



Universidad Michoacana De San Nicolás De Hidalgo



Facultad de ingeniería eléctrica
División de estudio de posgrado

**“Diseño de un control no lineal para la mezcla aire-combustible
en un motor de combustión interna mediante regulación por
retroalimentación del error”**

Tesis

Que para obtener el título de:
Maestro en ciencias en ingeniería eléctrica

Presenta:
Miguel Angel Mancilla Morelos

Director de Tesis:
Dr. Juan Anzures Marín

Co-Director de Tesis:
Dr. Cuauhtémoc Acosta Lúa

Morelia, Michoacán, Mayo 2012

Agradecimientos.

El agradecimiento es a Dios, que me dio la vida, a la vida que me dio la oportunidad mediante.

Mis padres Miguel y Guadalupe, quienes siempre me han apoyado y motivado en todos mis proyectos incondicionalmente.

Todos mis amigos, compañeros y maestros del posgrado de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, que formaron parte de esta aventura y siempre estarán en mis recuerdos.

Betty por estar siempre a mi lado e inspirarme todos los días.

Todas aquellas personas que sin esperar nada a cambio compartieron pláticas, conocimientos, experiencias y buenos momentos.

El Dr. Juan Anzures por guiarme en la elaboración de la tesis así como por su confianza, apoyo y sus consejos.

La División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por ser mi casa de estudio durante este episodio de mi vida estudiantil.

El Dr. Puauhtémoc Acosta, por su confianza, su paciencia, sus observaciones, su motivación y apoyo.

El consejo Nacional de ciencia y tecnología por haber apoyado económicamente mis estudios de maestría.

Resumen

En la presente tesis se estudia el funcionamiento de un motor de combustión interna (MCI) desde el punto de vista del control, para esto se desarrolla un modelo no lineal constituido por 4 bloques principales que determinan el funcionamiento básico del motor, considerando: admisión de aire, la dinámica del combustible así como la generación de torque y velocidad, todo esto implementado y simulado en Simulink®. A partir de estos elementos se obtiene una expresión que describe el comportamiento de la mezcla aire-combustible que entra al cilindro del MCI para participar en la combustión y en ésta centraremos la atención y diseñaremos una estrategia de control que mantenga la variable lo más cercano a la referencia. La calidad de la mezcla determinará el rendimiento energético del motor, así como las emisiones contaminantes a la atmósfera; por lo que es importante mantener su concentración en un valor óptimo.

Se ha desarrollado un modelo matemático, en el cual se involucran los aspectos más importantes en la formación de la mezcla. Para su análisis, el sistema se ha estructurado en espacio de estado considerando cinco estados que son: cantidad de aire disponible en el múltiple de admisión, flujo de combustible, cantidad de combustible dentro de la cámara de combustión, velocidad angular en el cigüeñal y relación aire-combustible. Se analiza la estabilidad de la planta mediante el método indirecto de estabilidad de Lyapunov, y a partir de ésta, se diseña e implementa la estrategia de control mediante una regulación por retroalimentación del error. La operación de un MCI continuamente se encuentra sometida a cambios en la aceleración debido a las necesidades de manejo del conductor, por lo que un sistema convencional de control no es capaz de evitar las desviaciones del valor de referencia de manera precisa, la concentración de la relación aire-combustible debe seguir un valor de referencia establecido lo más cercano a 14.7 partículas de aire por cada partícula de combustible [Evlampiev, 2007, Yacoub 1999]. El desarrollo de estrategias de control no lineal para dosificar la cantidad de combustible inyectado permite una regulación de la concentración aire-combustible cercano al valor estequiométrico, evitando desviaciones ante perturbaciones en el sistema.

Para validar el modelo del motor de combustión interna, así como regulación y comportamiento de la estrategia de control, se proponen distintos patrones de aceleración en donde los resultados de la estrategia de control aplicada son bastante satisfactorios, reduciendo las desviaciones a cero.

Abstract

In this thesis we study the operation of an internal combustion engine (ICE), developing a nonlinear model consisting of 4 main blocks that determine the basic operation of the engine. The following variables are analyzed: air intake, fuel dynamics, torque generation and speed, all implemented and simulated in Simulink [®] software.

From these variables we obtain an expression that describes the behavior of the fuel-air mixture entering the cylinder from an ICE to be a part in the combustion process. This air-fuel ratio is our main focus point and we will design a control strategy based on this variable, that keeps the mixture close to the reference. The quality of the mixture will determine the energy efficiency of engine and emissions into the atmosphere, therefore it is very important to keep the relationship on a stoichiometric value.

We have developed a mathematical model, which involves the most important aspects in the formation of the mixture. In order to test the system, a state space representation was considered, with the following state variables: available amount of air in the intake manifold, fuel within the combustion chamber, the angular velocity of the crankshaft and air-fuel ratio.

We analyze the stability of the plant by means of the second Lyapunov stability criterion, and based on this concepts, a control strategy is designed and implemented through a feedback regulation of the error, minimizing the deviations of the lambda value with respect to the reference.

The operation an ICE is constantly changing due to the driving behavior of the pilot, therefore a conventional control system is unable to prevent deflections of the reference value accurately, the concentration of the air-fuel ratio must follow a reference value close to 14.7 air particles per fuel particle. [Evlampiev, 2007], [Karmiggelt, 1998].

The development of non linear control strategies to manage the amount of injected fuel allows a regulation in the air-fuel mixture concentration that is close to the stoichiometric value, avoiding deviations in the presence of system perturbations.

In order to validate the proposed internal combustion engine model, and the regulation and robustness of the control strategy, different acceleration patterns are used (deviations in the throttle angle) where the results of the proposed control strategy are satisfactory, reducing the deviations to zero.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Problema a resolver	3
1.1.1. Mezcla estequiometrica.	4
1.2. Estado del arte	5
1.3. Objetivos	7
1.3.1. Objetivo general	7
1.3.2. Objetivos particulares:	7
1.4. Motivación	7
1.5. Aportaciones	8
1.6. Publicaciones	9
1.7. Organización de la tesis	9
2. Subsistemas automotrices	11
2.1. Introducción.	11
2.2. Motor de Combustión Interna (MCI)	11
2.3. Combustión	12
2.4. Estructura de un MCI	13
2.4.1. Cigüeñal	14
2.4.2. Pistón	14
2.4.3. Anillos	15
2.4.4. Válvulas	15
2.4.5. Bielas	16
2.4.6. Árbol de levas	16
2.4.7. Cuerpo de aceleración	16
2.4.8. Múltiple de admisión	16
2.4.9. Sistema de inyección	17

2.4.10.	Sistema de encendido	17
2.4.11.	Sistema de lubricación	18
2.5.	Ciclo Otto	18
2.5.1.	Admisión	19
2.5.2.	Compresión	20
2.5.3.	Fuerza	20
2.5.4.	Escape	20
2.6.	Sensores automotrices	20
2.6.1.	Sensor de temperatura (ECT)	21
2.6.2.	Sensor de temperatura del aire (IAT)	21
2.6.3.	Sensor del cigüeñal (CKP).	22
2.6.4.	Sensor de la posición del acelerador (Tps)	22
2.6.5.	Sensor de presión en el múltiple de admisión (MAP)	22
2.6.6.	Sensor de oxígeno (Lambda)	23
2.7.	Actuadores automotrices	23
2.7.1.	Bobina de encendido.	23
2.7.2.	Inyector	24
2.7.3.	Válvula de marcha mínima	25
2.8.	Unidad de Control Electrónica (ECU)	25
2.9.	Mezcla aire-combustible	26
2.10.	Funcionamiento de un MCI	26
3.	Modelado matemático	29
3.1.	Introducción	29
3.2.	Modelo de valor medio	30
3.3.	Consideración para el modelado	31
3.4.	Flujo del aire de admisión	31
3.5.	Flujo del combustible de admisión	34
3.6.	Dinámica del torque en un MCI	36
3.7.	La velocidad en un MCI	37
3.8.	Relación de la mezcla aire-combustible	38
3.9.	Modelo en espacio de estados	39
3.9.1.	Modelado de un MCI en espacio de estado	40

4. Diseño de Control	45
4.1. Análisis de estabilidad	45
4.1.1. Estabilidad asintótica global	48
4.2. Región de atracción	49
4.3. Estabilidad de Lyapunov	49
4.4. Diseño de la referencia	51
4.4.1. Concentración estequiométrica	53
4.5. Solución del problema	54
4.5.1. Señal de control propuesta	58
4.6. Implementación del control	59
5. Resultados	61
5.1. Resultados en simulación	61
5.2. Sistema regulado	69
5.3. El error	72
6. Conclusiones	73
6.1. Trabajo futuro	75
A. Nomenclatura	77
A.1. Parámetros de modelado	81
B. Diagramas Simulink	83
B.1. Admisión de aire.	83
B.2. Inyección de combustible.	85
B.3. Torque y Velocidad	85
B.4. Relación Aire-combustible	86
B.5. Modelo del MCI	88
B.6. Imlementación de control	89

Índice de figuras

2.1. Proceso de combustión.	13
2.2. Cigüeñal [Asencio, 2010].	14
2.3. Estructura de un MCI.	15
2.4. Sistema de admisión [Nevot, 1999].	17
2.5. Inyección Monopunto y Multipunto [Nevot, 1999].	18
2.6. Motor de combustión interna MCI [Asencio, 2010]	19
2.7. Ciclo Otto en un MCI [Nevot, 1999].	21
2.8. Sensor de Oxígeno	24
2.9. El inyector Automotriz.	25
2.10. Funcionamiento del MCI	27
4.1. Influencia aire-combustible y emisiones contaminantes [Weaver 1993].	52
5.1. Secuencia de aceleración Tps1.	62
5.2. Flujo de combustible en el cilindro \dot{x}_2 Tps1.	63
5.3. Flujo de aire en el múltiple de admisión \dot{x}_3 Tps1.	63
5.4. Velocidad angular \dot{x}_4 Tps1.	64
5.5. Torque generado en el cigüeñal Tps1.	64
5.6. Aceleración angular \ddot{x}_4 Tps1.	65
5.7. Relación aire-combustible \dot{x}_5 Tps1.	65
5.8. Secuencia de aceleración Tps2.	66
5.9. Caudal de combustible \dot{x}_2 Tps2.	66
5.10. Flujo de aire en el múltiple de admisión \dot{x}_3 Tps2.	67
5.11. Velocidad angular \dot{x}_4 Tps2.	67
5.12. Torque generado en el cigüeñal Tps2.	68
5.13. Aceleración angular \ddot{x}_4 Tps2.	68
5.14. Relación aire-combustible \dot{x}_5 Tps2.	69

5.15. Regulación Afr \dot{x}_5 Tps1.	69
5.16. Regulación de Afr \dot{x}_5 Tps1.	70
5.17. Regulación de Afr \dot{x}_5 Tps2.	70
5.18. Regulación de Afr \dot{x}_5 Tps2.	71
5.19. Regulación de Afr \dot{x}_5 Tps2.	71
5.20. Error Tps1	72
B.1. Función Tc	83
B.2. Función PRI	84
B.3. Modelo del Aire de Admisión en un MCI.	84
B.4. Modelo del Combustible en un MCI.	85
B.5. Modelos de torque y velocidad en un MCI.	85
B.6. Modelo de la relación Aire Combustible en un MCI.	86
B.7. Modelo de un MCI en Simulink	88
B.8. Implementación del control por regulación de error.	89

Capítulo 1

Introducción

Un objetivo importante de la industria automotriz es el de lograr desarrollos competitivos rentables y seguros. Para cumplir con esta tarea, se han implementado dispositivos electrónicos en casi todos los módulos de un vehículo, como sensores, actuadores y unidades lógicas programables [Gerasimov, 2010]. El uso generalizado de la electrónica en los vehículos modernos ha venido en aumento y en la actualidad la evolución que presentan los automóviles es del 70 % en carácter electrónico o computacional, dado que estas herramientas brindan la posibilidad de cubrir las exigencias de la conducción actual, así como el confort y seguridad a los tripulantes. En el pasado, la industria automotriz se enfocó en incrementar la velocidad, torque, aceleración y potencia del vehículo, sin tomar en cuenta las emisiones contaminantes a la atmósfera. Debido a la problemática de contaminación, uno de los principales objetivos es el mejorar la eficiencia energética, reducir emisiones contaminantes y alargar la vida útil en un motor de combustión interna [Bonnick, 2001]. Se pueden mejorar considerablemente estos tres aspectos si se logra trabajar con una combustión completa. Una combustión completa es aquella en la que la sustancia combustible alcanza el máximo grado posible de oxidación, Para lograr una combustión completa se requiere que la mezcla de aire y combustible mantenga una relación estequiométrica [Evlampiev, 2007, Aquino, 1981, Aström, 1989], es decir que la concentración de aire y combustible se mantenga en una proporción de 14.7:1.

El subsistema esencial en el funcionamiento de un vehículo es el motor de combustión interna (MCI) en el que se presenta la conversión de energía química en trabajo mecánico para producir el movimiento, potencia y las prestaciones de un vehículo.

El motor de combustión interna utiliza para su funcionamiento una mezcla de aire-combustible, a partir de ésta transforma energía química en energía mecánica mediante el ciclo termodinámico conocido como ciclo Otto. Este ciclo trabaja basado en la energía liberada por la combustión de la mezcla formada por el aire y el combustible, dicha combustión tiene como objetivo producir trabajo mecánico; sin embargo, en la combustión se generan residuos químicos perjudiciales para los seres vivos y el medio ambiente [Copp, 1998, Pushkaraj, 2005].

La estequiometría (del griego στοιχειον, stoicheion, 'elemento' y μετρον, métrón, 'medida') es una rama de la química que se centra en el cálculo de relaciones cuantitativas entre los reactivos en el transcurso de una reacción química. Estas relaciones se pueden deducir a partir de la teoría atómica [Shamdani, 2008].

La necesidad de trabajar con una mezcla estequiométrica, lleva a desarrollar mecanismos dosificadores de combustible, los cuales requieren de un control que nos permita mantener la relación aire-combustible en el valor estequiométrico deseado, el control debe considerar las condiciones de operación del MCI y ser capaz de medir de forma precisa y oportuna las variaciones en la entrada del aire para lograr actualizar la cantidad de combustible a inyectar por medio de una estrategia de control en forma oportuna y es en el modelado de este control donde se centra la atención de la presente tesis.

La estructura y dinámica dentro de un MCI son de naturaleza no lineal por lo que un sistema de control lineal no satisface nuestras necesidades y entonces se tienen dos posibilidades para diseñar y aplicar un adecuado sistema de control, una contempla la linealización del modelo del MCI y aplicar estrategias lineales de control o bien la segunda es utilizar el modelo no lineal del MCI y desarrollar un sistema de control no lineal para mantener los parámetros de la mezcla aire-combustible dentro de un rango deseado sin perder generalidad de nuestra planta [Larses, 2005, Vachtsevanos, 1993].

Para estudiar la dinámica de un MCI, se requiere de un modelo matemático con el que se pueda experimentar sin riesgos físicos, el modelo utilizado en esta tesis contempla de manera simplificada las dinámicas más importantes en el desempeño de un automotor, observándose tres bloques principales que son: la admisión de aire, la inyección de combustible y el par generado. Para lograr mantener la relación aire-combustible en los valores deseados es necesario implementar una estrategia de control no lineal, estructurando el modelo en espacio de estados. En este trabajo se contemplaron cinco estados que son: combustible en el cilindro \dot{m}_{fc} y \ddot{m}_{fc} , aire en el múltiple de admisión \dot{m}_a , velocidad angular del cigüeñal $\dot{\omega}_e$, y relación aire

combustible A_{fr} , para posteriormente analizar la estabilidad de la planta mediante el segundo criterio de Lyapunov y desarrollar una estrategia de control no lineal, denominada regulación por retroalimentación del error [Khalil, 1996].

1.1. Problema a resolver

Se conoce como relación aire-combustible a la razón de la masa de aire y la masa de combustible, cuando en una mezcla se tienen 14.7 partículas de aire por cada una de las partículas de combustible (gasolina), se dice que la mezcla tiene una concentración estequiométrica y se asigna la letra griega Lambda (λ) para determinar la concentración de la mezcla. Se conoce como mezcla rica aquella que tiene exceso de combustible ($\lambda < 1$) y como mezcla pobre a la mezcla que presenta una falta de combustible ($\lambda > 1$) [Jakobsson, 2007].

Los motores de combustión interna producen principalmente tres elementos como residuos de la reacción química que origina la combustión y que son nocivos al medio ambiente: Hidrocarburos (HC) sin quemar en la combustión, monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO_x) [Evlampiev, 2007], los cuales representan una fuente de contaminación atmosférica en el mundo. Cabe mencionar que ésta ha ido en aumento en los últimos años por lo que es una necesidad ambiental imponer límites a la cantidad y calidad de las emisiones contaminantes emitidas a la atmósfera por los vehículos de motor de combustión interna.

Ante la necesidad de reducir las emisiones contaminantes, se busca quemar en su totalidad los hidrocarburos contenidos en el combustible, dado que en la operación de un vehículo, el conductor realiza continuamente cambios en la aceleración del motor. Al acelerar, se modifica el ángulo alfa (α), lo que incrementará el flujo de aire en la entrada del múltiple de admisión, esto causa que la relación aire-combustible cambie aumentando las emisiones contaminantes y la pérdida energética. Entonces ante cada cambio de (α) el controlador debe de estimar el nuevo flujo de aire así para determinar la cantidad de gasolina requerida en la operación del motor, esto con el fin de lograr que se lleve a cabo una combustión completa. Se busca que la duración y magnitud de las desviaciones del valor lambda sean lo más pequeñas posibles [Chee, 2009].

Cuando se tiene una mezcla rica, se incrementan las emisiones contaminantes a la atmósfera de hidrocarburos sin quemar (HC), monóxido de carbono (CO). Por

otro lado, cuando se trabaja con una mezcla pobre se produce más del 50 % de óxido de nitrógeno (NO_x). Debido a esto se debe trabajar con la cantidad estequiométrica entre aire y combustible.

Para mantener un valor estequiométrico de la mezcla aire-combustible, es necesario diseñar un sistema de control que determine la cantidad de aire existente en el múltiple de admisión en forma precisa y que sea capaz de suministrar el combustible requerido de manera oportuna. Ante la necesidad para mejorar la dosificación del combustible se sustituye el carburador por una serie de electroválvulas comandadas por un microcontrolador que nos permitan una mejor dosificación del combustible. Ante el desarrollo y evolución de los microcontroladores fue posible implementar algoritmos sofisticados de control para que los sistemas de inyección sean capaces de mejorar la relación aire-combustible cerca de un valor deseado y alcanzar una combustión completa [Chee, 2009, Gäfvert, 2003].

El diseño y el modelado de motores, así como de sus estructuras de control son ampliamente utilizadas en simulación, esto con la finalidad de realizar pruebas, rediseño y mejoras en los sistemas, sin correr el riesgo de dañar el motor. Por lo tanto el modelo de un motor debe de ser realizado cuidadosamente y validado para que se comporte lo más apegado a la realidad y así tener veracidad en los experimentos realizados [Chee, 2009].

1.1.1. Mezcla estequiometrica.

Las principales ventajas de trabajar el MCI con una mezcla aire-combustible estequiometrica son:

De carácter ecológico, al conseguir una mezcla estequiometrica entre las partículas de aire y las del combustible, se garantiza una combustión completa, es decir una oxidación total de combustible en la operación del MCI, con lo que se reduce significativamente el contenido de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno en las emisiones al medio ambiente.

De carácter económico, al extraer el máximo contenido energético del combustible en una combustión completa, se obtiene un aumento en la eficiencia del MCI, lo que implica un menor consumo y ahorro de combustible.

1.2. Estado del arte

El automóvil de motor de combustión interna ha sido el principal medio de transporte por más de un siglo. Durante mucho tiempo el desarrollo de esta fuente de energía mecánica, se centró en aumentar su potencia y confiabilidad, sin embargo en las últimas décadas su desarrollo se ha enfocado a reducir las emisiones contaminantes en la atmósfera, así como mejorar el rendimiento energético; lo que ha traído como resultado la implementación de un convertidor catalítico, variación en el tiempo de encendido, sistemas de inyección sofisticados entre otros [Pushkaraj, 2005].

Uno de los primeros documentos que tratan la necesidad de un sistema de control para la inyección en un motor de combustión interna fue [Chernyak, 1987, Athans, 1978], posteriormente surgieron [Cho, 1989, Dobner, 1980, Hedricks, 1990, Moskwa, 1992], en los que proponen modelos matemáticos de un motor de combustión interna orientados a aplicaciones de control.

Las características de los sistemas de inyección han sido mejoradas continuamente, desde la estructura como geometría del múltiple de admisión, hasta la cantidad y ubicación de inyectores, además se han incorporado sistemas de regulación mediante microcontroladores comunicados con un conjunto de sensores, los cuales le informan las condiciones de manejo del vehículo para que éste determine mediante un algoritmo de control la cantidad necesaria de combustible a inyectar [Lukanin, 2005, Kolchin, 2003, Vyubov, 1983, Heywood, 1988].

Se pueden distinguir tres etapas en la evolución del control de inyección electrónica para un motor de combustión interna [Gerasimov, 2010].

La primera se dio entre los años de 1960 y 1980, caracterizada por el uso de microcontroladores y por la construcción de un sistema de control de lazo abierto, basado en características estáticas del motor, utilizando tablas para determinar la cantidad de combustible necesario en la operación del vehículo. Estos sistemas requerían de una calibración experimental para ajustar los parámetros utilizados en las tablas, además presentaron un pobre desempeño en regímenes transitorios ya que no se tenía retroalimentación de las variables de control. Otro problema fue la ausencia de dispositivos precisos para la medición de flujo de aire en la época. [Kolchin, 2003, Heywood, 1988, Krutov, 1989, Cho, 1989, Dobner, 1980, Moskwa, 1992].

La segunda etapa está comprendida en los inicios de los años 80's y se caracterizó por la implementación del sensor lambda para formar un lazo de retroalimentación basado en métodos de la teoría clásica de control, surgieron modelos linealizados del

MCI que incluían parámetros obtenidos de forma empírica sin considerar condiciones de operación ni complejidad del MCI. El sensor lambda retroalimenta al sistema de control la información acerca de la cantidad de oxígeno en los gases de escape provenientes de la combustión, y nos permite regular con buena precisión la concentración de la mezcla aire-combustible que entra a la cámara de combustión. La principal ventaja de este sistema de control fue la capacidad para generar una señal a partir de la diferencia entre el valor deseado y el medido por la sonda lambda. El valor deseado está dado por la relación estequiométrica necesaria para lograr una combustión completa y de esta relación dependerá el tipo de combustible con el que se trabaje [Gerasimov, 2010, Onder, 1993, Powel, 1998, Arsie, 2001].

La tercera etapa inicia a principios de los años 90's, y se caracteriza por la construcción de controladores en lazo cerrado adaptivos y autosintonizados donde ya se cuenta con extensos estudios acerca de controles robustos, redes neuronales enfocadas al control de los sistemas de inyección. Estos métodos permiten un control flexible y algoritmos de identificación que toman en cuenta la dinámica compleja de un MCI. Los modelos matemáticos no lineales utilizados consideran la complejidad del MCI con variación de parámetros, reflejan de una manera más apegada a la realidad en el funcionamiento de un motor, lo que ha contribuido a el desarrollo de algoritmos de control cada vez más eficientes[Arsie, 2001, Jankovic, 2002, Moraal, 2001, Park, 2003, Turin, 1994].

Como referencia en [Nevot, 1999] propone un control basado en redes neuronales. En [Kyu, 2001] implementa un control de modos deslizantes para reducir las emisiones contaminantes a la atmósfera. En [Pushkaraj, 2005] se linealiza el modelo matemático del motor de combustión interna y aplica un control PID. En [Chee, 2009] se utiliza el toolbox difuso de Matlab para mantener la relación aire-combustible en el valor deseado. En [Ghaffari, 2008] se trabaja con un control difuso adaptivo y en [Shamdani, 2008] se aplica control difuso para el control en un motor turbocargado a diesel.

En [Wu 2011] se estudia la evolución y complejidad del MCI, contemplando subsistemas e integrándolos para diseñar un control PID que mejore la eficiencia del motor tales subsistemas son: optimización en la geometría del cuerpo de admisión, sincronía en las válvulas, dosificación de combustible, sincronización en la inyección, inyección múltiple, recirculación de los gases mediante la válvula EGR.

En [Zhai 2011] desarrollan un control predictivo, basado en redes neuronales enfocado a la relación aire-combustible, el cual tiene la ventaja de ser en control adaptivo

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

El objetivo de esta tesis es proponer una estrategia de control no lineal para un motor de combustión interna (MCI) que nos permita mantener cierta proporción en la mezcla entre el aire y el combustible, que participan en el proceso de combustión, para lograr una relación estequiométrica y garantizar una combustión completa. Así es posible incrementar el rendimiento energético, alargar la vida útil y reducir las emisiones contaminantes hacia la atmósfera de un MCI.

1.3.2. Objetivos particulares:

- Crear de un modelo matemático lo más apegado a la realidad en el funcionamiento de un MCI.
- Probar la veracidad del modelo desarrollado mediante simulaciones.
- Analizar la estabilidad en el modelo del MCI.
- Implementar la estrategia de control no lineal, regulación por retroalimentación del error para controlar de manera precisa la mezcla aire-combustible, en todos los puntos de operación de un MCI, especialmente durante los transitorios.

