di tempo equivalente τ_{eq}
- Ampiezza a regime A

I valori si identificano facilmente in maniera grafica:

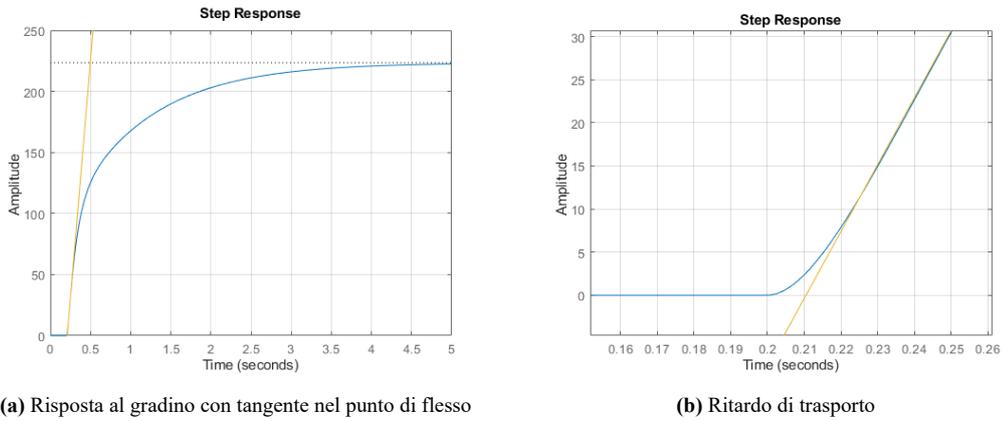


Figura 3.3: Grafici per l'identificazione dei parametri necessari

Dalla figura 3.3 è possibile osservare i valori $T \approx 0.201s$, $\tau_{eq} \approx 0.297s$ e $A = 223.5$. Nel caso di un controllore PI, il metodo Ziegler-Nichols adotta le seguenti formule:

$$K_p = \frac{0.9\tau_{eq}}{TA} \quad (3.12)$$

$$I = 3T$$

Il controllore così ottenuto ha, quindi, i parametri: $K_p = 0.00595$, $I = 0.603$.

Si nota facilmente come il parametro I sia molto elevato rispetto al controllore $C_{PI}(s)$, è, dunque, intuibile che renderà il sistema instabile. I grafici seguenti confermano l'intuizione.

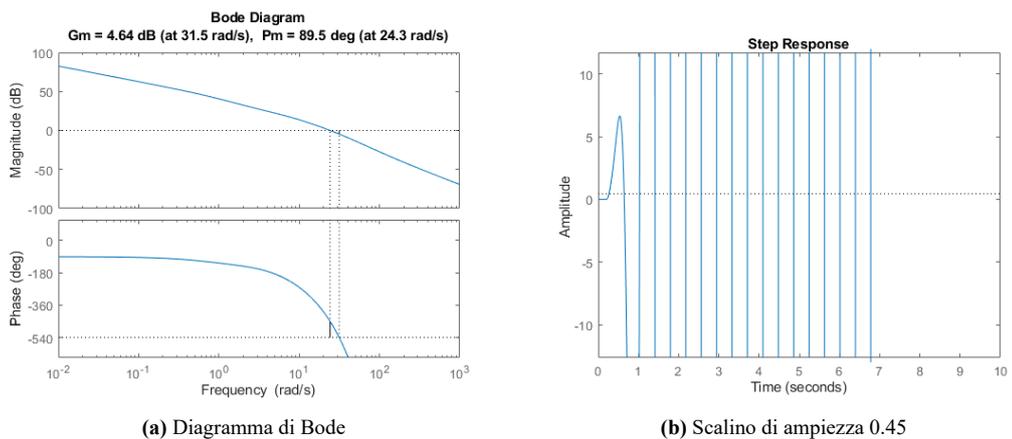


Figura 3.4: Diagramma di bode e risposta al gradino per il sistema con controllore $C_{PIZN}(s)$

L'inadeguatezza del risultato può essere ricondotta all'elevato guadagno del sistema e alla semplicità del metodo Ziegler-Nichols.

3.5.1 MATLAB PID Tuner

Per migliorare il comportamento del controllore $C_{PI}(s)$, si è sfruttato lo strumento PID Tuner, fornito dal software MATLAB, che permette di richiedere una particolare risposta del sistema. Visto la natura del problema, è indispensabile avere un tempo di salita molto ridotto, cercando di avere al contempo una sovralongazione contenuta, per evitare di creare picchi grassi di carburante che andrebbero ad aumentare i consumi e ridurre la risposta del motore.

