



Doctoral Thesis

## Modeling and compensation of the fuel path dynamics of a spark ignited engine

**Author(s):**

Locatelli, Marzio

**Publication Date:**

2004

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004860565> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 15700

# Modeling and Compensation of the Fuel Path Dynamics of a Spark Ignited Engine

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
ZURICH

for the degree of  
Doctor of Technical Sciences  
presented by

MARZIO A. LOCATELLI

Dipl. Masch.-Ing. ETH

born December 9, 1975

citizen of Lugano, TI, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. H. P. Geering, examiner

Prof. Dr. Ph. Rudolf von Rohr, co-examiner

2004

# Abstract

In the last decade, the technical evolution of the combustion engines has reached an high level of growth. This evolution was surely triggered by the increasing restrictions for the emission levels imposed by the governments. The direct consequence of this improvement is an increase in the complexity of the engine management systems, which means an increase of algorithms that have to be parameterized. To cope with this complexity, the current parametrization methods have to be refined. For instance, the implementation of parametrical models based on physical principles can reduce dramatically the time spent on the test-bench to calibrate a specific engine.

This thesis is focused on the modeling of the fuel path dynamics, from the injection of the fuel into the intake manifold up to the measurement of the air/fuel ratio in the exhaust, for a Port Fuel Injected engine (PFI engine). The main dynamics which are present in the fuel path are the wall wetting dynamics and the exhaust gas dynamics. They represent the storage and evaporation of fuel in the intake manifold, and the mixing of the fuel vapor in the cylinder and in the exhaust. On one hand, the goal is to obtain a model with a simple structure (control-oriented modeling) and based on few tunable parameters, so that it can be implemented easily in a standard engine management system. On the other hand, the obtained model has to cover the whole operating

region of an engine, including the operating condition which can only occur by particular unexpected events.

The investigation is conducted on a single cylinder of a V6 engine. To estimate the fuel mass in the cylinder, a continuous air/fuel ratio meter is used, which is mounted very near to the exhaust valves. In addition to this sensor, a very fast NO measurement device is used in the same spot to calibrate the model of the exhaust gas dynamics. The optimal placement of these sensors is investigated by means of a preliminary study of the fluid waves in the exhaust.

Firstly, all the dynamics which are adjacent to the wall wetting are investigated, namely, the intake manifold dynamics, the exhaust gas dynamics, and the sensor dynamics. To identify the parameters of the model of the exhaust gas dynamics, i.e., everything that occurs between cylinder and sensor, a linear approach is chosen. This model can be treated separately without disturbing the wall wetting dynamics with the NO device, because the system can be excited maintaining a constant air mass flow and a constant fuel mass flow. As additional result of this method, the residual gas fraction can be estimated. At this point of the investigation, the effects of the wall wetting system can be measured without interferences.

Secondly, the model structure of the wall wetting dynamics is built on the basis of the phenomenon of physics known as forced convection with phase change. The model is separated into two main blocks: the evaporation of the droplets, and the evaporation of the wall film. The combination of these models describes the nonlinear wall wetting dynamics, i.e., everything that occurs to the fuel upstream the cylinder.

The parameters of the wall wetting model are identified by means of off-line optimizations and the Kalman filtering technique is used to produce an observer and an on-line estimator.

The obtained model and the observer are used as basis for the wall wetting compensator with two different approaches. In the first approach, the parameters of a linear compensator are calculated on the basis of the model and used with a LPV technique. The other approach implies the use of the observed value of the evaporation mass in the cylinder to calculate the fuel mass to be injected.

The results of the compensator show that the use of the LPV method yields the best results. The compensator is able to cope with difficult operating conditions, like those represented by warming-up engine temperatures, as happens during the first phase after a cold start of the engine.

# Riassunto

Nell'ultima decade, l'evoluzione tecnologica dei motori a combustione interna ha raggiunto un notevole livello di crescita. Questa evoluzione é stata sicuramente incoraggiata dalle crescenti restrizioni imposte dai governi in materia di livelli massimi di emissioni. La conseguenza diretta di questo miglioramento e senz'altro l'aumento di complessità dei sistemi di gestione elettronica, il che comporta un aumento del numero di algoritmi da parametrizzare. Per potersi mantenere al passo con questa complessità, i metodi di ottimizzazione esistenti devono essere migliorati. Per esempio, utilizzando dei modelli parametrici basati su eventi fisici in modo da ridurre sensibilmente il tempo necessario al banco prova per calibrare un motore specifico.