1.4. Motivación

En nuestro entorno, observamos con mayor cantidad vehículos de diferentes marcas impulsados por motores de combustión interna, los cuales fueron desarrollados en su totalidad por empresas extranjeras. Parece algo incongruente que muchas veces la investigación científica se centre en el desarrollo de proyectos o estructuras complejas que no son tangibles, y se tenga olvidado el sector que mueve al mundo, el sector automotriz.

Los vehículos modernos cuentan con subsistemas que buscan incorporar continuamente mejores prestaciones para el conductor, sin embargo la investigación y desarrollo en el ámbito automotriz se centra en la iniciativa privada, donde los desarrollos son guardados celosamente, para evitar que la competencia tenga acceso a

la información generada o bien para que los usuarios dependan exclusivamente de ellos al momento de dar servicio y mantenimiento a los vehículos.

El tema para esta tesis ha sido motivado por el impacto ambiental que representa la contaminación debido a la mala combustión en los motores de combustión interna. Así como el de desarrollar estrategias de control no lineal que nos permitan mantener la relación aire-combustible en el valor deseado en todo momento dentro de un motor de combustión interna. El lograr una relación estequiométrica en la concentración de la mezcla aire-combustible aumenta la eficiencia en un MCI, lo que reduce el consumo de combustible, las emisiones contaminantes y aumenta la vida útil del motor así como el rendimiento energético.

Otra de las motivaciones para desarrollar este tema es la de hacer conciencia en la comunidad científica, de que aún se puede realizar mucha investigación en el ámbito automotriz y no dejemos este campo exclusivamente al sector privado donde se investiga con fines de lucro, por tanto es deseable que universidades incorporen en sus planes de estudio el diseño automotriz.

1.5. Aportaciones

Las aportaciones realizadas en esta tesis son las siguientes:

- Modelado de los tres subsistemas principales en el funcionamiento de un MCI, admisión, inyección y torque generado.
- Desarrollo de una expresión matemática para el modelado de la mezcla aire-combustible en un motor de gasolina.
- Aplicación del control mediante simulación, utilizando el modelo no lineal desarrollado en esta tesis, el cual ofrece un nuevo esquema en sistemas de control para aplicaciones automotrices, que presenta resultados bastante satisfactorios en su implementación. En general, los casos encontrados en la literatura se limitan a modelos simples, normalmente lineales y utilizan rangos de variación bastante pequeños en el ángulo alfa.
- Desarrollo y prueba del controlador no lineal en un amplio rango de operación del MCI (variación del ángulo α). Los resultados muestran una reducción a cero en las desviaciones del valor lambda.

1.6. Publicaciones

- Modelado, Simulación y Comparación de un Motor de Combustión Interna. Miguel Angel Mancilla, Juan Anzures, Cuauhtémoc Acosta , Isidro I. Lázaro. Ropec 2011, Morelia Michoacan Mexico.
- Fuzzy Control Strategy for Stoichiometric Air-Fuel Mixture in Automotive Systems. Miguel Angel Mancilla Morelos, Juan Anzures Marín. World Automation Congress (WAC) 2012, Puerto Vallarta Jalisco Mexico.
- Regulación de la mezcla aire-combustible en un motor de combustión interna mediante una estrategia de control no lineal. Miguel Angel Mancilla, Juan Anzures, Cuauhtémoc Acosta. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial (En proceso de revisión).

1.7. Organización de la tesis

En el capítulo 1, se presenta la introducción al tema, que pretende situar al lector en el marco de la investigación. En el capítulo 2 se presentan los elementos fundamentales de un MCI para comprender su funcionamiento, así como su relación con la unidad de control electrónica ECU mediante un conjunto de sensores y actuadores. En el capítulo 3 se presenta un modelo matemático del sistema utilizando el “Modelo de Valor Medio” distinguiendo tres subsistemas, como son: múltiple de admisión, sistema de inyección de combustible, relación aire-combustible, velocidad y torque producidos. En el capítulo 4 se presentan los fundamentos de estabilidad así como el diseño de la estrategia de control, presentando los resultados en el en el capítulo 5 para finalmente concluir la investigación en el capítulo 6.

Capítulo 2

Subsistemas automotrices

2.1. Introducción.

El elemento fundamental en el funcionamiento de un vehículo es el motor de combustión interna (MCI), el motor es el encargado de aprovechar la energía química proveniente de la combustión y transformarla en energía mecánica. La fuerza de los gases inflamados en el interior del cilindro mueven el pistón desde punto muerto superior (PMS) hasta punto muerto inferior (PMI) y el pistón mediante la biela transmite este movimiento al cigüeñal y éste hacia las ruedas del vehículo. [Gerasimov, 2010, Aquino, 1981].

En este capítulo se presenta: Una breve descripción del principio del funcionamiento del MCI describiendo el proceso de combustión y las cuatro fases del ciclo termodinámica Otto, además de la estructura y los principales elementos que constituyen un MCI, sus características así como la interacción entre ellos para lograr el adecuado funcionamiento del motor, clasificándolos en sensores, actuadores y unidad de control.

2.2. Motor de Combustión Interna (MCI)

El motor de combustión interna basa su funcionamiento en el ciclo Otto de cuatro tiempos [Chee, 2009], en el cual se transforma energía química en energía mecánica, mediante una reacción exotérmica de la combustión de la mezcla aire-combustible (Afr). La cantidad, calidad y concentración de la relación aire-combustible determina el rendimiento energético, la emisión de gases contaminantes, así como la potencia

y vida útil de un motor. El trabajo cotidiano en un automóvil, esencialmente de un motor de combustión interna, estará determinado por las condiciones de manejo a las que está sujeto y éstas dependerán del conductor y condiciones meteorológicas.

Los sistemas actuales de control incorporan dos bloques, el bloque *Feedforward* y el *Feedback*. El bloque *Feedforward* mide el ángulo alfa (α), toma en cuenta condiciones atmosféricas y realiza una estimación de la gasolina necesaria. El bloque *Feedback* basa su funcionamiento en el sensor Lambda (λ) que determina la concentración del oxígeno en los gases de escape, entre la acción de los dos bloques de control forman una señal de control u_2 que llegará directamente a los inyectores y así dosificar la cantidad de combustible [Weeks, 1995].

El motor de combustión utiliza como fluido de trabajo una mezcla de aire y combustible, estos dos elementos son encendidos mediante la chispa proveniente de la bujía, presentándose una reacción exotérmica que nos permitirá transformar energía química en trabajo mecánico. Para aumentar la eficiencia y reducir las emisiones contaminantes es necesario lograr una mezcla homogénea de la concentración aire combustible que nos garantice una combustión completa [Pfeiffer, 1997]. El elemento encargado de realizar el control de la relación aire-combustible es la unidad de control electrónico (ECU), esta unidad recibe información de las condiciones de operación del motor mediante los sensores y a partir de esta información genera la señal de control que será aplicada a los inyectores.

2.3. Combustión

La combustión es una reacción química de oxidación de las sustancias combustibles, que se desarrolla con bastante velocidad, con la generación de calor (reacción exotérmica), luz, y productos gaseosos de reacción (CO_2 , H_2O , CO) como se muestra en la Figura 2.1. Para que exista una combustión debe presentarse:

- El combustible.
- El comburente (generalmente, el oxígeno del aire).
- La energía de activación (necesaria para iniciar el proceso, p.e. chispa eléctrica).
- Las condiciones que hacen posible las reacciones químicas intermedias del proceso (reacciones en cadena).

La combustión se puede representar por la reacción:

Combustible + comburente \rightarrow energía + residuos

Una descripción completa de la combustión involucra cientos de elementos químicos participando en miles de reacciones en un entorno caracterizado por la radiación y conducción térmica, la velocidad de reacción es una función de la temperatura y presión, donde los parámetros se determinan experimentalmente o bien se calculan usando la teoría de la mecánica cuántica [Evlampiev, 2007, Kerkeni, 2010].

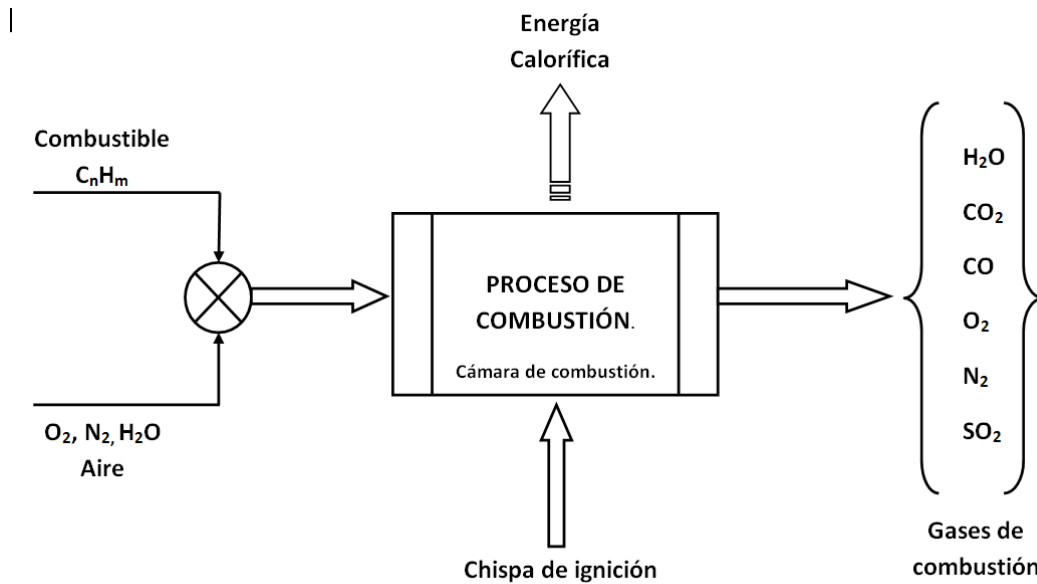


Figura 2.1: Proceso de combustión.

2.4. Estructura de un MCI

Los componentes mecánicos principales de un MCI son: los cilindros, los pistones, el cigüeñal, árbol de levas, bielas y válvulas tanto de admisión como de escape estos elementos se montan de forma precisa en el monoblock o cuerpo del motor y con la ayuda de módulos como el de ignición, el sistema de admisión, el sistema de escape, el sistema eléctrico y la unidad de control electrónico los cuales en conjunto logran cumplir con el objetivo del motor.

A continuación se detallará la estructura y el funcionamiento de cada uno de los elementos que forman parte de un motor de combustión interna.

2.4.1. Cigüeñal

Este componente es el más importante de un motor por ser la columna vertebral del mismo, además de transferir la fuerza del motor hacia la caja de cambios. Este elemento se comporta como una serie de palancas acopladas sobre el mismo eje que recibe el movimiento lineal de los pistones, y lo convierte en movimiento rotativo.

El cigüeñal está unido a través de sus muñequillas o codos a las bielas, y éstas a su vez con el pistón. Como se muestra en la Figura 2.2. El cigüeñal consta de varias manivelas dispuestas en planos y sentidos diferentes, el movimiento alternativo de las diversas bielas estará sincronizado y la distancia recorrida por el pie de biela dependerá de la longitud del brazo de cada manivela [Weeks, 1995] .



Figura 2.2: Cigüeñal [Asencio, 2010].

2.4.2. Pistón

El pistón es el encargado de transformar la energía térmica desarrollada en el interior del cilindro en energía mecánica recibiendo directamente la fuerza de expansión de los gases durante la combustión, en la Figura 2.3 se puede apreciar la ubicación del pistón en el MCI, el cual debe cumplir durante su funcionamiento con las siguientes funciones:

- Transmitir a la biela los esfuerzos producidos durante la expansión.

- Mantener cerrada la cavidad volumétrica con el fin de evitar la fuga de gases y los pasos de aceite a la cámara de combustión.
- Absorber parte del calor de la combustión y transmitirlo a las paredes del cilindro.

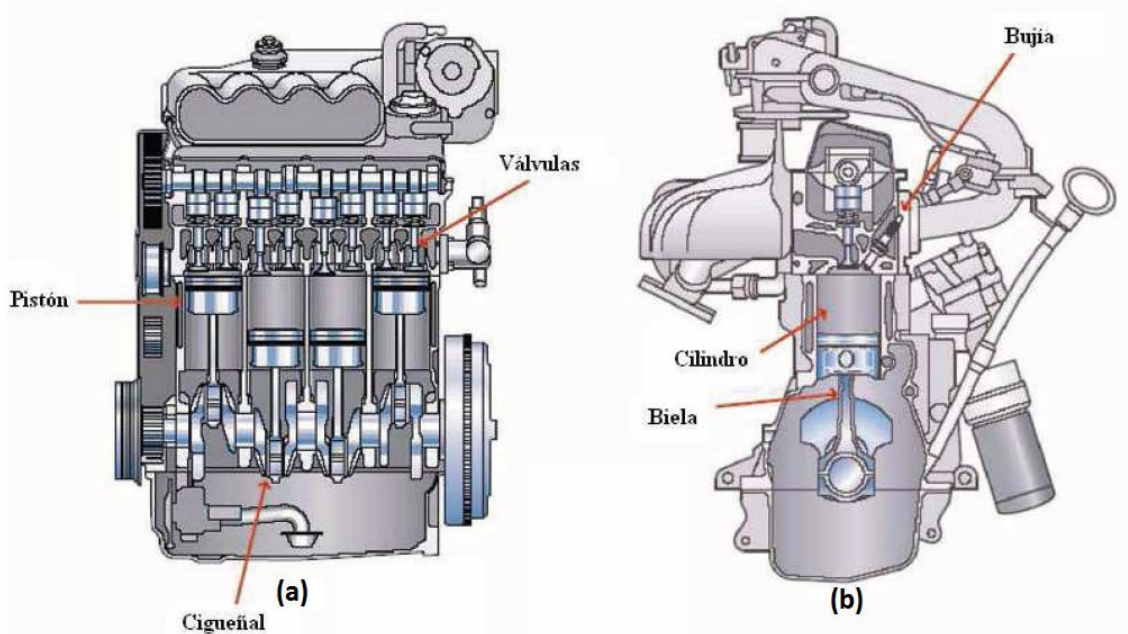


Figura 2.3: Estructura de un MCI.

2.4.3. Anillos

Los anillos o aros tienen la misión de evitar fugas de compresión en la cámara de combustión, así como evitar el paso de aceite de la parte inferior del motor a la cámara de compresión. Adicionalmente los anillos reducen el rozamiento y transmiten el calor contenido en el pistón a las paredes del cilindro.

2.4.4. Válvulas

Son las encargadas de controlar la entrada y salida de los gases de admisión y escape, las válvulas son accionadas de acuerdo a la etapa correspondiente dentro del ciclo Otto por el árbol de levas, el cual mediante presión mecánica las abre o cierra herméticamente. Las válvulas están sometidas a fuertes presiones y temperaturas, siendo esta última un factor clave a la hora de diseñar la longitud de su vástago y el diámetro del mismo. Las válvulas y su ubicación se muestran en la Figura 2.3.

2.4.5. Bielas

Las bielas son las piezas que sujetan al cilindro por un extremo y por otro descansan en el cigüeñal. Este componente se encarga de convertir el movimiento rectilíneo del pistón en movimiento rotatorio al centro del cigüeñal por medio de los muñones de biela del mismo. Es decir transmiten la fuerza del pistón al giro del cigüeñal. Las bielas están fabricadas en aleaciones muy resistentes debido a que reciben gran presión por el empuje del pistón así como también fuerzas de estiramiento al desacelerar el motor, es decir están sometidas a esfuerzos de compresión y flexión por su movimiento lineal y rotativo a la vez. la Figura 2.3 (b) muestra la ubicación de la biela.

2.4.6. Árbol de levas

Un árbol de levas es un mecanismo formado por un eje en el que se colocan distintas levas, que pueden tener distintas formas y tamaños y estar orientadas de diferente manera, para activar las válvulas a periodos constantes, es decir constituye un temporizador mecánico cíclico. El árbol esta acoplado mediante una cadena de manera directa con el cigüeñal con una relación 2 a 1. Siempre debe de lograrse la sincronía entre el árbol de levas y el cigüeñal.

2.4.7. Cuerpo de aceleración

Es la trayectoria encargada de la entrada y regulación de aire desde la atmósfera hasta el múltiple de admisión, el aire entra por succión y la regulación se realiza mediante la posición de la mariposa del acelerador, que consiste en una placa metálica acoplada al pedal del acelerador, como se muestra en la Figura 2.4. La cantidad de aire que entra determina la presión en el múltiple de admisión y con ello la eficiencia volumétrica.

2.4.8. Múltiple de admisión

El múltiple de admisión también llamado colector de admisión tiene la encomienda de proveer el aire suficiente para el proceso de combustión, consiste en un depósito donde se almacena el aire disponible para la entrada de los cilindros. La presión de aire en el múltiple modifica de manera directa la eficiencia volumétrica en el llenado

del cilindro. Como se muestra en la Figura 2.4.

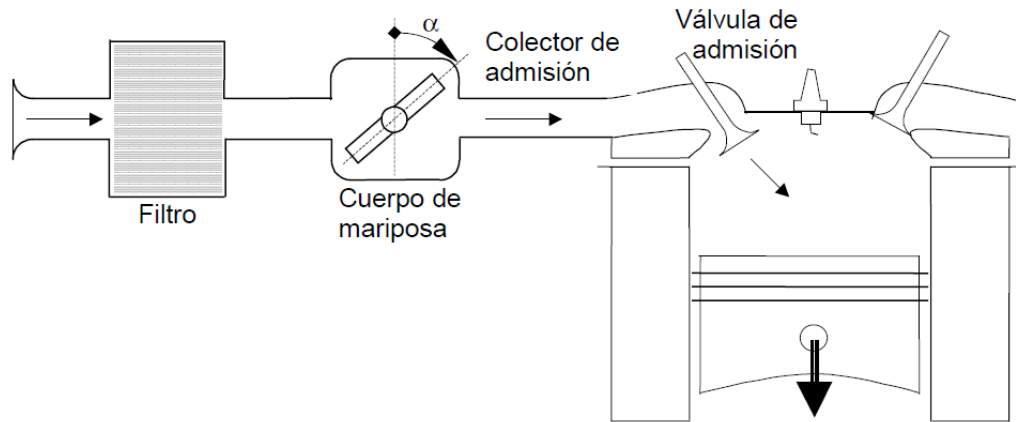


Figura 2.4: Sistema de admisión [Nevot, 1999].

2.4.9. Sistema de inyección

Consiste en una bomba, líneas de combustible, riel de inyectores, inyectores y regulador de presión. La bomba se encarga de presurizar las líneas o conductos hasta llegar al riel de inyectores, donde el regulador de presión mantiene la presión necesaria para garantizar el abastecimiento a los cilindros del motor independientemente de las condiciones de manejo en las que se encuentre el vehículo, la cantidad de combustible inyectada es proporcional al tiempo de apertura del inyector, este tiempo lo determinará la unidad de control electrónico ECU mediante la modulación de una señal PWM. En la Figura 2.5 se muestran los principales tipos de inyección.

2.4.10. Sistema de encendido

La combustión dentro de la cámara necesita de una energía de disparo, dicha energía es generada por un arco eléctrico entre los electrodos de una bujía, para que se presente el arco eléctrico es necesario un sistema de encendido el cual se compone por un módulo electrónico de conmutación, una bobina de encendido, sensor de cigüeñal cables de baja impedancia y un conjunto de bujías. El módulo de encendido es controlado por la unidad de control electrónica, la cual mediante la información proporcionada por el sensor de posición del cigüeñal determina el momento óptimo

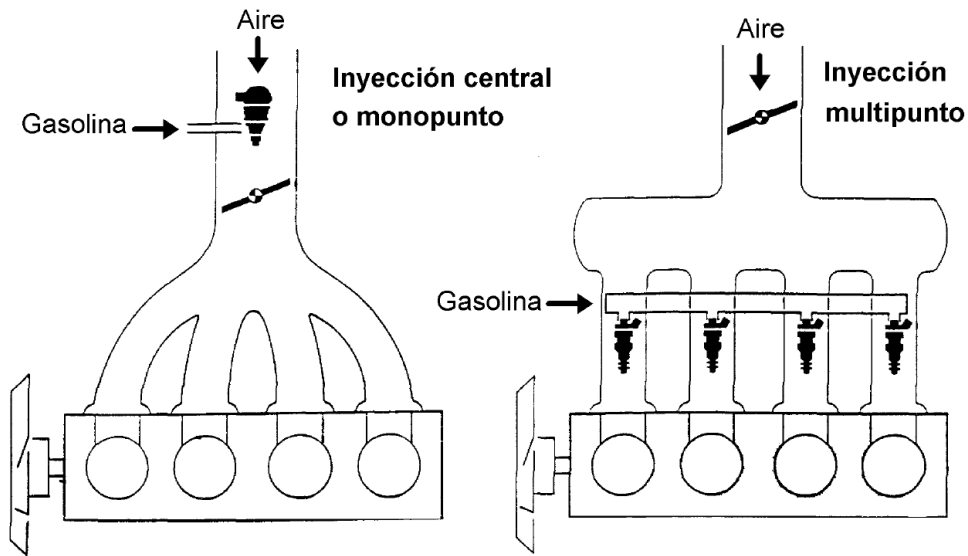


Figura 2.5: Inyección Monopunto y Multipunto [Nevot, 1999].

para generar una chispa en la bujía, y entonces envía la señal para que la bobina de encendido genere dicha chispa y así obtener la combustión. El sistema de encendido debe de guardar la sincronía con el cigüeñal y producir la chispa en el cilindro adecuado, de lo contrario el motor no encenderá.

2.4.11. Sistema de lubricación

Es el encargado de garantizar una buena lubricación en todos los componentes móviles de un MCI con la finalidad de evitar desgaste por fricción y calentamiento en las piezas [Rajamani, 2006].

2.5. Ciclo Otto

El principio de operación en un MCI es una reacción exotérmica en la que parte del calor generado se transforma en trabajo mecánico. Esta conversión se da mediante cuatro etapas conocidas como ciclo Otto, las cuales se describen brevemente a continuación [Karmiggelt, 1998, Rajamani, 2006, Shamdani, 2008].

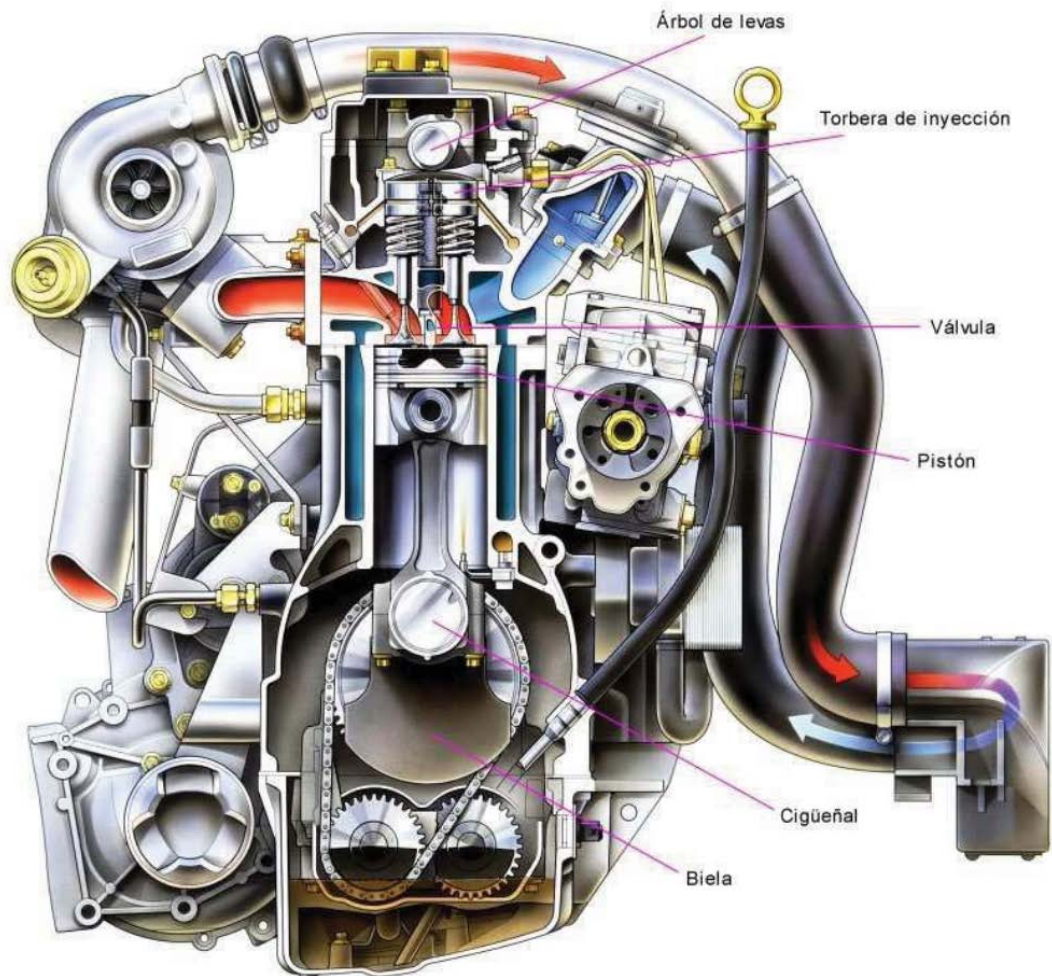


Figura 2.6: Motor de combustión interna MCI [Asencio, 2010]

En la Figura 2.7 se muestran los cuatro tiempos del ciclo Otto, observe la posición de cada una de las válvulas así como el sentido del desplazamiento del pistón.