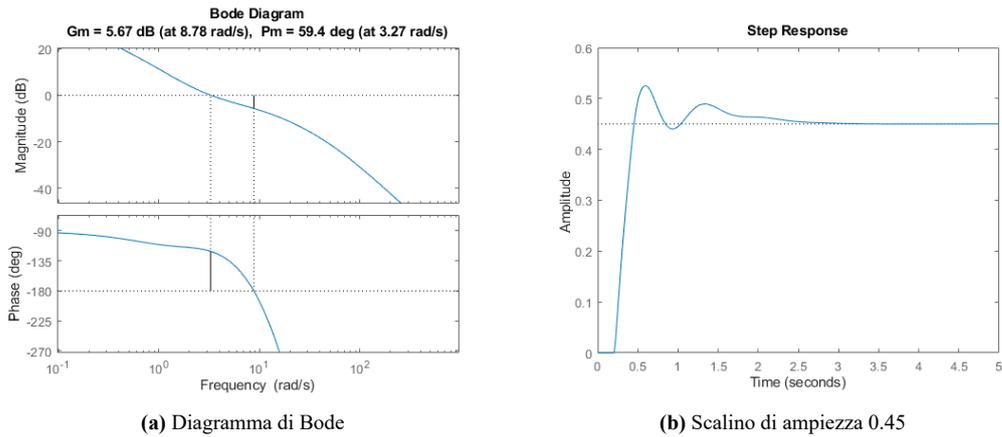


Figura 3.5: Diagramma di bode e risposta al gradino per il sistema con controllore ottimizzato tramite PID Tuner

Sono stati ottenuti così i parametri $K_p = 0.00562$ e $I = 0.01994$.

Sostituendo tali valori nel controllore, il comportamento del sistema migliora notevolmente, riducendo di molto sovralongazione, tempo di salita e tempo di assestamento.

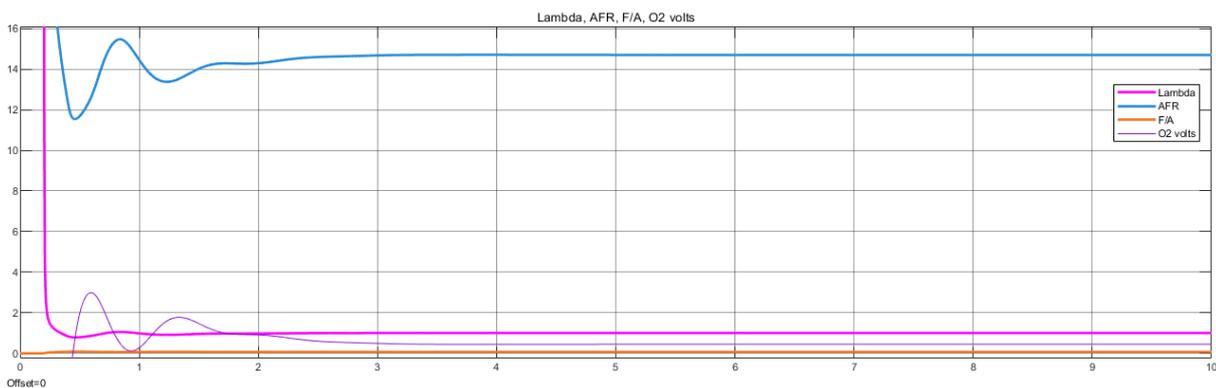


Figura 3.6: Risposta del sistema con approssimazione del sensore tramite $h(u)$

Come mostrato in figura 3.6, il controllore così sviluppato, $C_{PI_t}(s)$, ha ottime prestazioni per il sistema con approssimazione lineare del sensore di ossigeno: mostra una rapida risposta con poche oscillazioni e una sovralongazione contenuta.

Capitolo 4

Valutazione del controllore

Il controllore fin qui sviluppato assume un sensore di ossigeno lineare, è, dunque, necessario valutarne il funzionamento anche su un modello più preciso.

Questa analisi sarà effettuata tramite MATLAB, con una funzione personalizzata, in grado di approssimare il sensore di ossigeno in maniera più accurata rispetto alla linearizzazione precedente.

4.1 Approssimazione del sensore di ossigeno

Per questo sensore non è presente alcuna formula matematica, ma solo dati sperimentali.

La risposta del sensore in questione presenta un'importante proprietà in prossimità del punto di lavoro, facilmente individuabile riportando i punti in un grafico: è, infatti, evidente come la derivata tenda ad infinito.