Il tema principale di questa tesi é la modellazione delle dinamiche relative al percorso del carburante, dalla sua iniezione alla misurazione del rapporto di miscela nello scarico, per un motore multi-point (PFI engine). Le principali dinamiche che influenzano il percorso del carburante sono il film bagnato (wall wetting) e la dinamica dei gas di scarico. Esse rappresentano l'effetto di stoccaggio e di evaporazione del combustibile, e una miscelazione dei vapori del combusto all'interno del cilindro e dello scarico. Lo scopo finale é lo sviluppo di un modello con una struttura semplice (modellazione orientata al controllo) ma basato su pochi parametri adattabili, così che possa coprire tutto lo spettro di fun-

zionamento del motore (inclusi i tagli di alimentazione). I requisiti per il modello sono dunque di compromesso. Da una parte il sistema deve mantenere una struttura semplice con pochi parametri da identificare, d'altra parte il modello deve riprodurre adeguatamente il sistema non lineare nei punti di difficile misurazione.

Lo studio é condotto su di un singolo cilindro di un motore 6 cilindri a V. Per stimare la massa di carburante presente nel cilindro, si utilizza un sensore  $\lambda$  continuo montato molto vicino alle valvole di scarico. Oltre a questo sensore ci si avvale di un apparecchio di misurazione rapida di NO per ottimizzare il modello per la dinamica dello scarico. Il piazzamento ottimale di questi sensori é oggetto di uno studio preliminare sui flussi nel condotto di scarico.

Come prima cosa sono studiate tutte le dinamiche adiacenti al film bagnato, ovvero la dinamica del condotto d'aspirazione, la dinamica dei gas di scarico, e la dinamica del sensore  $\lambda$ . Per identificare i parametri del modello della dinamica dei gas di scarico, ovvero tutto quello che succede tra il cilindro e il sensore, é stato scelto un approccio lineare. Questo modello puo essere trattato separatamente senza disturbare la dinamica del film bagnato grazie al sensore di NO, perché il sistema puo essere eccitato mantenendo costanti la massa d'aria e di benzina nel cilindro. Come risultato aggiuntivo, la frazione di gas residui nel cilindro puo essere stimata. A questo punto del lavoro, gli effetti della dinamica del film bagnato possono essere misurati senza interferenze.

Come seconda cosa la struttura della dinamica del film bagnato é stata costruita sulla base del fenomeno fisico conosciuto come convezione forzata con cambiamento di fase. Il modello é separato in due blocchi principali: l'evaporazione delle gocce, e l'evaporazione del film bagnato. La combinazione di questi due blocchi descrive la dinamica complessa del film bagnato, ovvero tutto quello che succede al combustibile a monte del cilindro.

I parametri del modello del film bagnato sono stati stimati grazie ad ottimizzazioni e alle tecniche basate sul filtro di Kalman.

Per identificare i parametri del modello dei gas di scarico, ovvero tutto ciò che succede tra cilindro e sensore, è stato scelto un approccio lineare. Si è potuto identificare questo modello separatamente perché, grazie agli esperimenti sull'angolo di anticipo, è stato possibile eccitare il sistema senza disturbare la dinamica del film bagnato. Come risultato accessorio, la frazione di gas residui può essere stimata.

A questo punto dello studio gli effetti del sistema del film bagnato possono essere misurati senza interferenze per mezzo di ottimizzazione off-line e con tecniche basate sui filtri di Kalman.

Il modello così ottenuto e il suo osservatore sono stati utilizzati come base per il compensatore del film bagnato grazie a due approcci differenti. Da una parte, i parametri di un compensatore lineare sono calcolati e utilizzati con una metodologia di tipo LPV (Linear Parameter Varying). L'altro metodo implica l'uso del valore stimato della massa evaporata verso il cilindro per calcolare la massa di benzina da iniettare.

I risultati ottenuti con il compensatore mostrano che il metodo LPV dà i risultati migliori. Il compensatore è in grado di lavorare in condizioni operative rappresentate da temperature del motore crescenti, ovvero durante la prima fase dopo l'accensione a freddo del motore.