2.5.1. Admisión

El pistón se mueve desde PMS hacia PMI con la válvula de admisión abierta, succionando la mezcla (aire y combustible) contenida en el múltiple de admisión hacia la cámara de combustión. En esta primera fase el cigüeñal ha hecho un giro de 180° que sería un tiempo, y se ha producido la aspiración de una mezcla de oxígeno y combustible.

2.5.2. Compresión

Las dos válvulas se encuentran cerradas, el pistón se mueve desde PMI hacia PMS comprimiendo la mezcla, elevando su presión y temperatura a unos 13-14 bares y 200^o C lo que aumenta la volatilidad de la mezcla.

2.5.3. Fuerza

Las válvulas están cerradas y el pistón está en PMS, entonces se origina la combustión de la mezcla aire combustible gracias al arco eléctrico ocasionado por la bujía. El aumento de presión es tal que llega a unos 24 bares y la temperatura en algunos puntos puede ascender a 2000^oC, de este modo el pistón se ve obligado por la expansión a deslizarse hasta el PMI recorriendo el cigüeñal 180^o y es la única fase que realiza trabajo.

2.5.4. Escape

Con la válvula de escape abierta, el pistón se mueve desde PMI hasta PMS, realizando un barrido de los gases residuales de la combustión y enviándolos al múltiple de escape.

Entonces mediante en el ciclo Otto, la energía obtenida en el proceso de combustión se aplica para contribuir en el giro del cigüeñal mediante el conjunto de bielas que se encuentran acopladas de forma mecánica a los pistones. El árbol de levas es el encargado de abrir y cerrar las válvulas tanto de admisión como de escape en el momento preciso.

2.6. Sensores automotrices

Todo sistema de inyección electrónica requiere de sensores que midan las condiciones atmosféricas y de operación así como los parámetros importantes en el funcionamiento del MCI. Los principales sensores automotrices se mencionan a continuación.

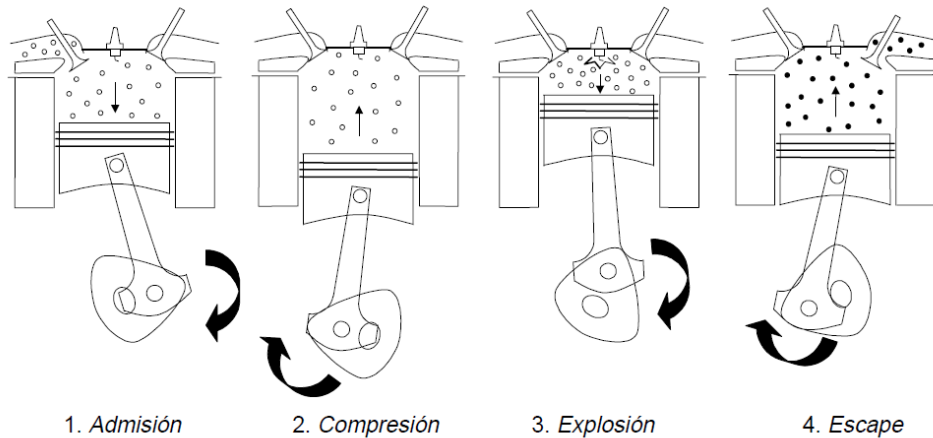


Figura 2.7: Ciclo Otto en un MCI [Nevot, 1999].

2.6.1. Sensor de temperatura (ECT)

Debido a que el motor de combustión interna no se mantiene en el mismo valor de temperatura desde el inicio del funcionamiento, ya que esta se incrementa, las condiciones de funcionamiento también variarán notablemente, cuando la temperatura es muy baja, debiendo vencer la resistencia de sus partes móviles; adicionalmente un buen porcentaje del combustible inyectado es desperdiciado en las paredes del múltiple de admisión, de los cilindros y debido a la mala combustión, por lo que requerimos inyectar una cantidad adicional de combustible en frío y reducir paulatinamente este caudal hasta llegar al ideal en la temperatura óptima de funcionamiento. Esta señal informa a la ECU la temperatura del refrigerante del motor, para que este pueda enriquecer automáticamente la mezcla aire-combustible cuando el motor está frío y la empobrezca paulatinamente en el incremento de la temperatura, hasta llegar a la temperatura ideal de trabajo.

2.6.2. Sensor de temperatura del aire (IAT)

El sensor de temperatura del aire (IAT por sus siglas en inglés) que aspira el motor, es un parámetro muy importante que debe recibir la ECU, información que generalmente se toma en conjunto con el caudal de aire ingresado para obtener una cantidad exacta de la masa y densidad del aire que ingresa al motor para determinar el combustible necesario, que garantice una mezcla estequiométrica en los cilindros

del MCI.

2.6.3. Sensor del cigüeñal (CKP).

Uno de los datos más importantes que se requieren en un sistema de inyección, así como para el sistema de encendido del motor de combustión interna, es la señal del número de revoluciones a las cuales gira el motor. Esta señal es tan importante debido a que el caudal de combustible que debe inyectarse está relacionado directamente con el régimen de giro del cigüeñal. Se entenderá que por cada combustión existen tres elementos relacionados para lograrlo, que son: una cantidad de aire aspirado, una cantidad de combustible relacionado exactamente (mezcla ideal) con este aire y un elemento capaz de inflamar la mezcla, que en este caso es la "chispa eléctrica" que logra quemarla. Con la información del número de revoluciones, la ECU sabe el número de veces que debe inyectarse en combustible y la cantidad relacionada con el aire aspirado.

2.6.4. Sensor de la posición del acelerador (Tps)

Esta señal se obtiene de un potenciómetro eléctrico lineal, el cual está alojado en el cuerpo de la mariposa de aceleración y recibe el movimiento de la placa a través del mismo eje, de tal manera que la resistencia variable del potenciómetro esté relacionada de acuerdo a la posición en la cual se encuentre la mariposa. A este potenciómetro se le alimenta con una tensión de referencia, la cual generalmente es de 5 volts, provenientes de un regulador de voltaje de la misma ECU. Cuando la mariposa de aceleración se encuentra en su posición de reposo, la cantidad de tensión que se envía como señal será de unas cuantas décimas de volt y esta señal se irá incrementando paulatinamente, de acuerdo al incremento en el movimiento de la mariposa, hasta llegar al tope de la escala.

2.6.5. Sensor de presión en el múltiple de admisión (MAP)

Su objetivo radica en generar una señal proporcional a la presión existente en la tubería de admisión con respecto a la presión atmosférica, midiendo la presión absoluta existente en el colector de admisión. Generando una señal que puede ser analógica o digital, reflejando la diferencia entre la presión en el interior del múltiple de admisión y la atmósfera.

2.6.6. Sensor de oxígeno (Lambda)

El sensor de oxígeno es un sensor que detecta la presencia de mayor o menor cantidad de este gas en los gases de escape, de tal manera que cualquier variación en el número de moléculas tomadas como ideales o referenciales, será un indicador de mal funcionamiento y por lo tanto de falta o exceso de combustible en la combustión. Este sensor trabaja supervisando el sistema, ya que todo el tiempo está revisando la calidad de la combustión, tomando como referencia al oxígeno que encuentra en los gases quemados, informando a la ECU para que corrija la falta o el exceso de combustible inyectado, lo cual se logra mediante una modulación del ancho de pulso en la señal aplicada al inyector y entonces lograr una mezcla aire-combustible ideal. El sensor está constituido de una cerámica porosa de bióxido de circonio y de dos electrodos de platino, alojados dentro de un cuerpo metálico. Un electrodo está acoplado al cuerpo, mientras que el segundo es el contacto aislado o de referencia. El sensor está localizado convenientemente en la salida del múltiple de escape del motor, lugar en el cual puede medir la variación de la concentración de oxígeno en los gases de escape, entre los dos electrodos se genera una tensión eléctrica de aproximadamente 1 Volt, cuando la cantidad de oxígeno es abundante, que significa que la combustión posee mucho combustible. En cambio la generación de esta tensión eléctrica será menor si la cantidad de combustible inyectado es muy pobre. Por lo tanto durante el funcionamiento del motor se tendrán valores de generación entre décimas de volt hasta aproximadamente 1 Volt, dependiendo de la presencia del oxígeno en los gases quemados. Puesto que la ECU recibe la información continuamente, tiene la capacidad de modificar la cantidad de combustible que inyecta al sistema en cuestión de milésimas de segundo, permitiendo que el motor obtenga una mezcla estequiométrica, mejorando la combustión que a su vez reflejara una mejor eficiencia y una emisión mínima de gases contaminantes en el funcionamiento de un MCI. En la Figura 2.8 podemos apreciar la estructura de este sensor [Vachtsevanos, 1993, Jakobsson, 2007, Rajamani, 2006].

2.7. Actuadores automotrices

2.7.1. Bobina de encendido.

La bobina acumula la energía de encendido y la transmite en forma de un impulso de corriente de alta tensión, para generar un arco eléctrico entre los electrodos de la

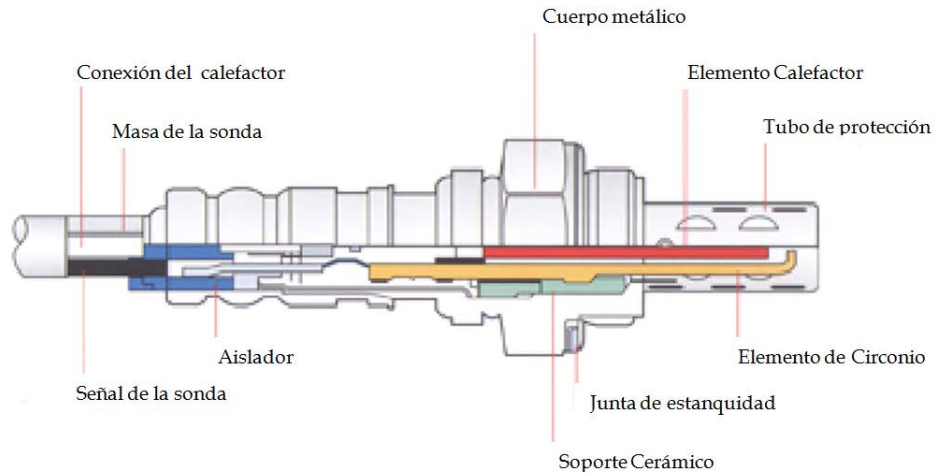


Figura 2.8: Sensor de Oxígeno

bujía.

La bobina de encendido está formada por un núcleo cubierto por dos devanados el primario y el secundario. El devanado secundario está formado de un gran número de vueltas de conductor delgado que cubre el núcleo, sobre el devanado secundario va el devanado el primario, formado por algunos centenares de vueltas de conductor grueso aisladas entre sí y del secundario. La relación de número de vueltas entre ambos devanados está comprendida entre 60 y 150.

2.7.2. Inyector

Fina electroválvula del sistema de inyección encargada de dosificar el combustible al interior del cilindro o al conducto de admisión del mismo o a la cámara de pre-combustión en el caso de los motores diesel.

El inyector es el encargado de pulverizar y rociar la gasolina procedente de la línea de presión dentro del conducto de admisión, el inyector es fundamentalmente una fina electroválvula capaz de abrirse y cerrarse a altas frecuencias de operación, sin escape de combustible y que reacciona muy rápidamente al pulso eléctrico. El inyector es controlado por la unidad de control electrónica, la cual mediante la modulación del ancho de pulso de una señal PWM sincronizada con el sensor del cigüeñal, modifica el tiempo de apertura y por ende la cantidad de combustible inyectado. La Figura 2.9 muestra la estructura de un inyector [Copp, 1998].

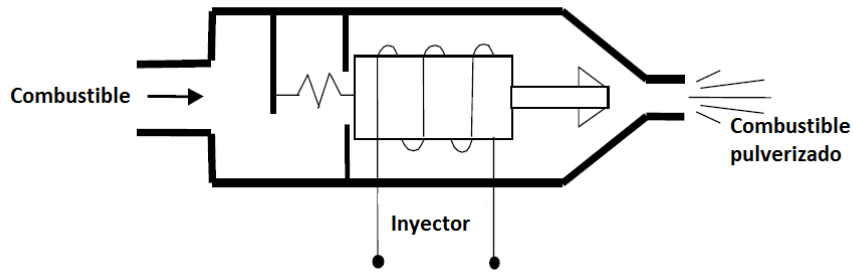


Figura 2.9: El inyector Automotriz.

2.7.3. Válvula de marcha mínima

El sistema de control de marcha mínima (ralentí) se utiliza para estabilizar la velocidad ralentí del motor, regulando la cantidad necesaria de aire que entrara al múltiple de admisión para garantizar un funcionamiento estable y regulado de un MCI.

El sistema de marcha mínima utiliza a la ECU para controlar la cantidad de aire que entra al múltiple de admisión mediante la modulación de la válvula de marcha mínima. La ECU controla la válvula al aplicarle señales eléctricas de acuerdo al algoritmo de control que se encuentra en la memoria de la ECU.

2.8. Unidad de Control Electrónica (ECU)

El funcionamiento de un motor moderno requiere de un control preciso que tenga la flexibilidad de adecuarse a las diferentes condiciones de manejo y de operación. Para lograr la precisión los vehículos modernos incorporan elementos electrónicos para sensar, procesar información y controlar los diferentes subsistemas del vehículo, a esta nueva generación de control se le conoce como “*fuel inyección*” donde uno de los propósitos principales es dosificar la inyección de combustible y reducir su consumo. El sistema *fuel inyección* se compone de un conjunto de sensores, una unidad lógica programable que comanda a un grupo de actuadores. El control se centra en la ECU que en esencia consiste en un microcontrolador, el cual se comunica con un conjunto de sensores que indican las condiciones de operación del motor, la ECU procesa la información y mediante algoritmos de control determina el funcionamiento de los actuadores, modificando continuamente sus señales para lograr un óptimo

funcionamiento del motor [Aström, 1989, Copp, 1998].

Los parámetros utilizados por la ECU son almacenados en una memoria EEPROM por sus siglas en inglés (Electrically Erasable programmable read-only memory) y son característicos de cada tipo de vehículo, entonces la ECU carga estos parámetros como referencia y los compara con las señales provenientes de los sensores para determinar las acciones correctivas en el funcionamiento del motor y aplica las señales correspondientes a los actuadores.

En los inicios del *fuel inyección*, el diseño se centro en la inyección de combustible y el ángulo de ignición, posteriormente se han agregado más dispositivos para mejorar el rendimiento y prestaciones de un MCI.

En la actualidad los vehículos incorporan más de una unidad de control electrónico, asignándole a cada una de ellas tareas específicas, y comunicándose mediante el protocolo de comunicación llamado CAN (Controller Area Network) [Larses, 2005, Rajamani, 2006].

2.9. Mezcla aire-combustible

El poder calorífico así como los residuos generados por la combustión dependen en gran medida de la calidad, cantidad y concentración de la mezcla aire-combustible, de acuerdo a [Evlampiev, 2007], para conseguir un funcionamiento eficiente de un MCI se requiere trabajar con una combustión completa, la cual solamente resultará de la ignición de una mezcla estequiométrica. El análisis de esta tesis se enfoca en lograr tener en todo momento dentro de la cámara de combustión una relación de 14.7 partículas de aire por cada partícula de combustible [Jakobsson, 2007, Kerkeni, 2010]. El valor estequimétrico se detalla más adelante en la sección 4.4.

2.10. Funcionamiento de un MCI

Un conjunto de sensores le informan a la ECU sobre el flujo de aire, posición del acelerador, ángulo del cigüeñal, temperatura del motor, a partir de esta información la ECU comanda a los actuadores para regular la inyección y ángulo de ignición principalmente, se controla el tiempo de apertura en el inyector típicamente de 1 a 10 ms, este tiempo es proporcional a la cantidad de combustible inyectado. La Figura

2.10 muestra la ubicación y la interacción entre los elementos que constituyen el MCI.

Las variables principales que toma en cuenta la ECU es el flujo de aire en la admisión \dot{m}_a , la velocidad angular del cigüeñal $\dot{\omega}_e$, de acuerdo a esta información el tiempo de apertura es modificado con un factor correctivo dependiente de la posición del acelerador así como de la temperatura del motor [Gäfvert, 2003, Bonnicksen, 2001, Pushkaraj, 2005]. En este trabajo se considera el ángulo de ignición como el óptimo para la combustión.

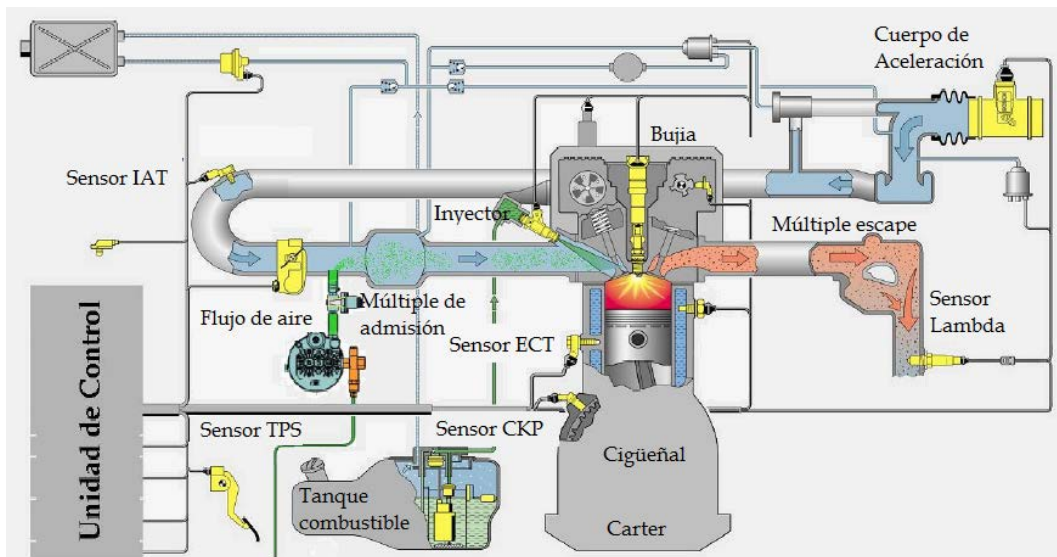


Figura 2.10: Funcionamiento del MCI

Capítulo 3

Modelado matemático

3.1. Introducción

El modelado matemático de un motor de combustión interna representa uno de los mayores desafíos en mecánica de fluidos dada la naturaleza compleja del fenómeno: flujo compresible con grandes variaciones de densidad, turbulencia, incertidumbre, cíclico e inestacionario. Las características de la combustión son influenciadas por el proceso de preparación y distribución del combustible en el motor. La inyección de combustible líquido introduce la complejidad de describir la vaporización física y flujos bifásicos, ya que se debe considerar la cantidad de combustible en forma líquida y en forma de vapor que entran al cilindro. Las emisiones contaminantes se pueden controlar mediante el mezclado y turbulencia de la relación aire-combustible [Evlampiev, 2007, Kerkeni, 2010].

El funcionamiento de un MCI es un sistema complejo no lineal que trabaja en diferentes puntos de operación, lo que ocasiona conmutaciones en la descripción matemática del modelo, dependiendo de las condiciones de manejo en las que se encuentre el automóvil, algunos parámetros propios del motor no pueden ser calculados con precisión, por lo que se estiman introduciendo incertidumbre en los sistemas de control, por esta razón es necesario desarrollar modelos matemáticos sofisticados y aplicar estrategias avanzadas de control como pueden ser, control adaptivo, controles autosintonizados, redes neuronales o como en el caso de este trabajo, regulación por retroalimentación del error, que nos permitan compensar la incertidumbre y las estimaciones, para poder trabajar en el punto de operación deseado a pesar de la complejidad en el funcionamiento del MCI.

La finalidad de desarrollar un modelo del MCI es la de analizar y comprender el funcionamiento de los diferentes módulos del motor, en especial el procedimiento para la formación de la mezcla aire-combustible, otro objetivo es contar con una herramienta que nos ayude a realizar ensayos y experimentos de manera rápida, segura y confiable para mejorar la evolución en el control de un MCI.

Hoy en día no se conoce modelo matemático que contemple todos los procesos o variables en el funcionamiento de un automotor, sin embargo se cuenta con modelos específicos que involucran expresiones para describir los principales comportamientos dentro de un MCI, la mayoría de estos modelos manejan parámetros propios de cada vehículo que deben de obtenerse en forma experimental.

El modelo desarrollado en esta tesis está basado en el esquema propuesto por [Aström, 1989] el cual cumple con el objetivo de ser utilizado en el control de la variable λ , de modo que no es necesario reflejar todas las características del proceso sino sólo aquellas que tengan relación directa o indirecta con la variable a controlar [Aquino, 1981].

El modelo hace uso de la teoría del valor medio para facilitar el análisis y modelado de la planta, enfocándose principalmente en la dinámica del aire en la admisión, el flujo de combustible y el torque generado, la relación aire-combustible es una variable compuesta por la razón aire y combustible que entran a la cámara de combustión.

3.2. Modelo de valor medio

Al considerar las cuatro fases involucradas del ciclo Otto, admisión, compresión, fuerza y escape, para el modelado de un MCI, se tienen ecuaciones diferenciales no lineales discontinuas, lo que complica en gran medida el análisis matemático para el modelado y desarrollo del control, por lo que para evitar estas complicaciones se ha venido utilizando el concepto de valor medio, el cual describe el comportamiento del MCI en términos de la señal promedio. Capturando la dinámica en una escala de tiempo que abarca varios ciclos del motor. Los resultados de esta técnica han mostrado una buena precisión en el modelado del proceso de combustión, lo que lo hace adecuado para el desarrollo de algoritmos de control [Yacoub 1999, Jakobsson, 2007, Karmiggelt, 1998].

3.3. Consideración para el modelado

En este trabajo el modelo se centrará en el motor de combustión interna, considerando como entrada independiente u_1 , el ángulo α de la mariposa del acelerador el cual es manipulado directamente por el conductor. La entrada de control u_2 será la cantidad de combustible a inyectar. Otras consideraciones son:

- El aire es considerado como un gas ideal.
- Se analizan la dinámica del aire que entra al múltiple de admisión y alcanza al cilindro, así como la inyección de combustible y el par generado por el MCI.
- La combustión se considera instantánea y completa.
- El ángulo de avance de encendido es el óptimo para la combustión.
- El llenado y vaciado del cilindro son completos en cada ciclo.
- La temperatura en el motor se considera constante.
- Las fugas de compresión dentro del MCI fueron consideradas nulas.
- Se eliminaron los retrasos propios del sistema en el análisis y simulación.
- Las pérdidas en la potencia del motor ocasionadas por accesorios, aire acondicionado, generador y cargas externas se engloban en el término T_f .
- Las pérdidas de compresión así como las de fricción no se consideran.

3.4. Flujo del aire de admisión

Para determinar el flujo de aire tenemos que tomar en cuenta el régimen de giro, el ángulo de la mariposa del acelerador y la presión en el múltiple de admisión.

El modelo a utilizar mantiene constante el caudal de aire durante el ciclo de funcionamiento, igualándolo a una máquina rotativa en lugar de una alternativa, ya que este tipo de modelos son los más adecuados para el desarrollo de sistemas de control [Aquino, 1981].

Se considera al múltiple de admisión como un depósito cilíndrico en el que entra el aire mediante el cuerpo de aceleración y sale a través de la válvula de admisión

de cada uno de los cilindros. El aire es aspirado hacia el cilindro por la succión debida al movimiento del pistón, el llenado del cilindro depende de la cantidad de aire disponible en el múltiple y la relación del volumen del múltiple entre el volumen del cilindro. Al nivel de llenado se le conoce como eficiencia volumétrica [Jakobsson, 2007, Shamdani, 2008].

Entonces para el modelado de la dinámica de aire se aplica la ecuación de conservación de masa en el múltiple de admisión [Pfeiffer, 1997].

La dinámica del aire en el múltiple de admisión se puede expresar como

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{ai} - \dot{m}_{ao} \quad (3.1)$$

donde \dot{m}_{ai} es el flujo de entrada y \dot{m}_{ao} es la masa de aire que sale del múltiple para entrar al cilindro. \dot{m}_{ai} depende del diámetro y forma del cuerpo de aceleración; ángulo de la mariposa del acelerador, y presión en el múltiple de admisión, de acuerdo con

$$\dot{m}_{ai} = Max \cdot Tc(\alpha) \cdot PRI \left(\frac{P_m}{P_{atm}} \right) \quad (3.2)$$

donde: Max es la constante que representa la capacidad de flujo de aire en el cuerpo de aceleración. Es función de la temperatura y presión en el ambiente, pero principalmente de las características físicas como geometría y volumen del cuerpo de aceleración.