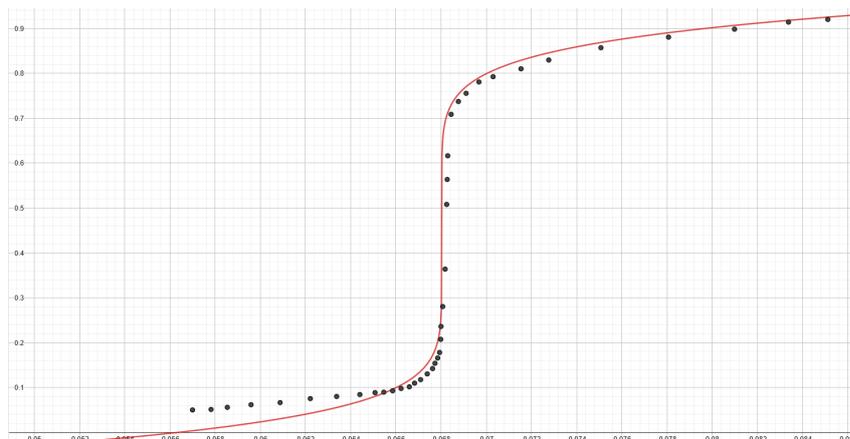


Figura 4.1: In rosso la funzione $h(x)$, in grigio i dati sperimentali del sensore

Per poter ottenere una buona approssimazione è essenziale mantenere questa importante caratteristica. La necessità di rappresentare una derivata infinita rende, perciò, inutilizzabili le comuni approssimazioni tramite funzioni polinomiali.

Per lo stesso motivo è da escludersi anche $\arctan(x)$.

Questa proprietà è, però, presente nelle radici n-esime e, se dispari, sono in grado di rappresentare anche la simmetria rispetto al centro presentata dal grafico del sensore.

La funzione individuata è:

$$h(u) = 0.85 \cdot \sqrt[7]{u - \frac{1}{14.7}} + 0.45 \quad (4.1)$$

Dove u è il rapporto (F/A) dei gas a contatto col sensore.

4.2 Valutazione tramite MATLAB

Per valutare il controllore utilizzando la funzione 4.1 è necessario sviluppare un blocco SIMULINK personalizzato che rappresenti la funzione.

```
function y = root7approx(u)
    y = 0.85 * nthroot(u - 1 / 14.7, 7) + 0.45;
```

Codice del blocco SIMULINK

Il blocco così definito viene inserito nel modello del sistema, sostituendo il guadagno precedentemente utilizzato.

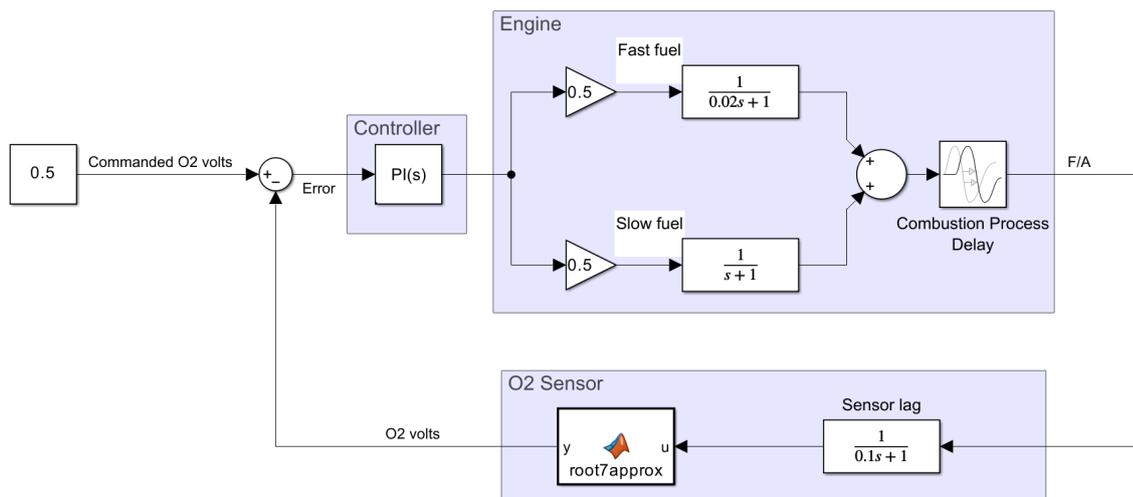


Figura 4.2: Modello a blocchi del sistema con approssimazione del sensore tramite $h(u)$

Il controllore sviluppato in 3.5.1, che presentava ottime prestazioni nel caso del modello lineare, ora presenta un importante andamento oscillatorio.