$Tc(\alpha)$: Es una función discontinua del ángulo de la mariposa del acelerador α . Toma valores de cero a uno dependiendo de la posición del acelerador como se muestra en la ecuación (3.3) y en la Figura (B.1) se muestra su implementación en Simulink.

$$Tc(\alpha) = \begin{cases} 1 - \alpha^2 & \text{si } 0 < \alpha < 57 \\ 1 & \text{si } 57 < \alpha < 90 \end{cases} \quad (3.3)$$

PRI : Toma en cuenta la diferencia entre la presión atmosférica P_{atm} y la presión en el múltiple de admisión P_m , cuando la presión en el múltiple es menor, el flujo de aire es mayor hacia dentro del múltiple, este comportamiento lo determina el término PRI de acuerdo a la relación (3.4), su implementación en Simulink se muestra en la Figura B.2.

$$PRI = 1 - e^{9\left(\frac{P_m}{P_{atm}} - 1\right)} \quad (3.4)$$

Los tres términos Max , $Tc(\alpha)$, y PRI son multiplicados y de acuerdo a las condiciones de presión, temperatura, ángulo de la mariposa del acelerador y forma geométrica del cuerpo de aceleración se determina el flujo de aire que entra al múltiple de admisión como se muestra en la ecuación (3.2).

La masa de aire que sale del múltiple de admisión para entrar al cilindro, \dot{m}_{ao} , es una función de la eficiencia volumétrica, velocidad del motor y aire disponible en el múltiple de admisión [Pfeiffer, 1997]. La cual es descrita como

$$\dot{m}_{ao} = k_1 \eta_v m_a w_e \quad (3.5)$$

donde:

w_e : Velocidad angular del cigüeñal.

η_v : Eficiencia volumétrica.

m_a : Masa de aire contenida en el múltiple de admisión.

k_1 : Relación entre la capacidad volumétrica del cilindro V_e y la capacidad volumétrica del múltiple de admisión V_m , esta dada por (3.6).

$$k_1 = \frac{V_e}{4\pi V_m} \quad (3.6)$$

A su vez, la eficiencia volumétrica está dada por la expresión no lineal mostrada

$$\eta_v = (24.5w_e - 31000)m_a^2 + (-0.167w_e + 222)m_a + (0.00081w_e + 0.352) \quad (3.7)$$

la eficiencia volumétrica depende directamente de la velocidad y de la masa de aire disponible en el múltiple.

Para determinar la presión en el múltiple de admisión utilizamos (3.1) a (3.8) [Chee, 2009, Pfeiffer, 1997].

$$\dot{P}_m = \frac{R \cdot T_m}{V_m} [\dot{m}_{ai} - \dot{m}_{ao}] \quad (3.8)$$

donde:

R : Constante universal de los gases ideales.

T_m : Temperatura en el múltiple de admisión.

El modelo completo de la dinámica del aire utilizado para la simulación se muestra en el capítulo 4.

3.5. Flujo del combustible de admisión

En un MCI el combustible es directamente inyectado en el múltiple de admisión con la finalidad de formar una mezcla homogénea con el aire. Para mantener la concentración aire-combustible en un valor estequiométrico, se controla la cantidad de combustible a inyectar m_{fi} .

Consideremos el sistema de inyección como un sistema lineal, donde la señal de control u_2 determina el tiempo t_i de apertura del inyector, tomando en cuenta que el inyector es un elemento mecánico y requiere de un tiempo mínimo t_{iny} para abrir. El combustible inyectado será proporcional k_{iny} al tiempo de inyección menos el retardo en la apertura del inyector [Gerasimov, 2010], de acuerdo con (3.9).

$$m_{fi} = k_{iny}(t_i - t_{iny}) \quad (3.9)$$

Para mantener la relación aire-combustible en un valor deseado, es necesario conocer la cantidad de combustible que entra al cilindro y participa en la combustión. Un parte $(1 - x)$ del combustible inyectado m_{fi} entra directamente al cilindro en forma de vapor \dot{m}_{fv} , sin embargo otra fracción (x) se queda en las paredes del múltiple de admisión formando una delgada capa líquida \dot{m}_{ff} , esta fracción de combustible tomará un retardo de tiempo τ_f en evaporarse y entrar al cilindro para participar en la combustión.

Entonces el flujo neto de combustible que entra al cilindro \dot{m}_{fc} se forma de la fracción de combustible en forma de vapor \dot{m}_{fv} y después de un retardo, de la fracción depositada en las paredes del múltiple \dot{m}_{ff} de acuerdo a la ecuación (3.10).

Los parámetros x y τ_f dependen del punto de operación del vehículo, la constante de aspiración es directamente proporcional a la cantidad de combustible depositado en las paredes y la constante de tiempo se considera fija cuando el motor ha alcanzado la temperatura de operación.

La cantidad de combustible en forma de vapor \dot{m}_{fv} y la que forma una capa líquida en el múltiple \dot{m}_{ff} , quedan determinadas por [Aquino, 1981].

$$\dot{m}_{fc} = \dot{m}_{fv} + \dot{m}_{ff} \quad (3.10)$$

$$\dot{m}_{fv} = (1 - x)\dot{m}_{fi} \quad (3.11)$$

$$\dot{m}_{ff} = (x)\dot{m}_{fi} - \tau_f \ddot{m}_{ff} \quad (3.12)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3.11) y (3.12) en (3.10).

$$\dot{m}_{fc} = (1 - x)\dot{m}_{fi} + (x)\dot{m}_{fi} - \tau_f \cdot \ddot{m}_{ff} \quad (3.13)$$

Simplificando términos

$$\dot{m}_{fc} = \dot{m}_{fi} - \tau_f \ddot{m}_{ff} \quad (3.14)$$

A partir de (3.10), podemos asumir que:

$$\ddot{m}_{fc} = \ddot{m}_{fv} + \ddot{m}_{ff} \quad (3.15)$$

y por tanto

$$\ddot{m}_{ff} = \ddot{m}_{fc} - \ddot{m}_{fv} \quad (3.16)$$

Además de (3.11)

$$\ddot{m}_{fv} = (1 - x)\ddot{m}_{fi} \quad (3.17)$$

Sustituyendo (3.16) y (3.17) en (3.14) obtenemos (3.18) y (3.19).

$$\dot{m}_{fc} = \dot{m}_{fi} - \tau_f (\ddot{m}_{fc} - \ddot{m}_{fv}) \quad (3.18)$$

$$\dot{m}_{fc} = \dot{m}_{fi} - \tau_f (\ddot{m}_{fc} - (1 - x)\ddot{m}_{fi}) \quad (3.19)$$

finalmente despejando \ddot{m}_{fc} de (3.19) llegamos a la ecuación (3.20).

$$\ddot{m}_{fc} = [\dot{m}_{fi} - \dot{m}_{fc}] \frac{1}{\tau_f} + \ddot{m}_{fi} - x\ddot{m}_{fi} \quad (3.20)$$

Considerando la velocidad de inyección constante, es decir $\ddot{m}_{fi} \approx 0$ obtenemos una versión simplificada del sistema de ecuaciones anterior, el cual se muestra en la ecuación [Pfeiffer, 1997].

$$\ddot{m}_{fc} = [\dot{m}_{fi} - \dot{m}_{fc}] \frac{1}{\tau_f} \quad (3.21)$$

siendo

$$\tau_f = 0.05 + \frac{2.25}{w_e} \quad (3.22)$$

El retardo τ_f del combustible a partir de que es inyectado hasta llegar al cilindro es modelado por la ecuación (3.22), sustituyendo en (3.21) se llega a la siguiente expresión, que determina el comportamiento global del combustible [Pfeiffer, 1997, Nevot, 1999, Pushkaraj, 2005].

$$\ddot{m}_{fc} = [\dot{m}_{fi} - \dot{m}_{fc}] \frac{w_e}{(0.05w_e + 2.25)} \quad (3.23)$$

Donde:

- \dot{m}_{fi} : Representa la cantidad de combustible inyectada.
- \dot{m}_{fc} : Cantidad de combustible que llega al cilindro.
- \dot{m}_{ff} : Cantidad del combustible que se queda en las paredes del múltiple en forma líquida.
- τ_f : Tiempo que le toma al combustible depositado en las paredes del múltiple en evaporarse por efecto de la temperatura y entrar al cilindro.

La ecuación (3.23) describe la relación entre el combustible inyectado y la cantidad de éste que alcanza el cilindro. Esta relación es caracterizada por una combinación de retardos propios del proceso de admisión. Los retardos están determinados por el sistema de inyección, por ejemplo un sistema monopunto puesto que solo utiliza un inyector para alimentar a todos los cilindros el retardo será mayor que en uno multipunto. En general mientras más alejado este el inyector de los cilindros mayor será el tiempo que tome al combustible alcanzarlos [Bonnick, 2001, Karmiggelt, 1998].

3.6. Dinámica del torque en un MCI

En el ciclo Otto al presentarse la etapa de fuerza, la mezcla previamente comprimida explota y desplaza el pistón desde PMS a PMI, la fuerza con la que se desplaza el

pistón dependerá de la cantidad, concentración y calidad de la mezcla. Dicha fuerza se transmite mediante el pistón, la biela y el cigüeñal, generando el torque efectivo en el vehículo [Nevot, 1999, Kyu, 2001].

A partir del flujo de combustible \dot{m}_{fc} , entrada de aire \dot{m}_{ao} , la velocidad angular del motor w_e , y la relación aire combustible Afr podemos calcular el torque teórico desarrollado por el MCI, de acuerdo con [Copp, 1998].

$$T_{Gen} = T_{Max} \cdot AFI \cdot CI \cdot \frac{\dot{m}_{ao}}{w_e} \quad (3.24)$$

donde:

T_{Max} : Capacidad máxima de torque para un motor dado.

AFI : Función adimensional normalizada sobre la influencia de la relación aire-combustible, la cual es descrita mediante la siguiente expresión.

$$AFI = \cos(Afr - 13.5) \quad (3.25)$$

Afr : Relación aire-combustible en la cámara de combustión descrito mediante (3.26).

$$Afr = \frac{\dot{m}_{ao}}{\dot{m}_{fc}} \quad (3.26)$$

CI : Función normalizada de la influencia de compresión en el MCI es descrita mediante (3.27).

$$CI = (\cos(CA - MTB))^{2.875} \quad (3.27)$$

Donde:

CA : Ángulo en radianes de ajuste para el avance del cilindro con respecto a PMS (crank angle).

MTB : Parámetro de compensación para lograr el torque óptimo dado en radianes.

3.7. La velocidad en un MCI

La velocidad de giro en un MCI se mide en revoluciones por minuto (RPM). Una precisa estimación de la velocidad, requiere una detallada simulación termodinámica tridimensional del proceso de combustión [Pushkaraj, 2005, Pfeiffer, 1997], sin embargo para propósitos de modelado y control, la velocidad de un motor es considerada como una función estática de las variables involucradas, las cuales al alcanzar su valor estable dentro del proceso de combustión, muestran una misma tendencia cada ciclo [Nevot, 1999, Pushkaraj, 2005, Ghaffari, 2008]. La velocidad en

un MCI es expresada en (3.28).

$$\dot{w}_e = \frac{T_{Gen} - T_f}{I_c} \quad (3.28)$$

Donde:

I_c : Inercia en el cigüeñal.

T_{gen} : Torque generado por la combustión.

T_f : Torque por fricción en el motor.

En un MCI las pérdidas por fricción son afectadas por el coeficiente de viscosidad entre los materiales utilizados en la fabricación del motor así como del lubricante utilizado y depende principalmente de la velocidad angular del cigüeñal. Dichas pérdidas pueden ser modeladas de acuerdo con

$$T_f = 0.115w_e \quad (3.29)$$

La velocidad afecta la eficiencia en un MCI, cuando un motor trabaja por encima de los 5000 RPM, se reduce el tiempo para que la mezcla logre homogenizar y el poder calorífico baje, ya que no existe tiempo suficiente para obtener toda la energía de la combustión, esto sin contar que el calentamiento aumenta en las partes móviles del motor, lo que ocasiona desgaste entre metales.

3.8. Relación de la mezcla aire-combustible

La relación aire combustible está dada por el cociente de la cantidad de aire \dot{m}_{oa} y la cantidad de combustible \dot{m}_{fc} que logra entrar al cilindro para participar en el proceso de combustión.

$$Afr = \frac{\dot{m}_{ao}}{\dot{m}_{fc}} = \frac{k_1 \eta_v m_a w_e}{\dot{m}_{fi} - \dot{m}_{ff} \tau_f} \quad (3.30)$$

La cantidad de aire dependerá principalmente del ángulo del acelerador, este ángulo lo manipula a voluntad el conductor. La acción de control se aplica en la inyección de combustible \dot{m}_{fi} , observando en la ecuación (3.30), la señal de control es el divisor de la relación afectando de manera inversa a nuestra variable a controlar Afr [Kyu, 2001, Gäfvert, 2003, Ghaffari, 2008].

Para llegar a Afr, derivamos con respecto del tiempo a (3.30) y obtenemos,

$$A\dot{f}r = \frac{1}{(\dot{m}_{fc})^2} \left[\dot{m}_{fc} \frac{d}{dt} (k_1 \eta_v m_a w_e) - k_1 \eta_v m_a w_e \ddot{m}_{fc} \right] \quad (3.31)$$

Sustituyendo (3.7) y agrupando términos:

$$\begin{aligned} A\dot{f}r = \frac{k_1}{(\dot{m}_{fc})^2} \left\{ \dot{m}_{fc} \frac{d}{dt} \left[(24.5w_e^2 - 31000w_e) m_a^3 + (-0.167w_e^2 + 222w_e) m_a^2 + \right. \right. \\ \left. \left. (0.00081w_e^2 + 0.352w_e) m_a \right] - \ddot{m}_{fc} \left[(24.5w_e^2 - 31000w_e) m_a^3 \right. \right. \\ \left. \left. + (-0.167w_e^2 + 222w_e) m_a^2 + (0.00081w_e^2 + 0.352w_e) m_a \right] \right\} \quad (3.32) \end{aligned}$$

Derivando (3.32) con respecto de m_a y posteriormente con respecto de w_e llegamos a la expresión (3.33), en la que se tienen polinomios en w_e y m_a que se agrupan en función de las variables de estado \dot{m}_a , \dot{w}_e y \ddot{m}_{fc} .

$$\begin{aligned} A\dot{f}r = \frac{k_1}{(\dot{m}_{fc})^2} \left\{ \dot{m}_{fc} \left\{ \dot{m}_a \left[3m_a^2(24.5w_e^2 - 31000w_e) + 2m_a(-0.167w_e^2 + 222w_e) \right. \right. \right. \\ \left. \left. + (0.00081w_e^2 + 0.352w_e) \right] + \dot{w}_e \left[m_a^3(49w_e - 31000) + m_a^2(-0.334w_e + 222) + \right. \right. \\ \left. \left. m_a(0.00162w_e + 0.352) \right] \right\} - \ddot{m}_{fc} \left[m_a^3(24.5w_e^2 - 31000w_e) \right. \\ \left. + m_a^2(-0.167w_e^2 + 222w_e) + m_a(0.00081w_e^2 + 0.352w_e) \right] \right\} \quad (3.33) \end{aligned}$$

La ecuación (3.33), determina la dinámica de la relación aire-combustible que participa en la combustión.

3.9. Modelo en espacio de estados

La representación de un sistema se torna compleja conforme aumenta el número de variables, por lo que es necesario reducir las expresiones matemáticas, utilizar una

notación matricial y haciendo uso de una computadora para su análisis. Es un marco apropiado la representación en espacio de estado entre otras ventajas en el estudio de sistemas complejos.

Un modelo en el espacio de estados observa en el tiempo las relaciones de las variables que se presentan al interior de un sistema y no sólo la relación entrada - salida. El método divide un modelo de orden “ n ” en n ecuaciones de primer orden; cada una llamada ecuación de estado. En el lado izquierdo de esta ecuación se ubica la derivada del estado; en la derecha, una combinación lineal de todos los estados y la fuente o excitación [Chee, 2009, Pfeiffer, 1997].

La representación de sistemas en el espacio de estado constituye una herramienta de gran utilidad para el análisis y diseño de sistemas de control en el dominio del tiempo. En particular resulta de gran ayuda para el tratamiento de los sistemas multivariable. Esta forma de representación fue desarrollada para el tratamiento de modelos continuos y fue extendida posteriormente a los modelos discretos en razón de los requerimientos impuestos por el control digital.

3.9.1. Modelado de un MCI en espacio de estado

La notación de espacio de estado busca representar por medio de ecuaciones diferenciales de primer orden, llamadas ecuaciones de estado, las relaciones dinámicas internas y externas de los sistemas físicos, que normalmente se representan en forma matricial como

$$\dot{x}(t) = f(x, u) \tag{3.34}$$

El estado es un concepto que se refiere al comportamiento dinámico de un sistema en el tiempo. El estado de un sistema está determinado por el valor del conjunto mínimo de variables que define el comportamiento dinámico del mismo para todo tiempo $t > t_0$ y entendamos como variables de estado al conjunto de variables internas o externas, observables o no, medibles o no, que representan completamente el comportamiento dinámico de un sistema desde el punto de vista de la energía que se almacena en él. La cantidad de variables de estado que se requiere para representar un sistema determina el orden del mismo.

En la presente tesis las variables a considerar son: la cantidad y el flujo de combustible, el flujo de aire, la velocidad del cigüeñal, y la relación aire-combustible; la asignación queda de la siguiente forma.

$$x_1 = m_{fc} \quad (3.35)$$

$$x_2 = \dot{m}_{fc} \quad (3.36)$$

$$x_3 = m_a \quad (3.37)$$

$$x_4 = w_e \quad (3.38)$$

$$x_5 = Afr \quad (3.39)$$

$$u_1 = Tps \quad (3.40)$$

$$u_2 = \dot{m}_{fi} \quad (3.41)$$

Entonces las ecuaciones de estado quedan de la siguiente manera.

Representando la cantidad de combustible que alcanza el cilindro \dot{m}_{fc} se tiene a \dot{x}_1 .

$$\dot{x}_1 = \dot{m}_{fc} = x_2 \quad (3.42)$$

La representación en espacio de estado de la dinámica del combustible dada por la ecuación (3.23), se representa por

$$\dot{x}_2 = (u_2 - x_2) \frac{x_4}{0.05x_4 + 2.25} \quad (3.43)$$

La presentación en espacio de estado de la dinámica del aire dada por la ecuación (3.1), en la que sustituimos (3.2) y (3.5), llegando a

$$\dot{x}_3 = Max \cdot Tc(u_1) \cdot PRI(x_3) - k_1 \eta_v(x_3, x_4) x_3 x_4 \quad (3.44)$$

Para representar en espacio de estado la velocidad angular del cigüeñal utilizamos la ecuación (3.28) y sustituimos (3.29), para llegar a la ecuación (3.45).

$$\dot{x}_4 = \frac{1}{I_c} \left[T_{Max} k_1 \eta_v(x_3, x_4) AFI \cdot CI \cdot x_3 - 0.115x_4 \right] \quad (3.45)$$

La relación aire-combustible se presentó en (3.31), se desarrolló en (3.33) y se representa en espacio de estado en la siguiente expresión.

$$\dot{x}_5 = \frac{k_1}{x_2^2} \left[x_2(\dot{x}_3 P_1(x_3, x_4) + \dot{x}_4 P_2(x_3, x_4)) - \dot{x}_2 P_3(x_3, x_4) \right] \quad (3.46)$$

Donde se introducen $P_1(x_3, x_4)$, $P_2(x_3, x_4)$, $P_3(x_3, x_4)$ polinomios resultantes de derivar x_5 con respecto al tiempo dichos polinomios se muestran en las siguientes ecuaciones.

$$P_1(x) = 3x_3^2(24.5x_4^2 - 31000x_4) + 2x_3(-0.167x_4^2 + 222x_4) + (0.00081x_4^2 + 0.352x_4) \quad (3.47)$$

$$P_2(x) = x_3^3(49x_4 - 31000) + x_3^2(-0.334x_4 + 222) + x_3(-0.00162x_4 + 0.352) \quad (3.48)$$

$$P_3(x) = [x_3^2(24.5x_4 - 31000) + x_3(-0.167x_4 + 222) + x_3(-0.00081x_4 + 0.352)]x_3x_4 \quad (3.49)$$

Se forma un sistema de cinco variables en espacio de estado, de la forma (3.50) con el que trabajaremos en el análisis simulación y diseño del controlador.

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (3.50)$$

El sistema en espacio de estado se representa a continuación, siendo x_5 la variable a controlar y u_2 la variable de control

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = (u_2 - x_2) \frac{x_4}{0.05x_4 + 2.25}$$

$$\dot{x}_3 = Max \cdot Tc(u_1) \cdot PRI(x_3) - k_1 \eta_v(x_3, x_4) x_3 x_4 \quad (3.51)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{1}{I_c} \left[T_{Max} k_1 \eta_v(x_3, x_4) AFI \cdot CI \cdot x_3 - 0.115 x_4 \right]$$

$$\dot{x}_5 = \frac{k_1}{x_2^2} \left[x_2 (\dot{x}_3 P_1(x_3, x_4) + \dot{x}_4 P_2(x_3, x_4)) - \dot{x}_2 P_3(x_3, x_4) \right]$$

La relación entre los subsistemas de aire, combustible, velocidad y relación aire-combustible, se muestra en la Figura B.7.

Capítulo 4

Diseño de Control

4.1. Análisis de estabilidad

En esta sección nos enfocaremos en la estabilidad de los puntos de equilibrio de un sistema en el sentido de Lyapunov. Un punto de equilibrio es estable, si todas las soluciones que inician en la vecindad permanecen en ella; de otra manera el punto de equilibrio es inestable. Se dice que el punto de equilibrio es asintóticamente estable si todas las soluciones que inician en la vecindad, no sólo permanecen en ella, sino que además tienden al punto de equilibrio cuando el tiempo tiende a infinito [Khalil, 1996].

Teorema de estabilidad en el sentido de Lyapunov. Consideremos el sistema:

$$\dot{x} = f(x) \tag{4.1}$$

donde $f : D \rightarrow R^n$ es un mapeo localmente Lipschitz desde un dominio $D \subset R^n$ en R^n . Supongamos que $\bar{x} \in D$ y es un punto de equilibrio del sistema (4.1), entonces $f(\bar{x}) = 0$. El objetivo es caracterizar y estudiar la estabilidad de \bar{x} . Para el análisis trabajaremos en el origen con $\bar{x} = 0$. Esto no representa pérdida de generalidad, dado que cualquier punto de equilibrio puede ser trasladado al origen mediante el cambio de variable $y = x - \bar{x}$. Donde la derivada de y está dada por

$$\dot{y} = \dot{x} = f(x) = f(y + \bar{x}) \Rightarrow g(y), \quad g(0) = 0 \tag{4.2}$$

El sistema en la variable y tiene un punto de equilibrio en el origen, por lo que sin pérdida asumimos que $f(x)$ cumple con $f(0) = 0$ por lo que podemos analizar la

estabilidad en el origen sin pérdida de generalidad [Khalil, 1996].

El punto de equilibrio $x = 0$ del sistema (4.1) es:

- Estable, si para cada $\varepsilon > 0$ existe $\delta = \delta(\varepsilon) > 0$ tal que

$$\|x(0)\| < \delta \Rightarrow \|x(t)\| < \varepsilon \quad \forall t \geq t_0 \quad (4.3)$$

- Inestable, si no es estable.
- Asintóticamente estable (AE) si es estable y δ puede tomarse tal que

$$\|x(0)\| < \delta \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0 \quad (4.4)$$

La definición 4.1 tiene como condición implícita la existencia de la solución para todo $t \geq 0$. La existencia de tal solución no necesariamente está garantizada debido a la Lipchitzidad local de la función $f(x)$, sin embargo con ayuda de las condiciones adicionales del teorema de Lyapunov vamos a garantizar la existencia global de la solución [Khalil, 1996].

Con la definición de estabilidad y estabilidad asintótica dadas previamente, nuestra tarea es la de encontrar estrategias que nos ayuden a determinar la estabilidad del sistema que se analiza. El retrato de fase de un sistema es una buena estrategia, sin embargo se vuelve impráctica para sistemas de orden mayor a 2, por lo que tratando de generalizar una metodología de análisis en sistemas complejos se utiliza el concepto de función de energía.

Definamos la función de energía de un sistema $E(x)$ como la sumatoria de sus energías cinética y potencial, utilizando como referencia la energía del sistema en reposo para el tiempo cero es decir $E(0) = 0$.

En un sistema conservativo la disipación de energía es igual a cero $\frac{dE}{dt} = 0$ es decir el sistema no presenta ninguna clase de pérdidas en su evolución, por lo que $E(x) = c$, formando contornos cerrados en la vecindad del punto de equilibrio, de presentarse éste comportamiento podemos determinar que el punto de equilibrio es un punto de equilibrio estable.

Cuando en un sistema real se toman en cuenta las pérdidas de energía en su evolución, es decir $\frac{dE}{dt} \leq 0$ a lo largo de las trayectorias del sistema, la energía del sistema decrecerá hasta alcanzar el cero conforme el tiempo tienda a infinito.

$$E(x) \rightarrow 0 \Rightarrow t \rightarrow \infty \quad (4.5)$$

Entonces analizando la primera derivada de la función de energía del sistema, es posible determinar la estabilidad de cada uno de los puntos de equilibrio del sistema.

En 1892, Lyapunov muestra que no sólo las funciones de energía pueden usarse para determinar la estabilidad de los puntos de equilibrio de un sistema, por ejemplo la función $V : D \rightarrow R$ continuamente diferenciable en un dominio $D \subset R^n$ que contiene al origen. La derivada de V a lo largo de las trayectorias de 4.1 denotada por $\dot{V}(x)$ esta dada por.

$$\dot{V}(x) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} \dot{x}_i = \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} f_i(x) = \left[\frac{\partial V}{\partial x_1}, \frac{\partial V}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial V}{\partial x_n} \right] \cdot \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix} = \frac{\partial V}{\partial x} f(x) \quad (4.6)$$

La derivada de V a lo largo de las trayectorias de un sistema es dependiente de la ecuación del sistema.

Si $x = 0$ es un punto de equilibrio para el sistema (4.1) y $D \subset R^n$ en un dominio que contiene al origen. Sea $V : D \rightarrow R$ una función continuamente diferenciable tal que

$$V(0) = 0 \quad y \quad V(x) > 0 \quad en \quad D - \{0\} \quad (4.7)$$

$$\dot{V}(x) \leq 0 \quad en \quad D \quad (4.8)$$

Entonces el origen es estable. Además si

$$\dot{V}(x) < 0 \quad en \quad D - \{0\} \quad (4.9)$$

entonces $x = 0$ es asintóticamente estable [Khalil, 1996].

Una función continuamente diferenciable que satisface las condiciones de (4.7) y (4.8) es llamada función de Lyapunov. La superficie $V(x) = c$ se denomina superficie de Lyapunov o superficie de nivel. La condición (4.8) implica que cuando la trayectoria cruza la superficie de Lyapunov $V(x) = c$ entra al conjunto $\Omega_c = \{x \in R^n \mid V(x) \leq c\}$ del cual no podrá salir. Cuando $\dot{V} < 0$, la trayectoria decrece, moviéndose de una superficie de Lyapunov a otra de radio menor, es decir con una c menor. A medida que c decrece, la superficie de Lyapunov $V(x) = c$, se reduce hasta convertirse en un punto situado en el origen cuando $t \rightarrow \infty$. Con lo que podemos concluir que el punto de equilibrio, en este caso el origen es estable por que la

trayectoria puede ser encerrada en cualquier esfera B_ϵ cumpliendo con que el estado inicial $x(0)$ sea parte de una superficie de Lyapunov contenida en dicha esfera B_ϵ .

Una función $V(x)$ que satisface la condición (4.7) es llamada función definida positiva. Si satisface $V(x) \geq 0$ para $x \neq 0$, se dice función semi definida positiva. Una función se dice definida negativa o semi definida negativa si $-V(x)$ es definida positiva o semi definida positiva, respectivamente. Si $V(x)$ no tiene signo definido, se dice que es una función indefinida.

Entonces el teorema de Lyapunov se puede enunciar de la siguiente manera:

El origen de un sistema es estable si existe una función definida positiva $V(x)$ y continuamente diferenciable tal que $\dot{V}(x)$ es semi definida negativa, o bien el origen del sistema será asintóticamente estable si \dot{V} es definida negativa.

4.1.1. Estabilidad asintótica global

Sea $\phi(t, x)$ una solución del sistema (4.1) que inicia en un tiempo cero, además suponemos que el origen $x = 0$ es un punto de equilibrio asintóticamente estable. Se define como región de atracción del punto de equilibrio al conjunto de soluciones x tal que $\lim_{t \rightarrow \infty} \phi(t, x) = 0$. En muchos casos resulta bastante complejo encontrar analíticamente la región de atracción. Sin embargo se puede estimar un conjunto contenido en esta región, con la ayuda de la función de Lyapunov. El Teorema 4.1 nos indica que de existir una función de Lyapunov que satisfaga las condiciones de estabilidad asintótica en un dominio D y $\Omega_c = \{x \in R^n \mid V(x) \leq c\}$, entonces toda trayectoria que inicia en Ω_c permanece en Ω_c y decrementa tendiendo al origen conforme $t \rightarrow \infty$.

Buscando las condiciones para que la región de atracción sea igual al espacio R^n , se puede probar si para todo estado inicial x , la trayectoria $\phi(t, x)$ tiende al origen cuando $t \rightarrow \infty$, sin importar la magnitud de $\|x\|$. Si se presenta esta característica en un punto de equilibrio asintóticamente estable, y además se dice que el punto de equilibrio es globalmente asintóticamente estable.

Barbashin - Krasovskii [Khalil, 1996].

Sea el origen un punto de equilibrio del sistema 4.1 y sea $V : R^n \rightarrow R$ una función continuamente diferenciable tal que

$$V(0) = 0 \quad y \quad V(x) > 0 \quad \forall x \neq 0 \tag{4.10}$$

$$\|x\| \rightarrow \infty \implies V(x) \rightarrow \infty \quad (4.11)$$

$$\dot{V}(x) < 0 \quad \forall x \neq 0 \quad (4.12)$$

Entonces se dice que $x = 0$ es globalmente asintóticamente estable.

4.2. Región de atracción

Sea el origen $x = 0$ un punto de equilibrio asintóticamente estable del sistema no lineal

$$\dot{x} = f(x) \quad (4.13)$$

donde $f : D \rightarrow R^n$ es localmente Lipschitz y $D \subset R^n$ es un dominio que contiene al origen. Sea $\phi(t; x)$ la solución del sistema (4.13), con estado inicial x en $t = 0$, entonces su región de atracción R_A del origen se define como en (4.14).

$$R_A = \{x \in D \mid \phi(t; x) \rightarrow 0 \text{ cuando } t \rightarrow \infty\} \quad (4.14)$$

Si el origen es un punto de equilibrio asintóticamente estable del sistema (4.13), entonces su región de atracción R_A es un conjunto conexo e invariante.

4.3. Estabilidad de Lyapunov

Estabilidad de Lyapunov.

Consideremos el sistema inestacionario de (4.15).

$$\dot{x} = f(t, x) \quad (4.15)$$

donde $f : [0, \infty) \times D \rightarrow R^n$ es continua en t y localmente Lipschitz en x en $[0, \infty) \times D$, y $D \subset R^n$ es un dominio que contiene al origen $x = 0$. El origen es un punto de equilibrio del sistema (4.15) para $t = 0$ si

$$f(t, 0) = 0, \quad \forall t \geq 0 \quad (4.16)$$

Un equilibrio en el origen puede ser la translación de un punto de equilibrio que no está precisamente en cero o más generalmente, la translación de una solución no nula del sistema. Para ver este último punto, supongamos que $\tilde{y}(\tau)$ es una solución del sistema (4.17).

$$\frac{dy}{d\tau} = g(\tau, y) \quad (4.17)$$

definida para todo $\tau \geq a$. El cambio de variables

$$x = y - \tilde{y}(\tau); \quad t = \tau - a$$

transformar al sistema (4.17) en la forma de

$$\dot{x} = g(t + a, x + \tilde{y}(t + a)) - \dot{\tilde{y}}(t + a) \triangleq f(t, x) \quad (4.18)$$

y como

$$\dot{\tilde{y}}(t + a) = g(t + a, \tilde{y}(t + a)), \quad \forall t \geq 0 \quad (4.19)$$

el origen es un punto de equilibrio del sistema transformado (4.18) para $t = 0$ por lo tanto, probaremos la estabilidad del origen considerándolo como un punto de equilibrio del sistema transformado, para determinar la estabilidad de la solución $\tilde{y}(\tau)$ del sistema original. es importante tener en cuenta que si $\tilde{y}(\tau)$ no es un valor constante, el sistema transformado es inestacionario aunque el sistema original sea estacionario. Por lo que el análisis de estabilidad de soluciones en sentido de Lyapunov solo puede ser aplicado a puntos de equilibrio de sistemas inestacionarios.

El punto de equilibrio $x = 0$ del sistema 4.15 es:

- Estable, si para cada $\epsilon > 0$ existe $\delta = \delta(\epsilon, t_0) > 0$ tal que

$$\|x(t_0)\| < \delta \Rightarrow \|x(t)\| < \epsilon, \quad \forall t \geq 0 \quad (4.20)$$

- Uniformemente estable, si para cada $\epsilon > 0$ existe $\delta = \delta(\epsilon) > 0$, independiente-mente de t_0 , tal que la ecuación (4.20) se satisface.

- *Inestable, si no es estable.*
- *Asintóticamente estable, si es estable y existe $c = c(t_0)$ tal que $x(t) \rightarrow 0$ cuando $t \rightarrow \infty$, para todo $\|x(t_0)\| < c$.*
- *Uniformemente asintóticamente estable, si es uniformemente estable y además existe $c > 0$ independiente de t_0 tal que para todo $\|x(t_0)\| < c$, $x(t) \rightarrow 0$ mientras $t \rightarrow \infty$, uniformemente en t_0 ; es decir, para cada $\epsilon > 0$ existe $T = T(\epsilon)$ tal que*

$$\|x(t)\| < \epsilon, \forall t \geq t_0 + T(\epsilon), \forall \|x(t_0)\| < c \quad (4.21)$$

- *Globalmente uniformemente asintóticamente estable, si es uniformemente estable y para cada par de números positivos ϵ y c , existe $T = T(\epsilon, c)$ tal que*

$$\|x(t)\| < \epsilon, \forall t \geq t_0 + T(\epsilon, c), \forall \|x(t_0)\| < c \quad (4.22)$$

4.4. Diseño de la referencia

Los residuos de la combustión dependen en gran medida de la composición química del combustible utilizado, el combustible más usado es la gasolina, la cual es un derivado del petróleo, está constituida por una mezcla de hidrocarburos en estado líquido en condiciones ambientales normales. El poder calorífico para la gasolina oscila entre los 40.2 MJ/Kg del benceno y 45.4 MJ/Kg del pentano [Evlampiev, 2007, Yacoub 1999].

El oxígeno necesario para formar la mezcla combustible se toma del aire atmosférico, el aire se forma principalmente por nitrógeno y oxígeno. El llenado de los cilindros se produce por aspiración, durante la carrera descendente del pistón, mientras que la válvula de admisión se encuentra abierta, la cantidad de aire que logra entrar al cilindro depende directamente del ángulo de la mariposa del acelerador así como de la eficiencia volumétrica [Kyu, 2001, Larses, 2005].

Con la finalidad de reducir las contaminaciones a la atmósfera se introducen los catalizadores, elementos que ayudan a descomponer los gases producidos en la combustión, en elementos menos nocivos para el medio ambiente. Estos catalizadores operan únicamente con una pequeña cantidad de oxígeno residual presente en los gases de escape, por lo que la relación aire-combustible debe de ser regulada de tal forma que todos los hidrocarburos del combustible logren oxidarse en su grado

máximo; sin embargo, no es fácil establecer un punto óptimo de operación de un motor, tal que se tenga un nivel bajo de emisiones de CO , HC y NO_x a la vez. Existe una fuerte dependencia de una serie de factores que se deben considerar, siendo uno de los más importantes la relación aire-combustible [Bonnick, 2001], como se observa en la Figura 4.1.

Un punto clave para la solución en el problema de contaminación atmosférica es la influencia de la relación aire-combustible en la potencia generada por el MCI y los niveles de emisión de los distintos contaminantes.

Cuando se trabaja con una mezcla rica, se incrementan las emisiones contaminantes a la atmósfera de hidrocarburos sin quemar (HC), monóxido de carbono (CO). Por otro lado cuando se trabaja con una mezcla pobre se produce más del 50% de óxido de nitrógeno (NO_x). Debido a esto se debe de trabajar con la cantidad estequiométrica entre aire y combustible.

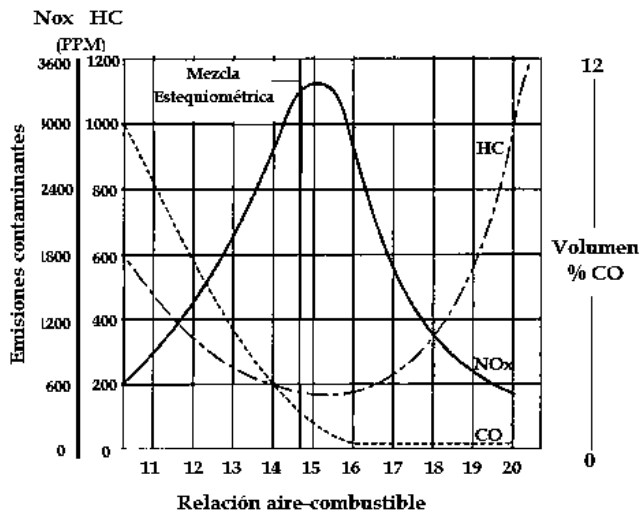


Figura 4.1: Influencia aire-combustible y emisiones contaminantes [Weaver 1993].

4.4.1. Concentración estequiométrica

La estequiometría (del griego στοιχειον, stoicheion, 'elemento' y μετρον, métrón, 'medida') es una rama de la química que se centra en el cálculo de relaciones cuantitativas entre los reactivos en el transcurso de una reacción química. Estas relaciones se pueden deducir a partir de la teoría atómica [Wu 2011, Velasco, 2011, Shamdani, 2008].

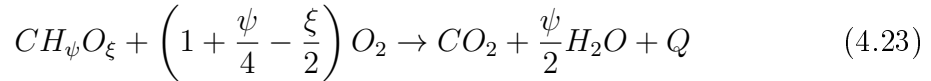
En este apartado vamos a realizar un balance químico en el proceso de la combustión para demostrar que un mol de combustible requiere de 14.7 moles de aire para oxidarse completamente de acuerdo a la relación (4.23).

Considerando que la gasolina tiene una fórmula genérica $C_xH_yO_z$, se definen los siguiente parámetros:

$\psi = y/x = (1.008/12.01) (H/C)_{masica} \implies$ Relación atómica hidrógeno y carbono.

$\xi = z/x = (16/12.01) (O/C)_{masica} \implies$ Relación atómica oxígeno y carbono.

Podemos plantear la fórmula química del proceso de una combustión completa de la siguiente manera



Se define una concentración estequiométrica como la relación del caudal másico de aire y de combustible necesario para la combustión completa, según la ecuación anterior (4.23), y considerando que el aire contiene un 20.95% de O_2 , la combustión de 1 mol de combustible requiere de:

$$\frac{100}{20.95} \left(1 + \frac{\psi}{4} - \frac{\xi}{2}\right) = 4.773 \left(1 + \frac{\psi}{4} - \frac{\xi}{2}\right) \quad (4.24)$$

moles de aire.

Un mol de aire pesa 28.96g y un mol de gasolina pesa $(12.1 + 1.008\psi + 16\xi)$ y dividiendo la masa de aire entre la masa de gasolina obtenemos:

$$Afr = \frac{28.96 * 4.773 * \left(1 + \frac{\psi}{4} - \frac{\xi}{2}\right)}{12.1 + 1.008\psi + 16\xi} \quad (4.25)$$

Considerando la relación atómica hidrógeno-carbono y oxígeno-carbono son respectivamente de $\psi \approx 6.12$ y $\xi \approx 0.304$ se obtiene una relación aire-combustible (Afr) comprendido entre 14 y 15, usando típicamente 14.7. Es decir por cada partícula-

la de combustible se requieren exactamente 14.7 partículas de oxígeno, para obtener una concentración estequiométrica lo que nos permitirá trabajar con una combustión completa aumentando la eficiencia energética y reducir emisiones contaminantes[Velasco, 2011].

4.5. Solución del problema

Como se ha mencionado anteriormente el sistema que desarrollaremos en esta fase es un sistema no lineal $\dot{x} = f(x) + g(x)u$ cuyas ecuaciones matemáticas se han estructurado desde (3.42) hasta (3.46) en el capítulo 3, las cuales se retoman para la solución del problema.

Para ello definiremos las siguientes variables de estado:

- Dinámica de combustible.
- Caudal de aire en el múltiple de admisión.
- Velocidad angular en el cigüeñal.
- Relación aire-combustible.

En la sección 3.5, se analiza la dinámica de combustible, combinando las ecuaciones (3.10), (3.11), (3.12), (3.14) y (3.20), para llegar a (4.27).

$$\dot{x}_1 = \dot{m}_{fc} \quad (4.26)$$

$$\dot{x}_2 = (u_2 - x_2) \frac{x_4}{0.05x_4 + 2.25} \quad (4.27)$$

La dinámica del combustible se implementa de acuerdo al diagrama mostrado en la Figura B.4

De acuerdo con el desarrollo de (3.1) y combinación de (3.2), (3.3), (3.4) en la sección 3.4 del capítulo 3, el caudal de aire en el múltiple de admisión está dado por (4.28) y su implementación se muestra en la Figura B.3

$$\dot{x}_3 = Max \cdot Tc(u_1) \cdot PRI(x_3) - k_1 \eta_v(x_3, x_4) x_3 x_4 \quad (4.28)$$

El torque y velocidad en el cigüeñal está dado por (4.29), la cual resulta del análisis previo de las ecuaciones (3.24), (3.25), (3.26) y (3.27) en la sección 3.6 y se muestra su implementación en la figura B.5.

$$\dot{x}_4 = \frac{1}{I_c} \left[T_{Max} k_1 \eta_v(x_3, x_4) AFI \cdot CI \cdot x_3 - 0.115x_4 \right] \quad (4.29)$$

La relación aire-combustible es la variable de estado que nos interesa controlar, ésta surge de la combinación del caudal del aire y del combustible dado por las ecuaciones (3.30) y (3.31) de la sección 3.8, se expresa en (4.30) donde se muestran los polinomios $P_1(x_3, x_4)$, $P_2(x_3, x_4)$ y $P_3(x_3, x_4)$ previamente obtenidos en el capítulo tres en las ecuaciones (3.47), (3.48) y (3.49). El diagrama de implementación se muestra en la Figura B.6.

$$\dot{x}_5 = \frac{k_1}{x_2^2} \left[x_2(\dot{x}_3 P_1(x_3, x_4) + \dot{x}_4 P_2(x_3, x_4)) - \dot{x}_2 P_3(x_3, x_4) \right] \quad (4.30)$$

y la presentación en espacio de estado del sistema no lineal $\dot{x} = f(x)$ de acuerdo a lo mencionado en la sección 3.9 se puede estructurar de la forma (4.31).

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 \\ (u_2 - x_2) \frac{x_4}{0.05x_4 + 2.25} \\ Max \cdot Tc(u_1) \cdot PRI(x_3) - k_1 \eta_v(x_3, x_4) x_3 x_4 \\ \frac{1}{I_c} [T_{Max} k_1 \eta_v(x_3, x_4) AFI \cdot CI \cdot x_3 - 0.115x_4] \\ \frac{k_1}{x_2^2} [x_2(\dot{x}_3 P_1(x_3, x_4) + \dot{x}_4 P_2(x_3, x_4)) - \dot{x}_2 P_3(x_3, x_4)] \end{pmatrix} \quad (4.31)$$

De acuerdo a la expresión (4.25) buscaremos la regulación del estado x_5 del sistema (4.31), utilizando técnicas de Lyapunov dado que nuestro sistema cumple con las condiciones que se han detallado en 4.1. Para ello utilizaremos una función conocida como candidata de Lyapunov que consiste en una función de energía del sistema analizado que debe satisfacer las siguientes características [Khalil, 1996].

Según el teorema de estabilidad de Lyapunov 4.1 un sistema es estable si

- $V > 0$ Positiva definida.
- $\dot{V} < 0$ Negativa definida.

Utilizando una expresión de error del estado \dot{x}_5 para obtener la función de energía del sistema o candidata de Lyapunov de acuerdo con (4.6).

$$e = Afr_d - Afr \quad (4.32)$$

Donde:

$$Afr = \frac{k_1 \eta_v m_a w_e}{\dot{m}_{fc} - \ddot{m}_{fi} \tau_f} \quad (4.33)$$

y el término $Afr_d = 14.7$ es la constante estequiométrica entre el aire y combustible que nos garantiza una combustión completa como se indicó en (4.4). Note que al derivar el error e en (4.32) llegamos a la expresión para el error de estado \dot{e} de la forma (4.34) donde se involucra el aire que entra al múltiple de admisión, el régimen de giro y el combustible inyectado. Esta expresión cumple con las condiciones para ser la función de energía del sistema según (4.6) y aplicar el segundo criterio de estabilidad de Lyapunov.

$$\dot{e} = \frac{k_1}{x_2^2} \left[x_2 (\dot{x}_3 P_1(x_3, x_4) + \dot{x}_4 P_2(x_3, x_4)) - \dot{x}_2 P_3(x_3, x_4) \right] \quad (4.34)$$

expresando \dot{e} en términos de la entrada de control u_2 , se sustituye la dinámica del combustible \dot{x}_2 de acuerdo con (3.43) llegando a la ecuación (4.35).

$$\dot{e} = \frac{k_1}{x_2^2} \left[x_2 (\dot{x}_3 P_1(x_3, x_4) + \dot{x}_4 P_2(x_3, x_4)) - (u_2 - x_2) \frac{x_4 P_3(x_3, x_4)}{0.05x_4 + 2.25} \right] - 0 \quad (4.35)$$

Proponiendo una entrada de control de la forma (4.36).

$$u_2 = \frac{x_2}{x_4 P_3} \{ \dot{x}_3 P_1(x_3, x_4) + \dot{x}_4 P_2(x_3, x_4) \} \{ 0.05x_4 + 2.25 \} + x_2 - Mke \quad (4.36)$$

donde $-Mke$ es el término de regulación y k la ganancia de control.

Lema 4.5: Considerando que la entrada u_2 solamente puede tomar valores positivos y haciendo uso de las propiedades de Banach para un espacio normado, podemos asumir que la entrada de control u_2 será menor a su norma $|u_2|$ en cualquier instante distinto de cero, es decir $u_2 \leq |u_2|$ para todo $t \geq 0$ y $|u_2| = 0$ si y solo si $u_2 = 0$.

De acuerdo al criterio de Lyapunov 4.1 definimos como función candidata para nuestro sistema la expresión 4.37.

$$V = \frac{1}{2}e^2 \quad (4.37)$$

Claramente se aprecia que la función de energía del sistema (4.37) es definida positiva. La derivada se expresa en (4.38), y bastará con asegurar que (4.38) es definida negativa, para cumplir con ?? y garantizar estabilidad del sistema (4.31) particularmente en la variable de estado x_5 .

$$\dot{V} = e\dot{e} \quad (4.38)$$

Sutituyendo (4.32) y (4.35) en (4.38) llegamos a la expresión (4.39) la cual debe de ser definida negativa según la condición de estabilidad dada por (4.8).

$$\dot{V} = \{e\} \left\{ \frac{k_1}{x_2^2} \left[x_2 (\dot{x}_3 P_1(x_3, x_4) + \dot{x}_4 P_2(x_3, x_4)) - (u_2 - x_2) \frac{x_4 P_3(x_3, x_4)}{0.05x_4 + 2.25} \right] \right\} \quad (4.39)$$

Al sustituir la entrada de control propuesta (4.36) y aplicando el lema 4.5 en (4.39) se obtiene la expresión (4.40).

$$\dot{V} \leq \{Afr_d - Afr\} \left\{ \frac{k_1}{x_2^2} \left[x_2 (\dot{x}_3 P_1(x_3, x_4) + \dot{x}_4 P_2(x_3, x_4)) - \frac{x_4 P_3(x_3, x_4)}{0.05x_4 + 2.25} \right. \right. \\ \left. \left. \left(\frac{x_2}{x_4 P_3} \{ \dot{x}_3 P_1(x_3, x_4) + \dot{x}_4 P_2(x_3, x_4) \} \{ 0.05x_4 + 2.25 \} + x_2 - Mke - x_2 \right) \right] \right\} \quad (4.40)$$

Reduciendo términos en (4.40) llegamos a la expresión (4.44).

$$\dot{V} \leq \{e\} \left\{ \frac{k_1}{x_2^2} \left[x_2 (\dot{x}_3 P_1(x_3, x_4) + \dot{x}_4 P_2(x_3, x_4)) - \left(-x_2 \{ \dot{x}_3 P_1(x_3, x_4) + \dot{x}_4 P_2(x_3, x_4) \} + x_2 - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. Mke \frac{x_4 P_3(x_3, x_4)}{0.05x_4 + 2.25} \right) \right] \right\} \quad (4.41)$$

$$\left. \left. \left. Mke \frac{x_4 P_3(x_3, x_4)}{0.05x_4 + 2.25} \right) \right] \right\} \quad (4.42)$$

$$\dot{V} \leq e \left\{ \frac{-k_1}{x_2^2} \frac{Mk(e)x_4P_3(x_3, x_4)}{(0.05x_4 + 2.25)} \right\} \quad (4.43)$$

y finalmente.

$$\dot{V} \leq e^2 \left\{ \frac{-k_1}{x_2^2} \frac{Mk \cdot x_4P_3(x_3, x_4)}{(0.05x_4 + 2.25)} \right\} \quad (4.44)$$

El término M se propone de la forma (4.45) con la finalidad de visualizar claramente la estabilidad del sistema, al cumplirse que \dot{V} sea negativa definida. De acuerdo con (4.44).

$$M = \frac{x_2^2(0.05x_4 + 2.25)}{k_1x_4P_3(x_3, x_4)} \quad (4.45)$$

al sustituir el término M en (4.44) se obtiene la expresión

$$\dot{V} \leq -ke^2 \quad (4.46)$$

siendo k la ganancia de control.

Entonces podemos concluir que al aplicar la señal de entrada propuesta en (4.36), al sistema (4.31) y obteniendo una función de energía para el sistema en base al error (4.32) cuya derivada sea definida negativa de acuerdo con (4.9) y (4.12) entonces el sistema inestacionario perderá energía en su evolución y será posible operar el sistema en la región de estabilidad deseada.