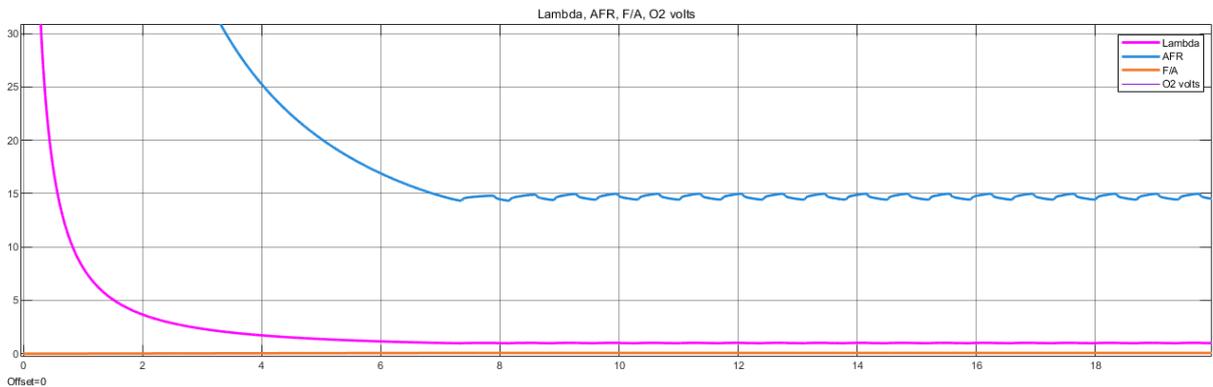


Figura 4.3: Risposta del sistema con approssimazione del sensore tramite $h(u)$

La risposta presentata in Fig. 4.3 non rispetta i parametri di progetto: nonostante riporti oscillazioni contenute e accettabili, presenta un considerevole tempo di assestamento incompatibile con le specifiche.

Per ovviare a questo problema è opportuno modificare i termini del controllore per riportarlo, il quanto più vicino possibile, ai parametri di progetto.

4.3 Controllore modificato

Non avendo a disposizione strumenti in grado di studiare il sistema comprendente la funzione $h(u)$, le nuove costanti del controllore saranno ricercate prima tramite un metodo empirico e, successivamente, in maniera iterativa. Lo scopo di questi nuovi termini è quello di mantenere le escursioni grasso/magro nei valori (AFR) di 17 / 12.

4.3.1 Metodo Ziegler-Nichols in circuito chiuso

È possibile migliorare il controllore sfruttando il metodo Ziegler-Nichols in circuito chiuso che consiste nel trovare manualmente un termine puramente proporzionale in grado di far oscillare in maniera costante il sistema, la frequenza delle oscillazioni è poi utilizzata per calcolare il parametro integrale del controllore.

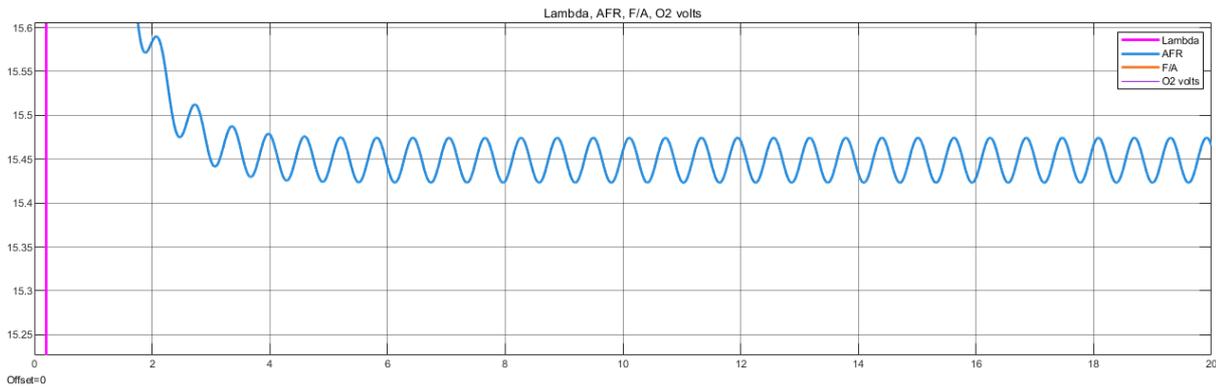


Figura 4.4: Risposta del sistema con $\bar{K}_p = 0.1724925$

Il valore $\bar{K}_p = 0.1724925$ porta ad oscillazioni di ampiezza costante e di periodo $\bar{T} \approx 0.614s$. Secondo il metodo Ziegler-Nichols in circuito chiuso, si ottengono i valori:

$$\begin{aligned} K_p &= 0.45\bar{K}_p = 0.077622 \\ I &= 0.8\bar{T} = 0.4912 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Applicando questi parametri al controllore, si ottiene la seguente risposta:

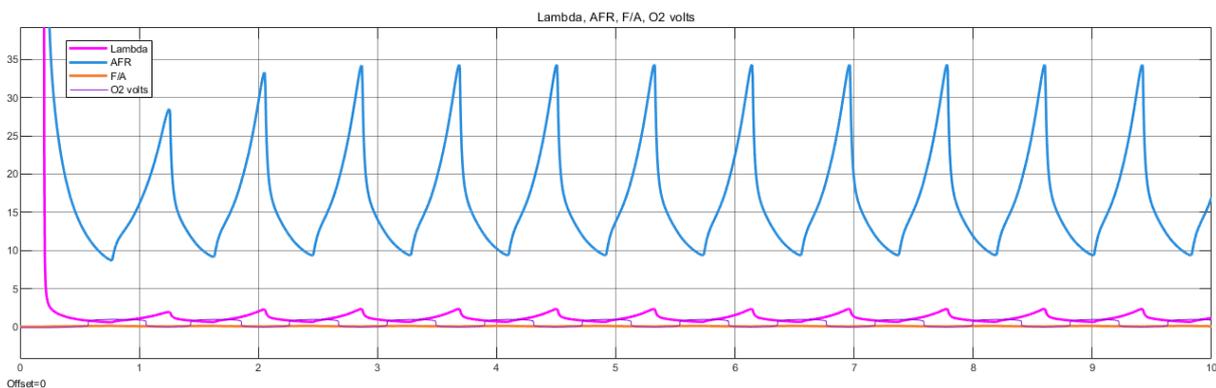


Figura 4.5: Risposta del sistema con $K_p = 0.45\bar{K}_p$ e $I = 0.8\bar{T}$

È facile notare come il comportamento del sistema sia migliorato, ma non sia ancora quello desiderato.

4.3.2 Controllore ottenuto sperimentalmente

Procedendo sperimentalmente alla modifica dei parametri ottenuti in 4.3.1, si individua il controllore $C_s(s)$, avente come parametri $K_p = 0.025$, $I = 0.15$ e un tempo di "assestamento" di $\approx 1.5s$.

Il controllore così ottenuto risulta instabile, ma, a causa della riduzione del guadagno del sensore al discostarsi dal punto di lavoro, le oscillazioni sono contenute in un intervallo limitato di valori.

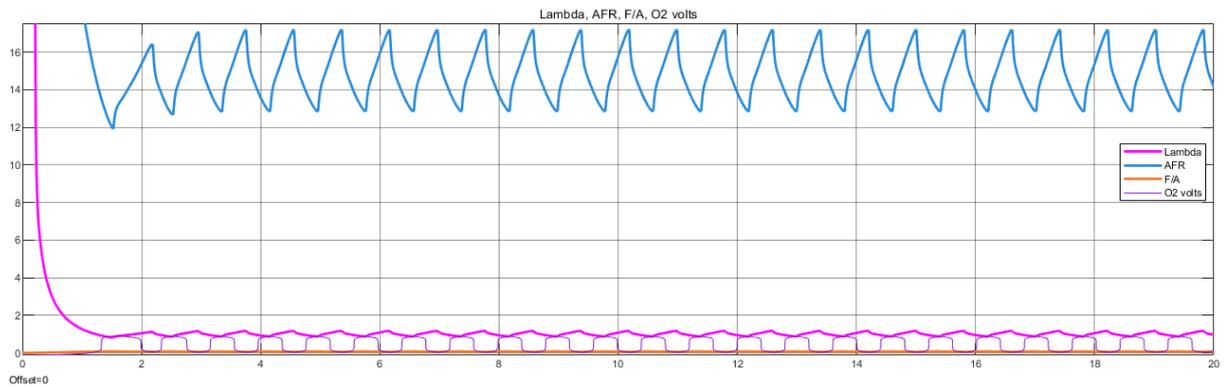


Figura 4.6: Risposta del sistema con controllore ottenuto sperimentalmente

Le escursioni causate da questo controllore non risultano dannose per il motore nelle condizioni considerate e aiutano il catalizzatore nel suo ciclo di accumulo e impiego dell'ossigeno.

Il controllore $C_s(s)$ è, quindi, accettabile per l'impiego del controllo del rapporto aria-carburante nelle condizioni studiate.

Capitolo 5

Un modello più accurato

È possibile migliorare il modello presentato aggiungendo la rappresentazione degli iniettori, precedentemente assunti perfetti.

5.1 Tempi morti e di apertura

Gli iniettori sono composti da un elettromagnete e uno spillo.

Quando viene applicata una differenza di potenziale all'elettromagnete, questo genera un campo elettromagnetico che attira lo spillo e apre il passaggio al carburante.

La fase di carica dell'elettromagnete e l'azione di attrazione dello spillo richiedono del tempo per essere completate.

Con il termine **tempi morti** si intende il tempo necessario a caricare l'elettromagnete, durante questo periodo non viene iniettato carburante.

Il **Tempo di apertura** indica il tempo che trascorre dalla completa carica dell'elettromagnete alla completa apertura dello spillo. Durante questo periodo il flusso del carburante aumenta fino alla completa apertura, dove diventa costante.