4.5.1. Señal de control propuesta

La señal de control propuesta en (4.36) se obtiene a partir de la expresión (4.39) igualando a cero y despejando para u_2 como se muestra en (4.47) y (4.48).

$$\dot{V} = \{e\} \left\{ \frac{k_1}{x_2^2} \left[x_2 (\dot{x}_3P_1(x_3, x_4) + \dot{x}_4P_2(x_3, x_4)) - (u_2 - x_2) \frac{x_4P_3(x_3, x_4)}{0.05x_4 + 2.25} \right] \right\} = 0 \quad (4.47)$$

se busca una señal de control u_2 tal que las desviaciones del estado \dot{x}_5 sean mínimas.

$$u_2 = \frac{x_2}{x_4P_3} \{ \dot{x}_3P_1(x_3, x_4) + \dot{x}_4P_2(x_3, x_4) \} \{ 0.05x_4 + 2.25 \} + x_2 \quad (4.48)$$

Se agrega el término $-Mke$ como elemento de regulación, llegando a la solución propuesta en (4.49) que es de la forma utilizada en (4.36) para el análisis de estabilidad.

$$u_2 = \frac{x_2}{x_4 P_3} \{ \dot{x}_3 P_1(x_3, x_4) + \dot{x}_4 P_2(x_3, x_4) \} \{ 0.05x_4 + 2.25 \} + x_2 - Mke \quad (4.49)$$

4.6. Implementación del control

El diagrama de control implementado en simulink a partir del análisis de estabilidad se observa en la figura B.8 donde se conectan las relaciones de la sección 4.5 con el modelo de planta utilizada en la sección 3.9 y entonces realizar los experimentos que se presentarán el siguiente capítulo[Murray, 1994].

Al utilizar la estrategia de control mostrada en la Figura B.8 se dosifica la cantidad de combustible inyectado regulando la concentración de la mezcla aire-combustible a un valor estequiométrico. Dicho de otra manera el control garantiza una relación de 14.7 partículas de aire por cada partícula de combustible dentro de la cámara de combustión, como se muestran los resultados en el capítulo 6.

Capítulo 5

Resultados

En la presente tesis se realizó una investigación de la estrategia de control aplicada en sistemas automotrices, dando una breve descripción de las partes y funcionamiento de un motor de combustión interna, se analizaron y modelaron matemáticamente sus principales dinámicas como son aire, combustible, torque y velocidad, enfocándonos en la relación aire-combustible como variable a controlar. Posteriormente basados en el segundo criterio de Lyapunov, se diseño la estrategia de control denominada “Regulación por Retroalimentación del Error de Estado”.

5.1. Resultados en simulación

En la operación de un MCI la variación del ángulo α se toma como entrada la cual es totalmente dependiente del conductor y de las condiciones de manejo en las que se encuentre el vehículo. Con la finalidad de validar los resultados en un amplio rango de operación, se utilizan dos distintas secuencias de aceleración y desaceleración como se muestra en las gráficas 5.1 y 5.8.

La dinámica del aire en el múltiple de admisión depende fuertemente del ángulo α , y el control se encargará de dosificar el combustible necesario para mantener la relación aire-combustible en el valor deseado. La velocidad, aceleración angular y el torque generado en el cigüeñal será proporcional a la cantidad, calidad y concentración de la mezcla que entra a la cámara de combustión.

Las variables presentadas primeramente para la secuencia de aceleración 1 y posteriormente para la secuencia de aceleración 2 son:

- La secuencia en la variación del ángulo α .

- El flujo de combustible en el cilindro.
- Flujo de Aire en el múltiple de admisión.
- Velocidad angular del cigüeñal.
- Aceleración angular del cigüeñal.
- Relación Aire-combustible lazo abierto.
- Relación Aire-combustible regulado.

La primera secuencia de aceleración es de 20 segundos representada por dos rampas que comprenden aceleración continua, aceleración sostenida, desaceleración continua y aceleración mínima, con la finalidad trabajar en un amplio rango del ángulo α y posibles situaciones de manejo como se muestra en 5.1, el ángulo α va de 0 a 1.5 radianes, lo que equivale de 0 a 90 grados.

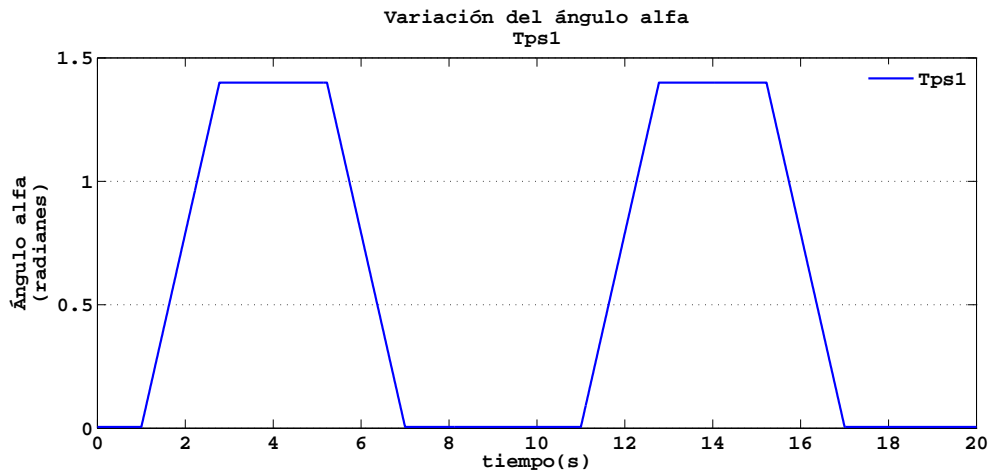


Figura 5.1: Secuencia de aceleración Tps1.

El flujo de combustible que logra entrar en el cilindro se muestra en la Figura 5.2, el caudal dependerá del tiempo de apertura del inyector t_i de acuerdo con 3.9 el cual es controlado directamente por la ECU. En la figura se considera al caudal como continuo, en realidad el aumento y disminución de combustible se logra con la modulación del ancho de pulso aplicado al inyector.

El Flujo de aire que en el múltiple de admisión depende por un lado de la forma y dimensiones del cuerpo de aceleración y variará de acuerdo a la apertura o cierre del ángulo α y por el otro de la cantidad de aire que entre a los cilindros, la entrada de

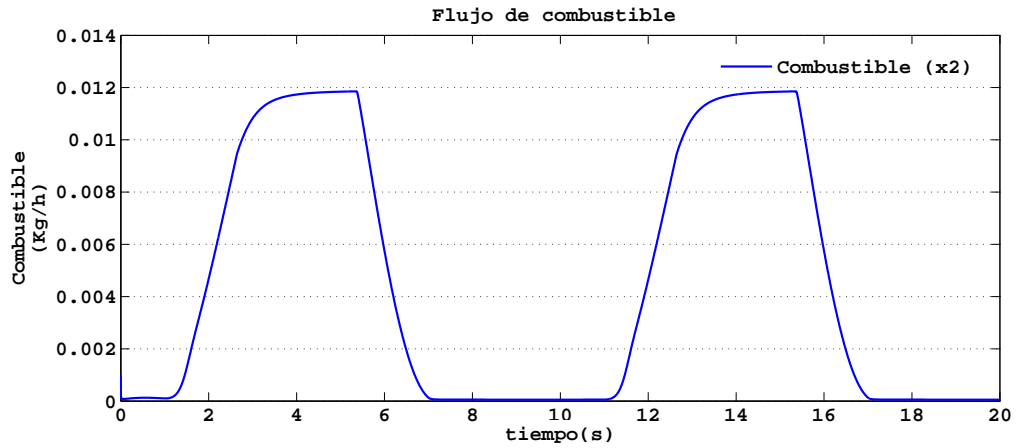


Figura 5.2: Flujo de combustible en el cilindro \dot{x}_2 Tps1.

aire es manipulada directamente por el conductor mediante el pedal del acelerador y la salida dependerá del régimen de giro del motor como se muestra en la Figura 5.3.

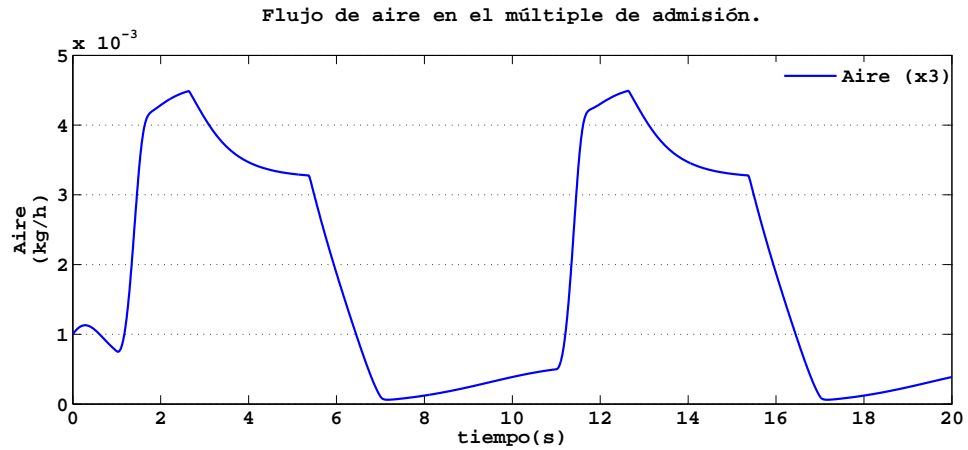


Figura 5.3: Flujo de aire en el múltiple de admisión \dot{x}_3 Tps1.

La velocidad angular del cigüeñal se expresa en rad/s, de acuerdo con la Figura 5.4 cuando α es máximo se alcanza una velocidad de 800 rad/s equivalente a unas 8000 revoluciones por minuto. La velocidad muestra un comportamiento dependiente del ángulo α y la entrada de aire, lo que nos valida el modelo utilizado.

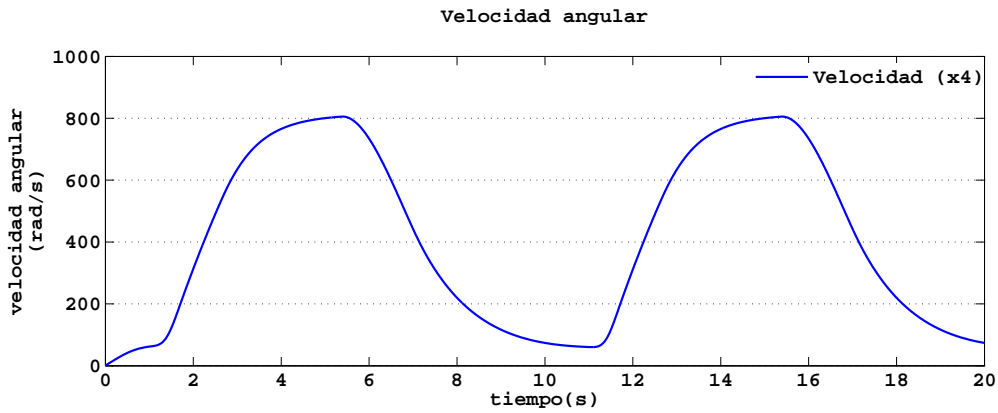


Figura 5.4: Velocidad angular \dot{x}_4 Tps1.

El torque y la aceleración en el cigüeñal no forman parte de nuestro modelo en espacio de estado, sin embargo se muestran a continuación como parámetros de interés en el funcionamiento de un motor de combustión interna. En la Figura 5.5 se observa el torque generado.

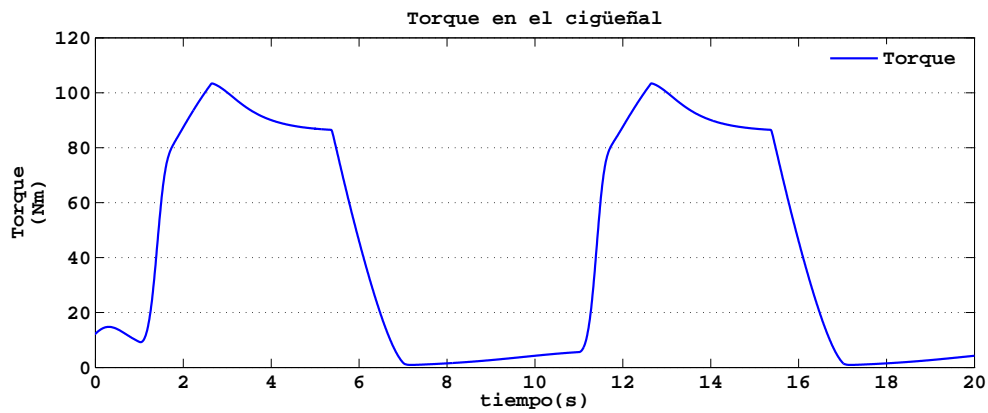


Figura 5.5: Torque generado en el cigüeñal Tps1.

La aceleración angular del cigüeñal contiene valores positivos y la desaceleración valores negativos como se muestra en la Figura 5.6, éstas se presentan solamente cuando existe una variación en el ángulo α y son igual a cero cuando éste se mantiene constante.

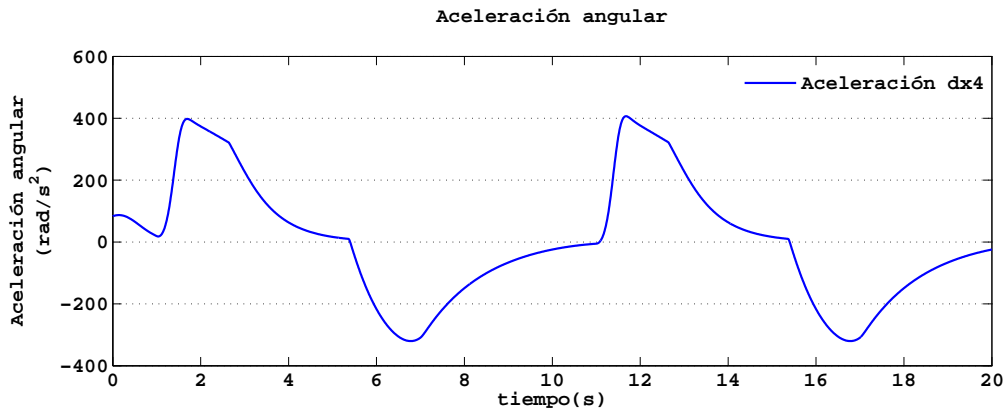


Figura 5.6: Aceleración angular \ddot{x}_4 Tps1.

La relación aire-combustible x_5 se muestra en lazo abierto en la Figura 5.7, la única regulación se da por la estimación del flujo de aire y dividiendo este valor entre 14.7, para determinar el combustible a inyectar. Las desviaciones de Afr se incrementan durante la aceleración (mezcla pobre) y desaceleración (mezcla rica). En la sección 5.2, retomaremos el comportamiento de x_5 haciendo énfasis en las variaciones de la ganancia de control k .

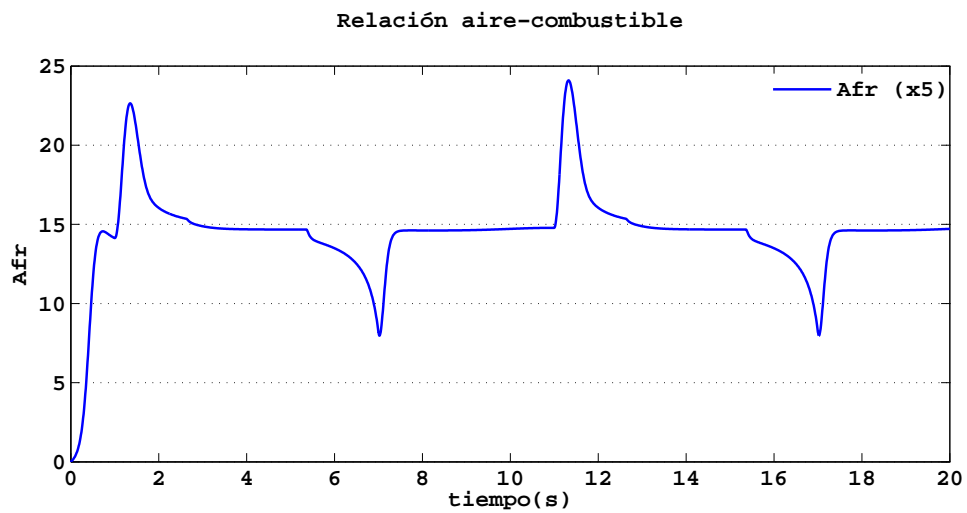


Figura 5.7: Relación aire-combustible \dot{x}_5 Tps1.

Con la idea de validar el comportamiento del modelo se emplea una segunda secuencia de aceleración analizando de manera análoga las variables y parámetros de importancia en el funcionamiento del motor de combustión interna. La segunda secuencia presenta aceleraciones mayores, así como cambios abruptos en el ángulo α simulando una manejo habitual de un vehículo como se muestra en la Figura 5.8.

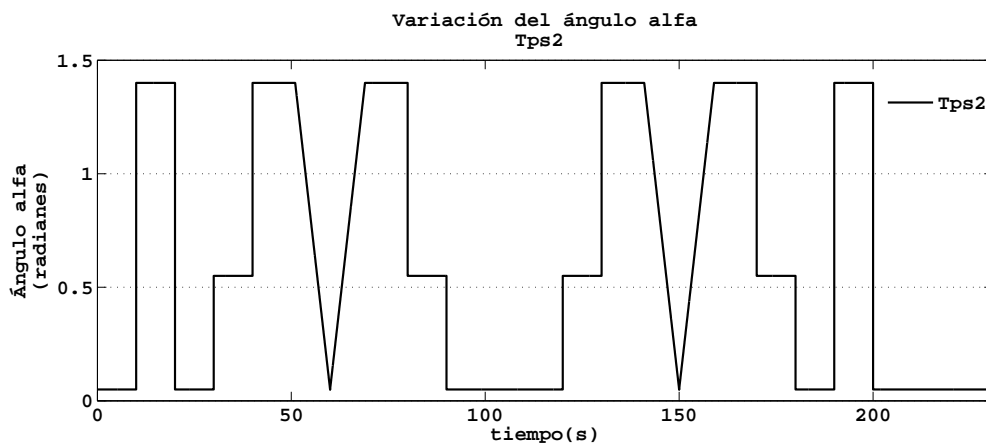


Figura 5.8: Secuencia de aceleración Tps2.

De igual manera que para la secuencia de aceleración Tps1 el flujo de combustible que logra entrar en el cilindro se muestra en la Figura 5.9, el caudal dependerá del tiempo de apertura del inyector t_i de acuerdo con 3.9 el cual es controlado directamente por la ECU.

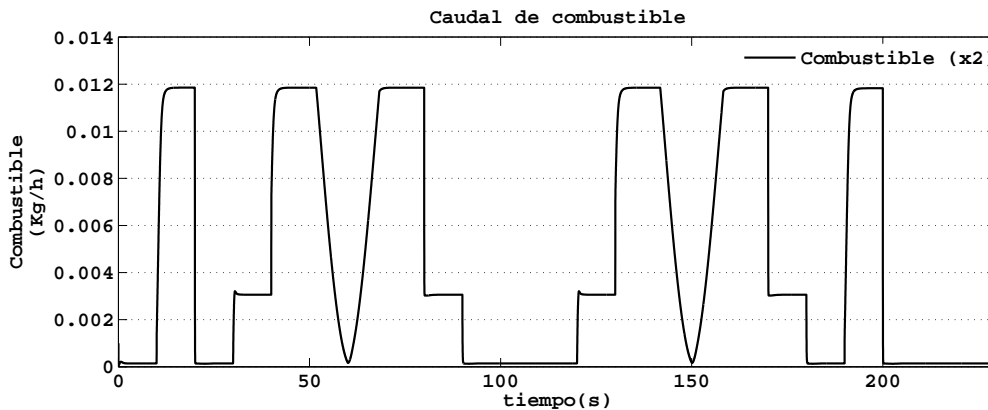


Figura 5.9: Caudal de combustible \dot{x}_2 Tps2.

Como en el caso anterior el flujo de aire que en el múltiple de admisión depende por un lado de la forma y dimensiones del cuerpo de aceleración y variará de acuerdo

a la apertura o cierre del ángulo α y por el otro de la cantidad de aire que entre a los cilindros, la entrada de aire es manipulado directamente por el conductor mediante el pedal del acelerador y la salida dependerá del régimen de giro del motor como se muestra en la Figura 5.10.

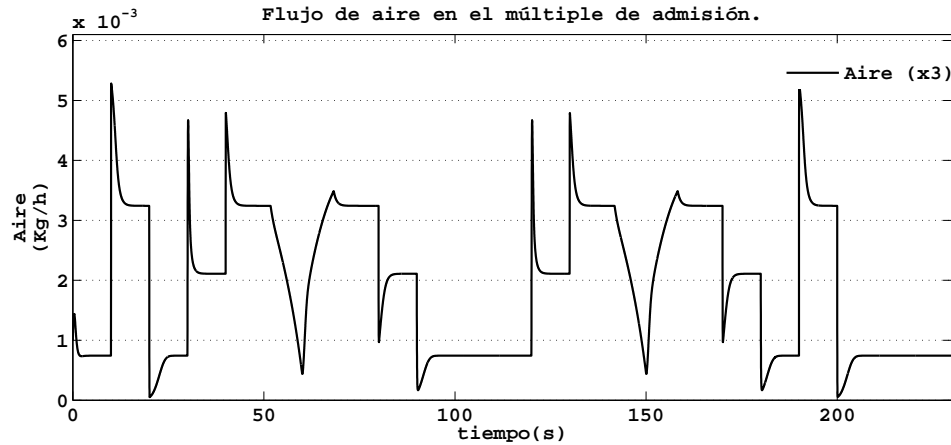


Figura 5.10: Flujo de aire en el múltiple de admisión \dot{x}_3 Tps2.

La velocidad angular del cigüeñal se expresa en rad/s, de acuerdo con la Figura 5.11. La velocidad muestra un comportamiento dependiente del ángulo α que sigue la forma de la secuencia de aceleración Tps2, lo que nos valida el modelo utilizado.

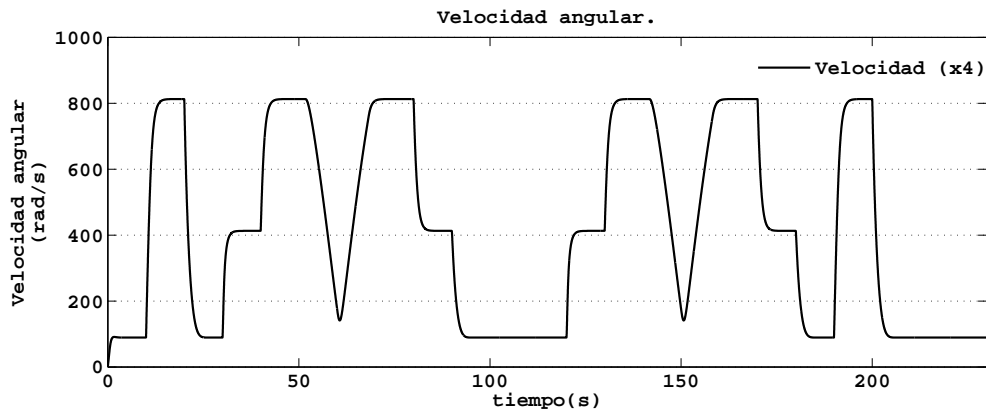


Figura 5.11: Velocidad angular \dot{x}_4 Tps2.

El torque y la aceleración en el cigüeñal se muestran a continuación como parámetros de interés en el funcionamiento de un motor de combustión interna. En la Figura 5.12 se observa el torque generado.

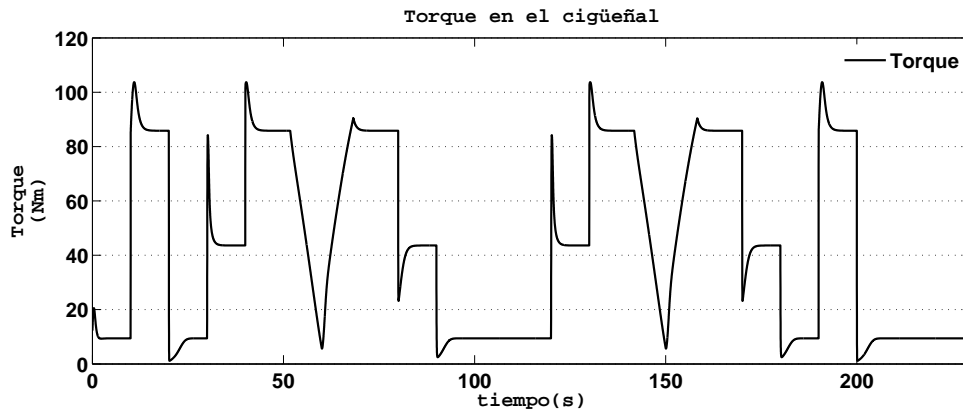


Figura 5.12: Torque generado en el cigüeñal Tps2.

La aceleración angular del cigüeñal contiene valores positivos y la desaceleración valores negativos como se muestra en la Figura 5.13, éstas se presentan solamente cuando existe una variación en el ángulo α y son igual a cero cuando éste se mantiene constante.