I tempi morti possono essere rappresentati come un ritardo, nella forma:

$$DT_{inj}(s) = e^{-s\tau_{inj}} \quad (5.1)$$

Il valore di τ_{inj} varia anche con la tensione applicata ed è caratteristico per ogni iniettore, il valore è solitamente indicato dal produttore. Verrà considerato un tempo morto $\tau_{inj} = 0.5ms$.

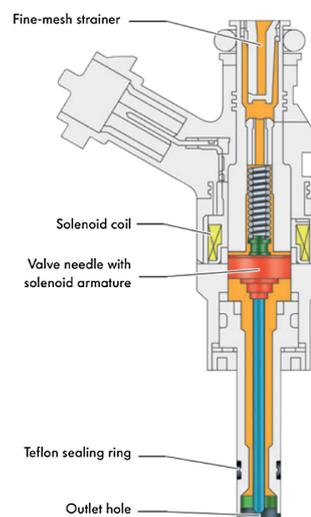


Figura 5.1: Sezione di un iniettore [9]

Anche il tempo di apertura è una proprietà dell'iniettore fornita dal costruttore, solitamente è nell'ordine dei millisecondi.

Si considera un tempo di apertura $\tau_{open} = 1ms$.

Per simulare questo comportamento, si può utilizzare una funzione di "lag":

$$OT_{inj}(s) = \frac{1}{\tau_{open}s + 1} \quad (5.2)$$

Applicando questi blocchi tra il comando del controllore e l'effettivo ingresso, si ottiene il seguente grafico:

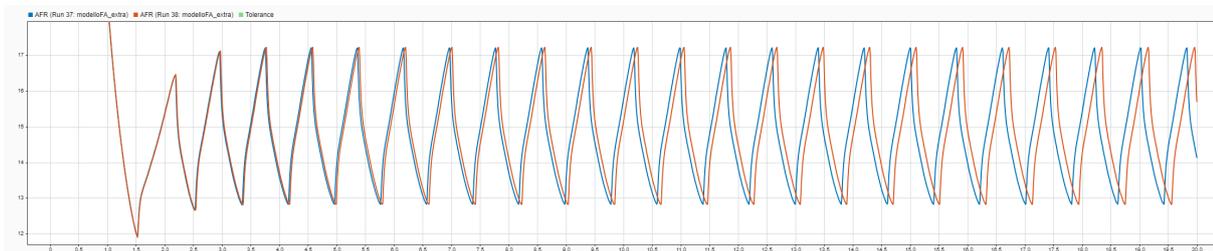


Figura 5.2: In blu la risposta del sistema senza modifiche, in rosso il sistema con i nuovi blocchi

Come si può notare, il sistema continua a rispettare i parametri, presentando solamente un avanzamento della fase.

Il controllore è, quindi, in grado di compensare la non idealità degli iniettori.

5.1.1 Invecchiamento delle componenti

Un aspetto importante che deve essere considerato è l'invecchiamento delle componenti all'interno del motore: un'automobile percorre, durante la sua vita, centinaia di migliaia di chilometri. In questo periodo, il sensore di ossigeno tende a deteriorarsi e a presentare una risposta più lenta. È essenziale, quindi, che il controllore sia in grado di gestire, entro un limite definito, anche queste situazioni. Oltre tale soglia è necessaria la sostituzione del componente per mantenere basse emissioni e garantire il corretto funzionamento del motore.

L'invecchiamento del sensore viene rappresentato aumentando il valore della variabile τ .

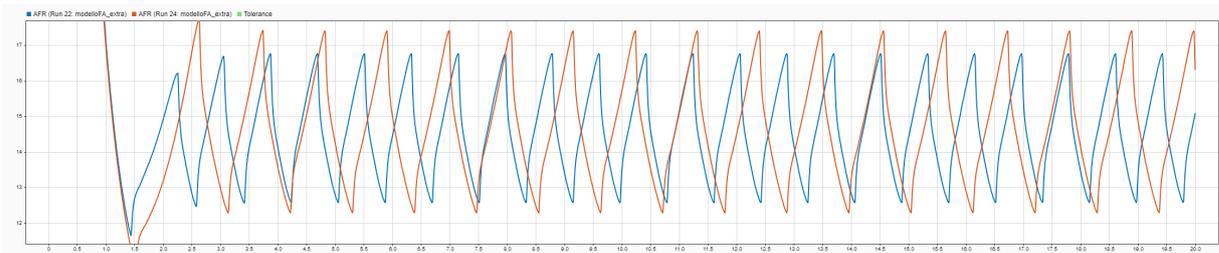


Figura 5.3: In blu il sistema con gli iniettori simulati, in rosso con $\tau = 0.2s$

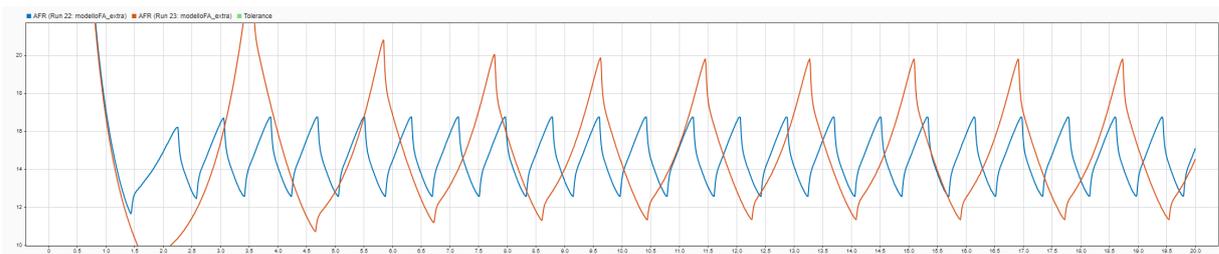


Figura 5.4: In blu il sistema con gli iniettori simulati, in rosso con $\tau = 0.5s$

Nel caso $\tau = 0.5s$ è evidente che effettuando escursioni del rapporto aria-carburante potenzialmente dannose per il motore, il sistema presenti una risposta non accettabile. È, inoltre, osservabile come i periodi magro e grasso siano molto prolungati, questo può portare ad un esaurimento dell'ossigeno immagazzinato nel catalizzatore e, di conseguenza, a un incremento degli agenti inquinanti nei gas di scarico.

Il caso $\tau = 0.2s$ causa, invece, una risposta quasi accettabile, mantenendo il rapporto aria-carburante in un intervallo sicuro per il motore. È comunque evidente come siano peggiorate le prestazioni mostrando una maggiore escursione e una minore frequenza di oscillazione.

In un sistema reale, sarebbe opportuno segnalare al conducente la necessità di sostituire al più presto il sensore di ossigeno già da un valore di $\tau = 0.2s$.

Capitolo 6

Conclusione

In questo elaborato, si è tentato di studiare, attraverso i metodi della linearizzazione, il comportamento di un sistema altamente non lineare.

Il controllore così ottenuto, pur non essendo perfetto, è stato un utile punto di partenza per ricavare, poi, un controllore in grado di gestire il sistema non lineare.

6.1 Valutazione dei risultati

Si è visto come, nel sistema lineare, sia possibile raggiungere un errore a regime nullo. Questo comportamento è da attendersi, data la grossa discrepanza tra il sensore reale e la sua linearizzazione.

Una volta approssimato il sensore tramite la funzione 4.1, il controllore ottenuto con i tradizionali metodi dell'analisi lineare, ha presentato piccole oscillazioni ma lunghi tempi di assestamento, perciò, i parametri del controllore sono stati modificati tramite un processo iterativo. Questo ha permesso di trarre dal sistema una risposta controllata e desiderabile ai fini di ottimizzare le prestazioni del convertitore catalitico.

Successivamente, si è valutata l'efficacia dell'approssimazione degli iniettori: sono stati aggiunti al modello il tempo morto e il tempo di apertura dell'iniettore. L'approssimazione si è rivelata soddisfacente, in quanto non si sono presentate notevoli discrepanze tra i modelli.

È stato, inoltre, studiato il comportamento del sistema in risposta all'invecchiamento dei componenti: il controllore ottenuto si è rivelato sufficientemente robusto per mostrare un comportamento accettabile rispetto a un aumento del 100% del tempo di lettura del sensore di ossigeno.

6.2 Eventuali sviluppi futuri

Per migliorare i transienti, in questo tipo di sistema, sarebbe opportuno includere nel controllo una parte di feedforward. Nei reali controllori applicati ai motori termici questo viene implementato tramite delle tabelle di lookup, dette "mappe motore" che indicano la quantità di carburante teorica da iniettare in base al regime di rotazione e di carico del motore.

La quantità di carburante iniettata è poi ottimizzata attraverso un circuito di feedback per rispondere a variazioni non previste dalle mappe motore.

Un'ulteriore miglioria, applicata nei moderni motori, è l'utilizzo di un sensore UEGO (Universal Exhaust Gas Oxygen sensor): un dispositivo in grado di leggere in maniera quasi lineare la percentuale di ossigeno nei gas di scarico. Questo permette di ottenere un rapporto aria-carburante più preciso e consistente, migliorando emissioni, efficienza e consumi.