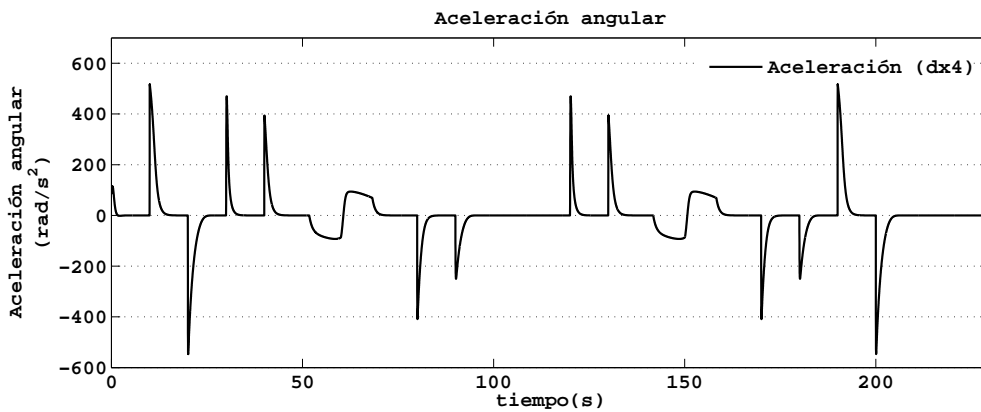


Figura 5.13: Aceleración angular \ddot{x}_4 Tps2.

Análogamente como en la secuencia de aceleración Tps1, la relación aire-combustible x_5 se muestra en lazo abierto en la Figura 5.14, la única regulación se da por la estimación del caudal de aire y dividiendo este valor entre 14.7, para determinar el combustible a inyectar. Las desviaciones de Afr se incrementan durante la aceleración (mezcla pobre) o desaceleración (mezcla rica). En la sección 5.2, retomaremos el comportamiento de x_5 haciendo énfasis en las variaciones de la ganancia de control k .

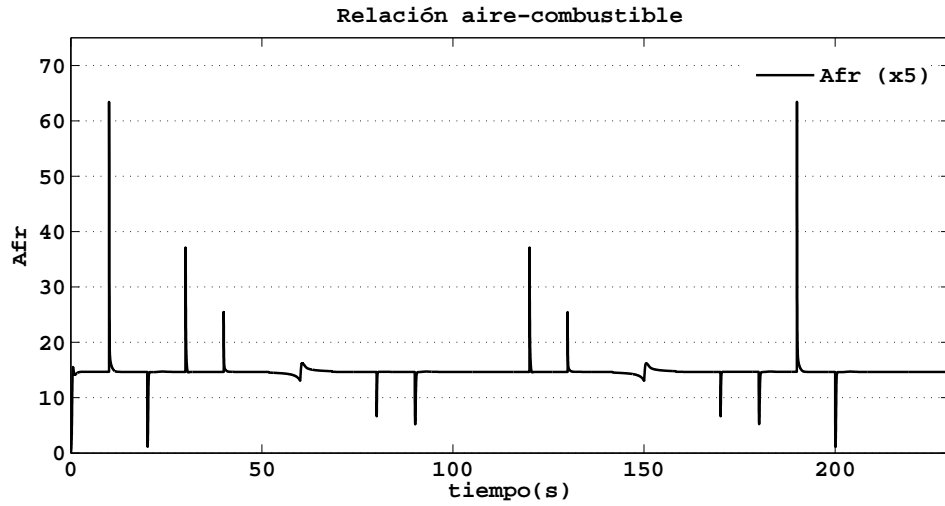


Figura 5.14: Relación aire-combustible \dot{x}_5 Tps2.

5.2. Sistema regulado

En esta sección se analiza el comportamiento de la regulación por retroalimentación del error, variando la ganancia de control k , se utilizan ganancias de 0.5, 1, 2 y 5, observándose que mientras mayor sea la ganancia, se alcanza el valor deseado más rápidamente, en la gráfica 5.15 se realiza el comparativo con la estimación de lazo abierto y también se incluye la secuencia TPS1.

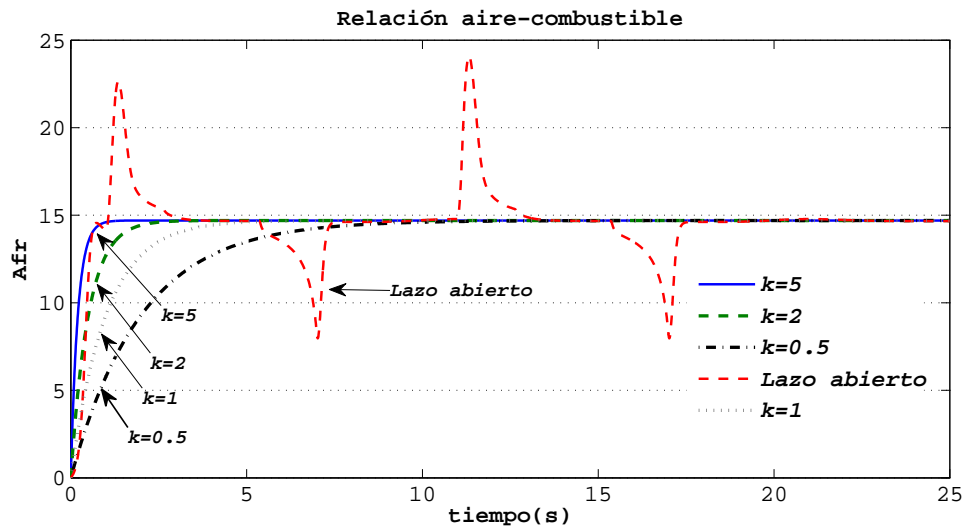


Figura 5.15: Regulación Afr \dot{x}_5 Tps1.

Para mayor detalle de 5.15 se realiza un acercamiento en los primeros 5 segundos,

apreciándose en la Figura 5.16 que el comportamiento no presenta sobre impulso y una vez alcanzado el valor de referencia, ninguna perturbación externa afecta la estabilidad de la planta.

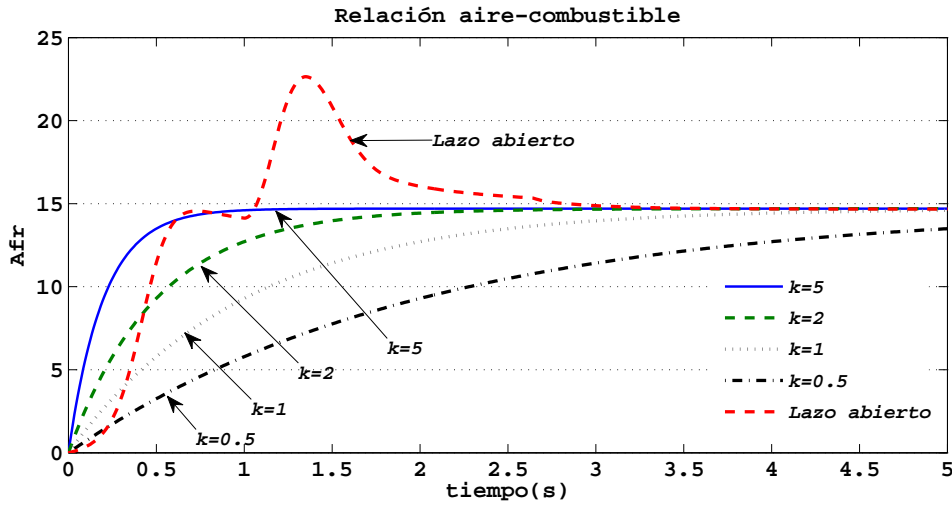


Figura 5.16: Regulación de Afr \dot{x}_5 Tps1.

De manera similar analizando el comportamiento de control para la secuencia de aceleración Tps2 en la figura 5.17.

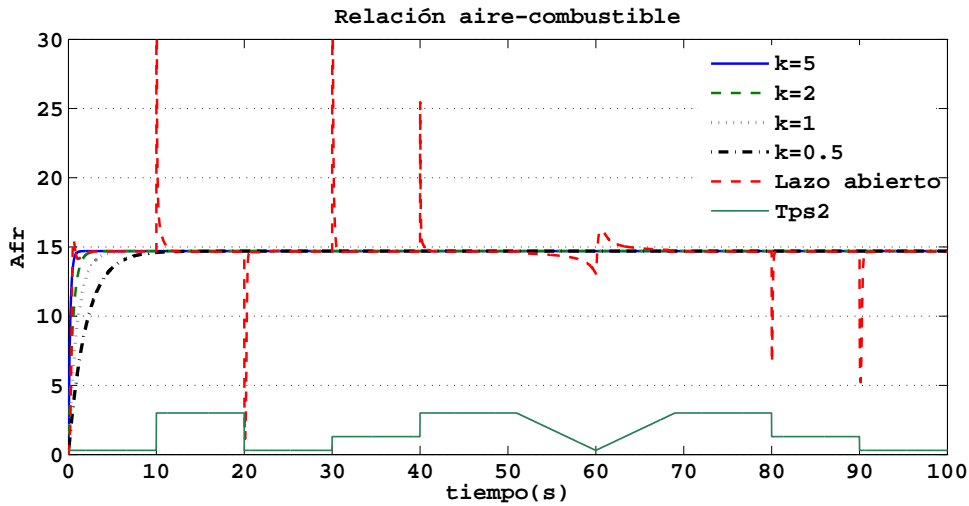


Figura 5.17: Regulación de Afr \dot{x}_5 Tps2.

El acercamiento para la segunda secuencia considera los primeros 10 segundos como se muestra en 5.18. Nos da una idea clara de la robustez y confiabilidad de la

estrategia de control, además de apreciar la influencia de la ganancia de control k , sobre el tiempo de establecimiento del sistema.

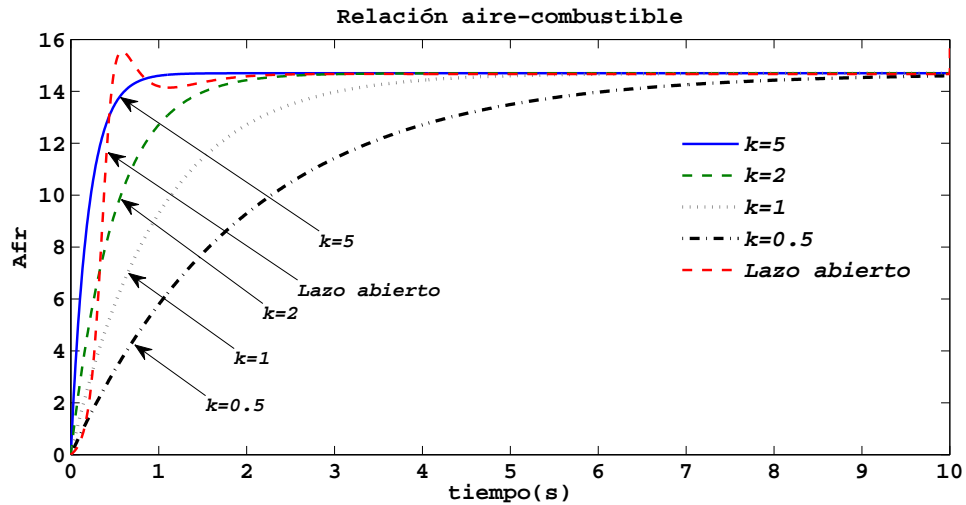


Figura 5.18: Regulación de Afr \dot{x}_5 Tps2.

Al pasar abruptamente entre la desaceleración y aceleración, se aprecia que con un control convencional se presenta una desviación de Afr cerca del instante 60, mientras que al utilizar la regulación por retroalimentación del error, esta perturbación pasa desapercibida y la relación Afr no sufre ni la mínima alteración, el cambio abrupto se muestra en la Figura 5.8 y el desempeño del control en 5.19.

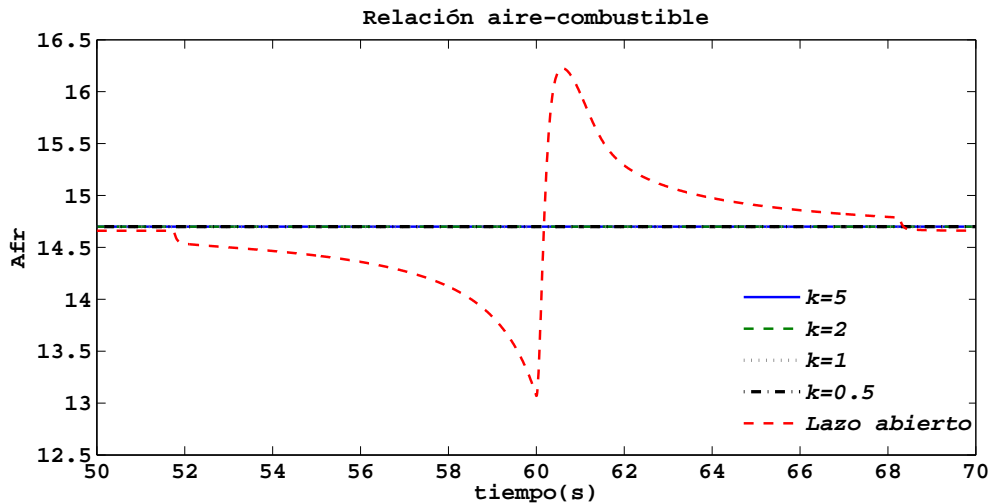


Figura 5.19: Regulación de Afr \dot{x}_5 Tps2.

5.3. El error

La regulación por retroalimentación del error logra una reducción del error en un 100 %, es decir no tenemos error alguno y solamente se presenta en el inicio del experimento, ya que se consideran condiciones iniciales igual a cero, el error decrece rápidamente, el tiempo de establecimiento depende de la ganancia de control k , en el experimento se utilizó una k mínima de $k = 0.5$, presentando el mayor tiempo de establecimiento, el cual es de 8 segundos, se estima un 65 % de error en el primer segundo y con una $k = 5$ el tiempo de establecimiento se reduce aproximadamente a 1 segundo, estimando un error del 0.34 %, como se ilustra en la Figura 5.20.

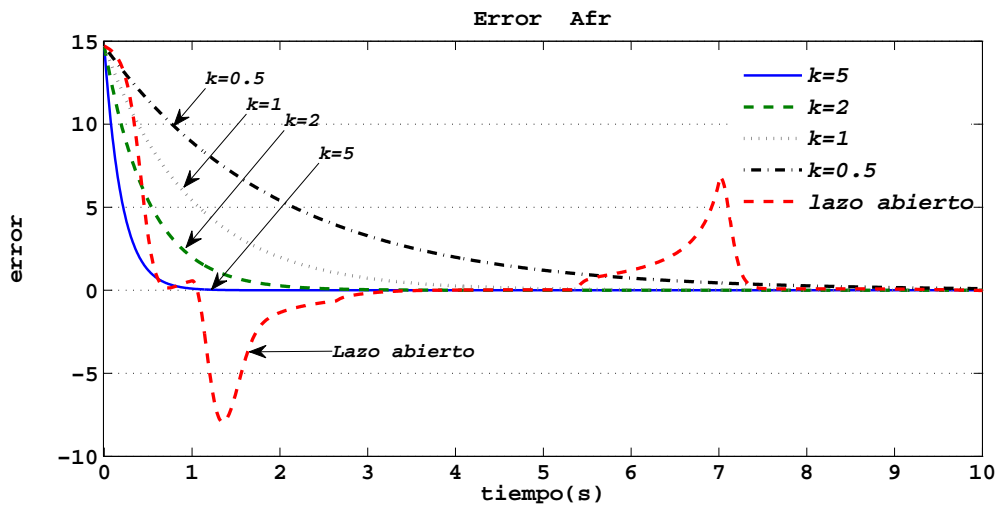


Figura 5.20: Error Tps1

Capítulo 6

Conclusiones

En la presente tesis desarrollamos el modelo no lineal de un motor de combustión interna (MCI) con la idea de no perder generalidad o detalles importantes en su funcionamiento, se desarrollo y estructuró el modelo en espacio de estado considerando las dinámicas principales de su funcionamiento, como es el aire de admisión, la inyección de combustible, así como el torque generado y velocidad del cigüeñal, a partir de estas variables se compone una quinta llamada relación aire-combustible (Afr), la cual consiste en la concentración molecular de la mezcla entre el aire y el combustible que entran al cilindro para participar en la combustión, la concentración de esta relación es muy importante para mejorar la eficiencia energética y disminuir la emisión de gases contaminantes a la atmósfera en un MCI.

Analizamos el proceso de combustión así como los beneficios de trabajar con una combustión completa al lograr oxidar el combustible en su totalidad, además fundamentamos el valor estequiométrico de 14.7 partículas de aire por cada partícula de combustible y la importancia de trabajar un MCI en este punto de operación. Por lo que centramos el modelado y la estructura en espacio de estado del MCI en el diseño de control para mantener ésta concentración en el valor estequiométrico. Para el desarrollo de la estrategia de control analizamos la estabilidad de un sistema no lineal desde el punto de vista de Lyapunov y utilizamos los criterios y fundamentos matemáticos de su teoría. En el desarrollo del control fue necesario obtener una expresión llamada función de energía del sistema o candidata de Lyapunov en función del error de estado, que dependa de la variable de control u_2 y sea positiva definida. Se propone una entrada de control u_2 que garantice la estabilidad del sistema, es decir según Lyapunov que la derivada de la función de energía sea semi-definida

negativa $\dot{V} \leq 0$.

La estrategia denominada regulación por retroalimentación del error presento resultados satisfactorios dejando un error de 0.0 % para cualquier punto de operación del MCI, ya que en las dos secuencias de aceleración y desaceleración mostradas en las Figuras 5.1 y 5.8, que se utilizaron en este trabajo, no se observan perturbaciones en el estado x_5 el cual representa la relación aire-combustible Afr ;

entonces podemos afirmar que el controlador propuesto en el presente trabajo de investigación tiene la capacidad de actualizar la cantidad de combustible a inyectar de una manera oportuna y precisa, lo que garantiza una mezcla estequiométrica y una combustión completa.

El controlador mantiene fija la concentración en una mezcla donde intervienen dos fluidos que entran al cilindro, por una parte la cantidad de aire; en la cual no se tiene regulación alguna, es decir el aire depende de las necesidad o hábitos de manejo del conductor, al variar el ángulo α del acelerador y por la otra parte la cantidad de combustible que se inyecta en este fluido es donde se aplica la acción de control, resaltando que el combustible es parte del denominador en la expresión para Afr en (3.30), lo que implicara tener un control que funciona de forma inversa, es decir si queremos bajar el valor la concentración Afr , es necesario incrementar el combustible (\dot{m}_{fc}) y viceversa lo que introduce mayor complejidad en el diseño del control.

En la operación del controlador se introduce un termino de regulación $-Mke$ que incluye al error de estado y una ganancia de la señal de control k , que para efectos prácticos tiene un valor relativamente pequeño, se utilizaron ganancias de 0.5, 1, 2 y 5. Dependiendo de la ganancia de control es la velocidad con que sistema se alcanza la referencia a partir de un estado inicial, para la $k = 0.5$, se tiene un tiempo de establecimiento de aproximadamente 8 segundos, sin embargo, con una $k = 5$, tiempo es de 1 segundo. En los 5 diferentes valores de k presentados en este trabajo, una vez alcanzada la referencia el controlador no la pierde ante ninguna perturbación o cambio en el aceleración, como se muestra en las Figuras 5.16 y 5.18.

Es importante mencionar que se obtienen mejores resultados que en todas las bibliografías consultadas, pues en todas ellas se presenta una ligera desviación de la Afr proporcional a la variación del ángulo α .

6.1. Trabajo futuro

Propuestas para profundizar la investigación.

- Mejorar el modelo del motor de combustión interna incluyendo los siguientes aspectos: El ángulo del cigüeñal que determina el tiempo de ignición, ya que se ha considerado como el óptimo, considerar la influencia de las variaciones de temperatura. Medir los retardos propios de la operación del motor en cuanto a combustible inyectado y emisiones generadas. Incluir en la simulación un bloque que involucre el proceso de combustión que nos permita cuantificar la potencia calorífica generada así como de manera individual las emisiones contaminantes a la atmósfera.
- Trabajo experimental para validar los resultados con mediciones tomadas directamente en un MCI.
- Construcción física del controlador mediante una tarjeta electrónica programando e implementando la estrategia de control en un dispositivo lógico (Microcontrolador, DSP, PIC) e incorporarlo a una planta física.
- Probar la estrategia para diferentes combustibles y medir los resultados.
- Utilizar otras técnicas de control para comparar y mejorar el funcionamiento del control para la relación aire-combustible en un MCI.

Apéndice A

Nomenclatura

Bloque	Símbolo	Descripción.
Aire admisión	\dot{m}_a	Masa de aire contenido en el múltiple de admisión.
	\dot{m}_{ai}	Flujo del aire de entrada en el múltiple de admisión.
	\dot{m}_{ao}	Flujo del aire de salida en el múltiple de admisión.
	Max	Capacidad de flujo de aire en el cuerpo de aceleración
	Tc	Función discontinua del ángulo de la mariposa del acelerador.
	PRI	Relación entre la presión atmosférica P_{atm} y la presión en el múltiple de admisión P_m .
	η_v	Eficiencia volumétrica del motor.
	k_1	Constante volumétrica del motor.
	R	Constante de los gases ideales.
	T_{amb}	Temperatura ambiente.
	T_m	Temperatura en el múltiple de admisión.
	P_m	Presión en el múltiple de admisión.
	α	Ángulo alfa.
Combustible admisión	t_i	Tiempo de apertura del inyector.
	t_{iny}	Retardo del inyector.
	k_{iny}	Constante de proporcional del inyector.
	m_{fi}	Combustible inyectado.
	\dot{m}_{fv}	Cantidad de combustible que alcanza el cilindro en forma de vapor.
	\dot{m}_{ff}	Cantidad de combustible que alcanza el cilindro en forma líquida.
	\dot{m}_{fc}	Cantidad neta de combustible que entra al cilindro.
	τ_f	Tiempo en el que el combustible se evapora dentro del múltiple de admisión.
	x	Fracción de combustible en el múltiple de admisión en forma líquida.
	u_2	Señal de control.

Tabla A.1: Símbolos y abreviaturas utilizadas.

Bloque	Símbolo	Descripción.
Torque y Velocidad.	T_{Gen}	Torque generado por la combustión.
	T_{Max}	Capacidad máxima de torque para un motor dado.
	AFI	Función normalizada sobre la influencia de la relación aire-combustible.
	CI	Función normalizada de la influencia de compresión en el MCI.
	A/F	Relación aire-combustible en la cámara de combustión.
	CA	Ángulo de ajuste para el avance del cilindro con respecto a PMS.
	MTB	Parámetro de compensación para lograr el torque optimo.
	I_c	Inercia en el cigüeñal.
	T_f	Torque por fricción en el motor.
	w_e	Velocidad angular en el cigüeñal.

Tabla A.2: Símbolos y abreviaturas utilizadas.

Bloque	Simbolo	Descripción.
Estabilidad Lyapunov.	$f(x)$	Funciones de estado.
	\dot{x}	Representación de un sistema en espacio de estado.
	\bar{x}	Punto de equilibrio.
	$E(x)$	Función de energía de un sistema.
	$V(x)$	Función de Lyapunov.
	$\dot{V}(x)$	Derivada de la función de Lyapunov.
	B_ϵ	Esfera cerrada.
	x_0	Punto cercano al origen.
	$\{t_n\}$	Secuencia de puntos que forman un conjunto.
	M	<i>Conjunto invariante con respecto al sistema.</i>
	L^+	Conjunto límite positivo.
	Ω_c	Conjunto invariante positivo compacto.
	R_A	Región de atracción.
	$W_1(x)$	Función continua definida positiva.
	$g(t, x)$	Perturbación del sistema.
Diseño control	$C_x H_y O_z$	Fórmula química de la gasolina genérica.
	ψ	Relación atómica hidrógeno y carbono.
	ξ	Relación atómica oxígeno y carbono.
	x	Número de moléculas de carbono.
	y	Número de moléculas de hidrogeno.
	z	Número de moléculas de oxígeno.
	Afr	Relación aire-combustible.
Espacio de Estado	x_1	Cantidad neta de combustible que entra al cilindro.
	x_2	Derivada de la dinámica de combustible que entra al cilindro.
	x_3	Masa de aire contenido en el múltiple de admisión.
	x_4	Velocidad angular en el cigüeñal.
	x_5	Relación aire-combustible.
	e	Desviación de la relación aire-combustible con el valor estequiométrico.
	Mke	Término de regulación.
	k	Ganancia de control.

Tabla A.3: Símbolos y abreviaturas utilizadas.

A.1. Parámetros de modelado

Parámetro	Simbolo	Valor	Unidades
Capacidad de flujo de aire en el cuerpo de aceleración.	Max	0.18	$\frac{Kg}{h}$
Avance de ignición.	As	1.3868	Radianes
Presión atmosférica.	P_{atm}	110000	$\frac{N}{m^2}$
Volumen cilindros.	V_e	0.0027	m^3
Constante de los gases ideales.	R	8314.3	$\frac{J}{Kg \cdot K}$
Temperatura ambiente.	T_{amb}	270	K
Temperatura del aire de admisión.	T_m	340	K
Regulación de avance en la ignición.	SA	0.85	Radianes
Parámetro de compensación para lograr el torque óptimo.	MTB	0.8	Radianes
Máximo torque disponible.	$Maxt$	498636	$\frac{N \cdot m}{Kg}$
Inercia del motor.	I_c	0.1454	$Kg \cdot m^2$
Diaméto del cuerpo de aceleración.	d_{acel}		$10^{-3}m$
Cantidad de combustible en forma líquida.	x	0.3	Kg
Ángulo alfa.	α	0-1.5	Radianes
Volumen del múltiple de admisión.	V_m	0.0038	m^3
Relación entre la capacidad volumétrica del motor.	k_1	0.0565	
Función normalizada de la influencia de compresión.	CI	0.8	
Valor estequimétrico de la relación aire -combustible.	λ	14.7	

Tabla A.4: Parámetros de modelado.