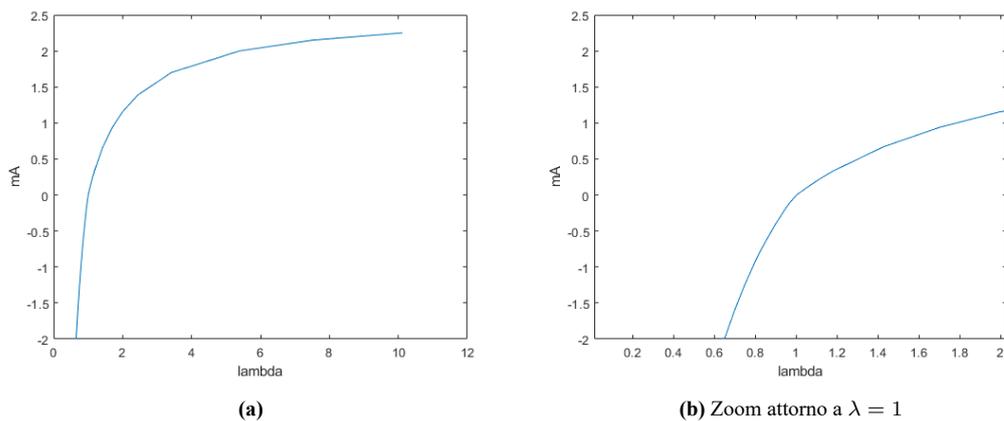


Figura 6.1: Risposta di un sensore di ossigeno di tipo wideband [3]

Un'ulteriore vantaggio di tale sensore è la sua sensibilità a valori di λ anche distanti da $\lambda = 1$, ciò permette al sistema di controllo di monitorare e gestire il rapporto aria-carburante anche in caso di richiesta di miscela grassa o magra, cosa non possibile con il tradizionale sensore narrow band.

Altresi, è possibile utilizzare due sensori di ossigeno, posti rispettivamente, prima (a monte) e dopo (a valle) del catalizzatore. Il compito del sensore a monte è di mantenere la miscela aria-carburante vicina al rapporto stechiometrico, mentre quello a valle viene utilizzato per monitorare lo stato di salute del convertitore catalitico.

Bibliografia

- [1] Ivan Arsie, Cesare Pianese e Gianfranco Rizzo. «IDENTIFICATION OF MANIFOLD TWO-PHASE FUEL FLOW MODEL IN A SPARK IGNITION ENGINE WITH KALMAN FILTER AND LEAST SQUARE METHODS». In: (gen. 2003).
- [2] Bosch. Visitato il: 21 luglio 2024. URL: https://www.boschoffhighway.com/xc/media/ledi/news/download_pdf/2022_01_sensors_ibusiness_en.pdf.
- [3] Bosch. Visitato il: 04 settembre 2024. URL: https://www.bosch-motorsport.com/content/downloads/Raceparts/Resources/pdf/Data%20Sheet_69034379_Lambda_Sensor_LSU_4.9.pdf.
- [4] E.P. Brandt, Yanying Wang e J.W. Grizzle. «Dynamic modeling of a three-way catalyst for SI engine exhaust emission control». In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 8.5 (2000), pp. 767–776. DOI: 10.1109/87.865850.
- [5] Delphine Bresch-Pietri. «Robust control of variable time-delay systems : Theoretical contributions and applications to engine control». In: (dic. 2012).
- [6] User Stahlkocher on de.wikipedia. *Aufgeschnittener metalkatalysator für ein Kfz, valuable earth elements*. Set. 2004. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Aufgeschnittener_Metall_Katalysator_f%C3%BCr_ein_Auto.jpg.
- [7] Abbas Emami-Naeini Gene F. Franklin J. David Powell. «10.4 Control of the Fuel-Air Ratio in an Automotive Engine». In: *Feedback Control of Dynamic Systems (6th Edition)*. 2009.
- [8] Elbert Hendricks et al. «Transient A/F Ratio Errors in Conventional SI Engine Controllers». In: *SAE Transactions* 102 (1993), pp. 1099–1114. ISSN: 0096736X, 25771531. URL: <http://www.jstor.org/stable/44611446> (visitato il giorno 13/08/2024).
- [9] *Relationship between LPG fuel and gasoline injection duration for gasoline direct injection engines*. File: 02-sensor-vs-Voltage.jpg. URL: https://www.researchgate.net/figure/Cross-section-of-gasoline-injector-of-a-Volkswagen-FSI-engine-12_fig4_274405372.

- [10] Ferdinando Taglialatela Scafati et al. «Real Time Control of GDI Fuel Injection during Ballistic Operation Mode». In: *SAE Technical Papers* (set. 2015). DOI: 10.4271/2015-24-2428.
- [11] User Clamothe at Wikimedia Commons. *a Narrowband o2 oxygen sensor voltage vs AFR for a gas engine*. File: 02-sensor-vs-Voltage.jpg. Ago. 2011. URL: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/71/02-sensor-vs-Voltage.jpg>.