Los parámetros utilizados para efectos de simulación son los de un motor Seat 1.6 litros modelo 1996 [Nevot, 1999]

Apéndice B

Diagramas Simulink

B.1. Admisión de aire.

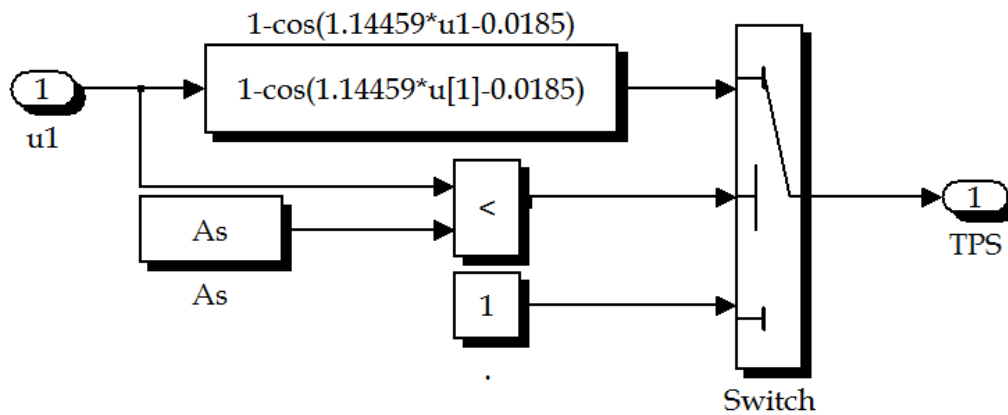


Figura B.1: Función Tc

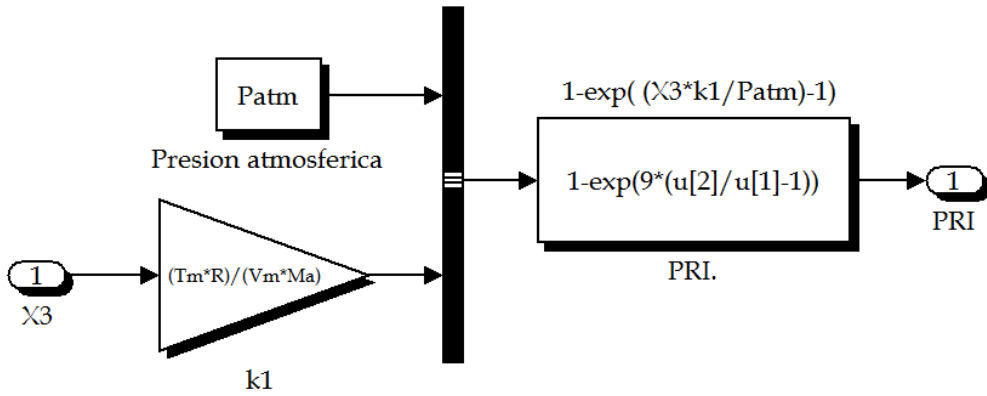


Figura B.2: Función PRI

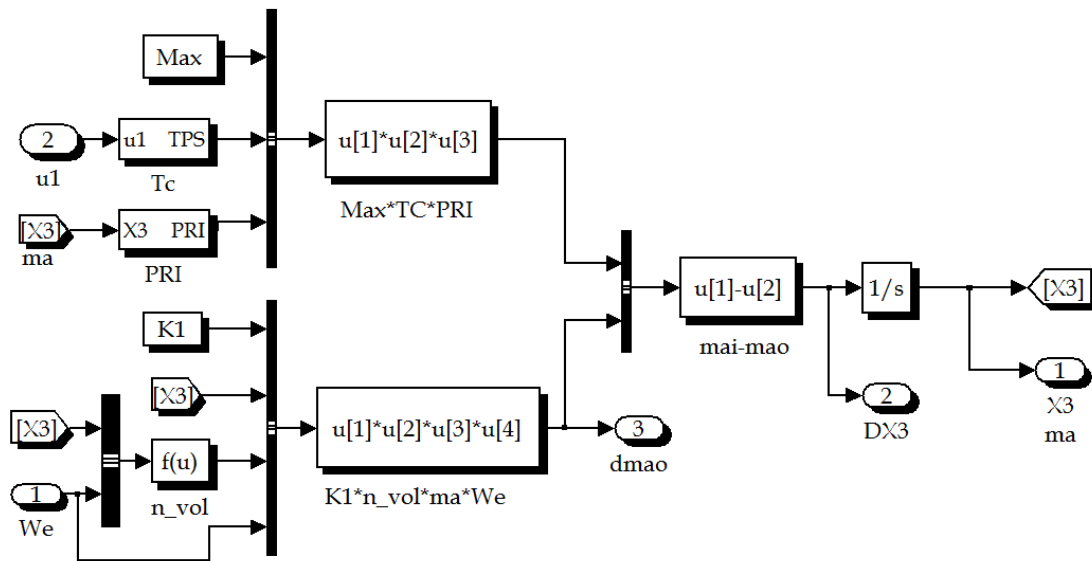


Figura B.3: Modelo del Aire de Admisión en un MCI.

B.2. Inyección de combustible.

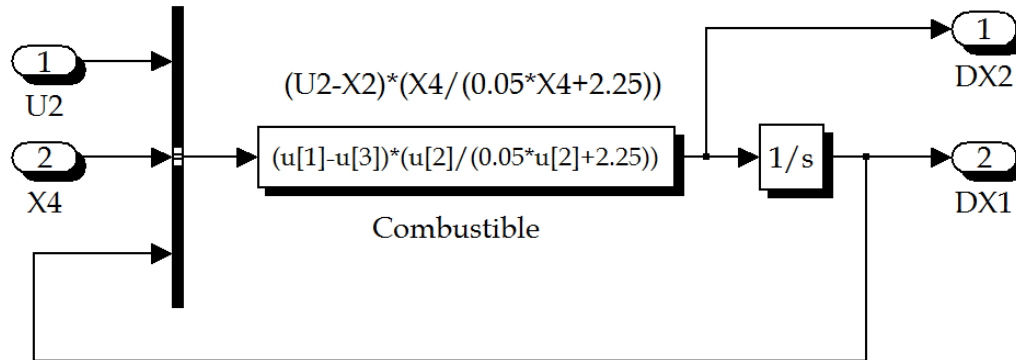


Figura B.4: Modelo del Combustible en un MCI.

B.3. Torque y Velocidad

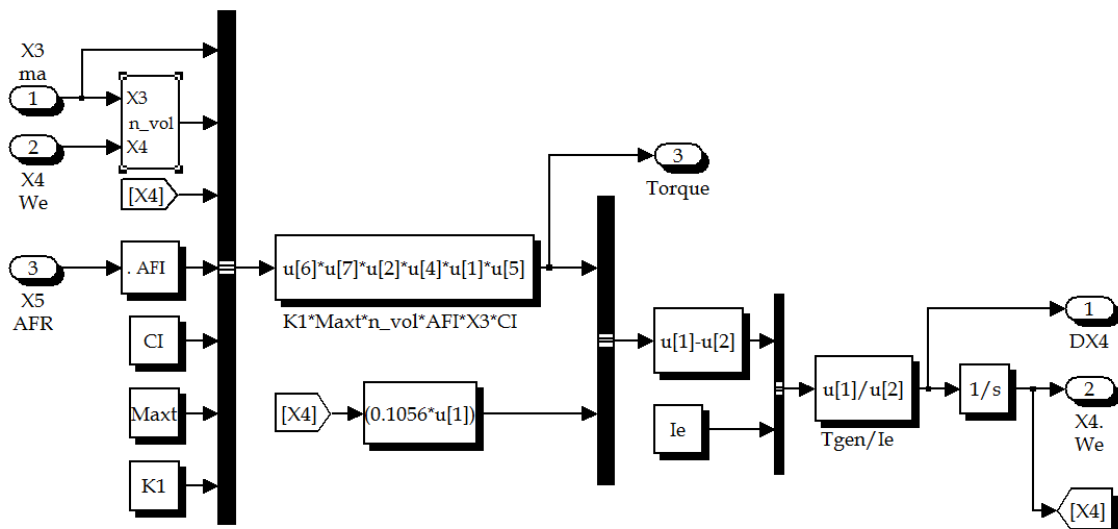


Figura B.5: Modelos de torque y velocidad en un MCI.

B.4. Relación Aire-combustible

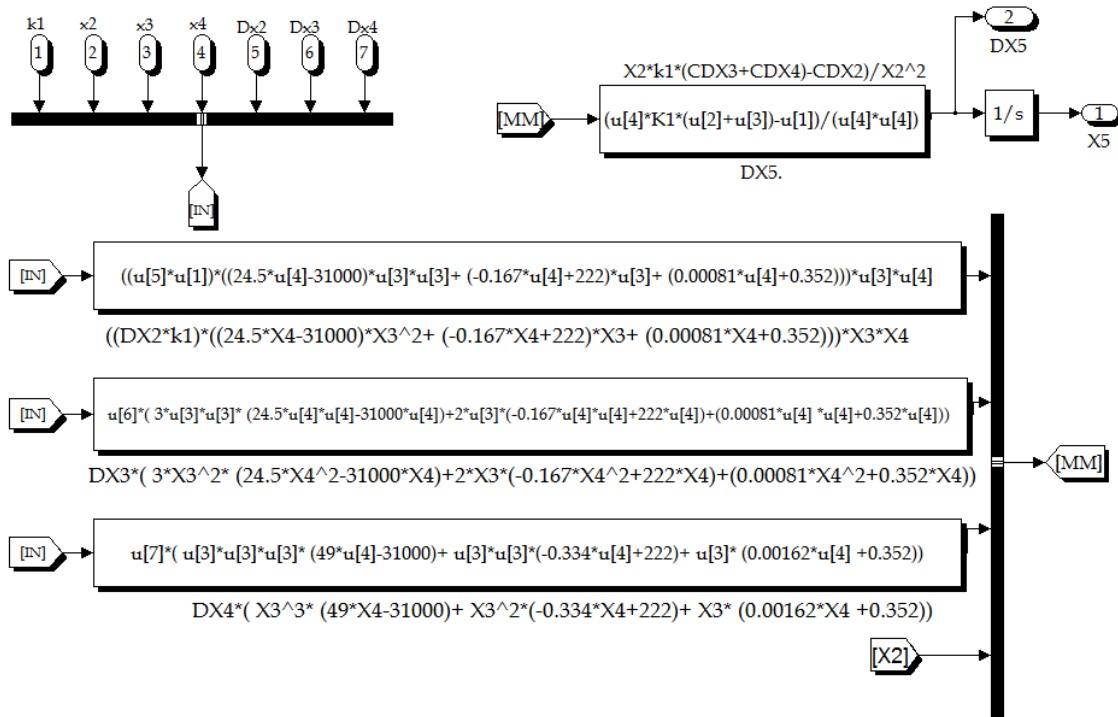


Figura B.6: Modelo de la relación Aire Combustible en un MCI.

B.5. Modelo del MCI

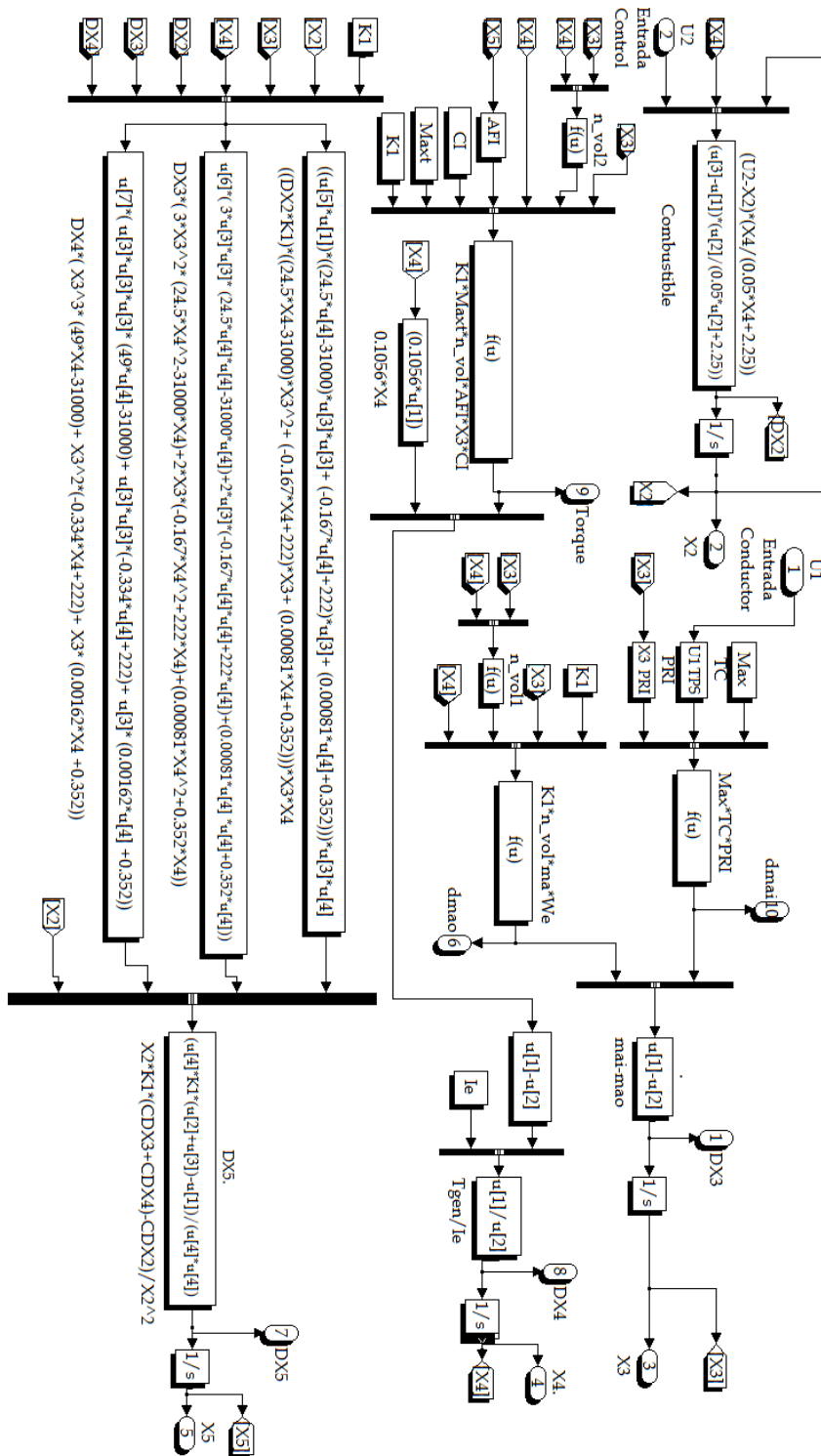


Figura B.7: Modelo de un MCI en Simulink

B.6. Implementación de control

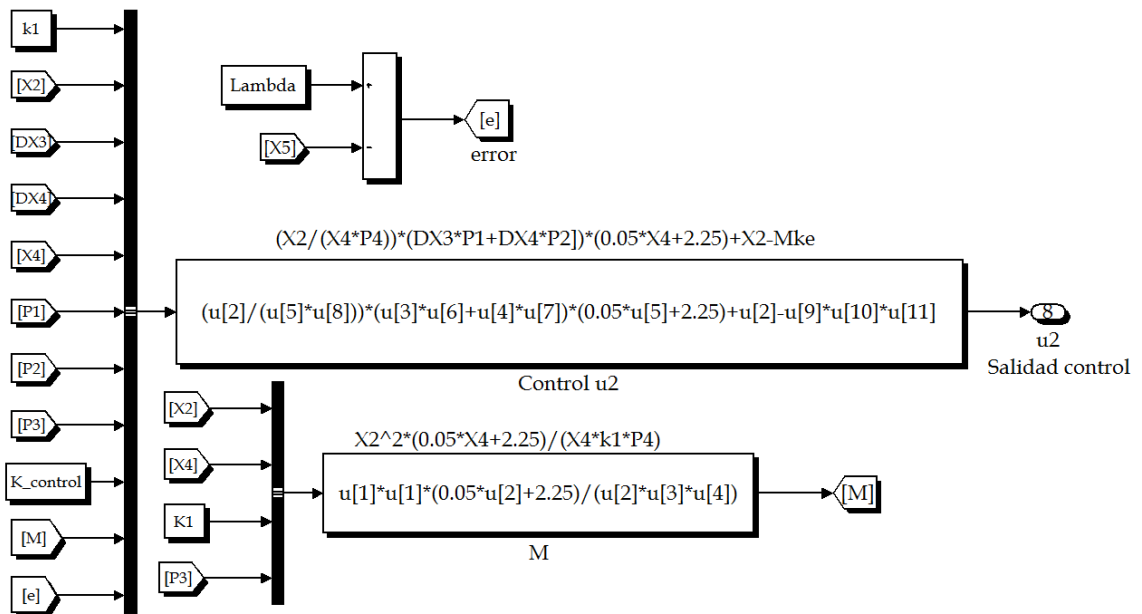


Figura B.8: Implementación del control por regulación de error.

Bibliografía

[Aquino, 1981]

Aquino C, “Transient A/F Control Characteristics of a 5 Liter Central Fuel Injection Engine”, SAE Technical Paper Number 810494, 1981. 1, 2.1, 3.1, 3.4, 3.5

[Asencio, 2010]

. Asencio Bueno David, “Evolución del rendimiento de un motor de combustión interna. Aplicación a los pistones”, Universidad de Cataluña, 2010. (document), 2.2, 2.6

[Arsie, 2001]

Arsie, F. Marotta, C. Pianese, et al., “Information Based Selection of Neural Networks Training Data for S.I. Engine Mapping,” SAE paper no. 2001_01_0561 (2001). 1.2

[Aström, 1989]

Aström Karl johan, Wittenmark. Björn. Sistemas controlados por computador. Editorial Paraninfo, Madrid; ISBN 0-20-09720-6; 526 p.1989. 1, 2.8, 3.1

[Athans, 1978]

Athans, “The Role of Modern Control Theory for Automotive Engine Control,” SAE paper, No. 780852, 79–83, 1978. 1.2

[Bonnick, 2001]

Bonnick Allan. Automotive computer controlled Systems Diagnostic tools and techniques Planta Tree. Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP. 2001. 1, 2.10, 3.5, 4.4

[Chee, 2009]

Chee Tan Wei. Modeling and Control of Engine Fuel Injection System. Faculty of Electrical Engineering, University Teknologi Malaysia. 2009. 1.1, 1.2, 2.2, 3.4, 3.9

[Chernyak, 1987]

Chernyak Ya and G. V. Vasil'ev, Engine Control Using Microprocessor Systems, MADI, Moscow, 1987. 1.2

[Cho, 1989]

Cho D. and J. K. Hedrick, "Automotive Powertrain Modeling for Control," ASME J. of Dynamic Syst. Meas. Control 114 (4), 568–576, 1989. 1.2

[Copp, 1998]

Copp, K.J. Burnham and F.P. Lockett. Fuzzy Modelling Techniques Applied to an Air/ Fuel Ratio Control System. 1998. 1, 2.7.2, 2.8, 3.6

[Dobner, 1980]

Dobner, "A Mathematical Engine Model for Development of Dynamic Engine Control," SAE paper, No. 800054, 373–381, 1980. 1.2

[Evlampiev, 2007]

Evlampiev Alexey, Numerical Combustion Modeling for complex reaction System, 2007. (document), 1, 1.1, 2.3, 2.9, 3.1, 4.4

[Gäfvert, 2003]

Gäfvert Magnus. Topics in Modeling, Control, and Implementation in Automotive Systems. Department of Automatic Control Lund Institute of Technology. 2003. 1.1, 2.10, 3.8

[Gerasimov, 2010]

Gerasimov, H. Javaherian, D. V. Efimov, and Nikiforov. Injection Engine as a Control Object. I. Schematic Diagram of the Engine and Synthesis of a Mathematical Model. Saint Petersburg State University of Information Technologies, mechanics and Optics, Russia. 2010. 1, 1.2, 2.1, 3.5

[Ghaffari, 2008]

Ghaffari Ali, Hosein Shamekhi, Akbar Saki, and Ehsan Kamrani. Adaptive Fuzzy Control for Air-Fuel Ratio of Automobile Spark Ignition Engine. World Academy of Science, Engineering and Technology 48 2008. 1.2, 3.7, 3.8

[Hedricks, 1990]

Hedricks and S. C. Sorenen, "Mean Value Modeling of Spark Ignition Engines," SAE paper, No. 900616, 1990. 1.2

[Heywood, 1988]

Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals McGraw_Hill International Editions, New York, 1988. 1.2

[Jakobsson, 2007]

Jakobsson Thommy. Model Based Evaluation of UEGO Performance and Sensitivity. Dept. of Electrical Engineering at Linköpings universitet. 2007. 1.1, 2.6.6, 2.9, 3.2, 3.4

[Jankovic, 2002]

Jankovic, "Nonlinear Control in Automotive Engine Applications", in Electronic Proceedings of 15th Internal. Symp. on the Mathematical Theory of Networks and Systems, Univ. Notre Dame, USA, 2002. 1.2

[Karmiggelt, 1998]

Karmiggelt Rob. Mean Value Modelling of a S.I. Engine Department of Mechanical Engineering (WFW) Section Systems and Control Eindhoven. 1998.

(document), 2.5, 3.2, 3.5

[Kerkeni, 2010]

Kerkeni J. Lauber, T. M. Guerra. Estimation of Individual In-cylinder air mass flow via Periodic Observer in Takagi-Sugeno form. University Lille Nord de France, EFEEA'10 International Symposium on Environment Friendly in Energies in Electrical Applications.2010. 2.3, 2.9, 3.1

[Khalil, 1996]

Khalil Hassan. K. Nonlinear control system. Department of Electrical and Computer Engineering. Michigan State University. 3 Third edition. Prentice-Hall, 1996. 1, 4.1, 4.1, 4.1, 4.1, 4.1.1, 4.5

[Kolchin, 2003]

Kolchin, Calculation of Car and Tractor Engines. Textbook for High School, Vysshaya Shkola, Moscow, 2003. 1.2

[Krutov, 1989]

Krutov, Automatic Regulation and Control of Internal Combustion Engines, Mashinostroenie, Moscow, 1989. 1.2

[Kyu, 2001]

Kyu Sae, Myoung Jin Chang, Dae Ha Kang, Jong Kyung Kim, Soon Il Hang, and Man Hyung Lee. Fuzzy Sliding Control for Low Emission Automotive Engines. Agency for Defense Development, P.O. Box 35-3,3-H, Yuseong, Taejon, 305-600, Korea, Department of Electrical Engineering, Pukyung National University, 2001. 1.2, 3.6, 3.8, 4.4

[Larses, 2005]

Larses Ola, Architecting and Modeling Automotive Embedded Systems, Department of Machine Design Royal Institute of Technology, 2005. 1, 2.8, 4.4

[Lukanin, 2005]

Lukanin, K. A. Morozov, A. S. Khachiyan, et al., Internal Combustion Engines, vol. 1: Theory of Working Processes. Textbook for High School, Ed. by V. N. Lukanin, Vysshaya Shkola, Moscow, 2005. 1.2

[Moraal, 2001]

Moraal, D. Meyer, J. Cook, "Adaptive Transient Fuel Compensation: Implementation and Experimental Results," SAE paper no. 2000_01_0550, 2000. 1.2

[Moskwa, 1992]

Moskwa and J. K. Hedrick, "Modeling and Validation of Automotive

Engines for Control Algorithm Development,” ASME J. of Dynamic Syst., Meas. Control 114, 278–285,1992. 1.2

[Murray, 1994]

Murray Richard, Zexiang Li, S. Shankar Sastry. A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation, 1994. 4.6

[Nevot, 1999]

Nevot Javier. Diseño de un controlador avanzado basado en redes neuronales para la gestion de la mezcla aire -gasolina en un motor alternativo. Universidad politécnica de cataluña. 1999. (document), 1.2, 2.4, 2.5, 2.7, 3.5, 3.6, 3.7, A.4

[Onder, 1993]

Onder and H. P. Geering, “Model-Based Multivariable Speed and Air-Fuel Ratio Control of an SI Engine,” SAE paper, No. 930859, 69–80 (1993). 1.2

[Park, 2003]

Park, M. Yoon, and M. Sunwoo, “Feedback Error Learning Neural Networks for Air-to-Fuel Ratio Control in SI Engines,” SAE paper no. 2003_01_0356 (2003). 1.2

[Pfeiffer, 1997]

Pfeiffer Jeffrey M.. Simultaneous Control of Speed and Air- Fuel Ratio in an Automobile Engine. University of California, Berkeley, Vehicle Dynamics Laboratory, Department of mechanical Engineering. 1997. 2.2, 3.4, 3.4, 3.4, 3.5, 3.5, 3.7, 3.9

[Powel, 1998]

Powel, N. P. Fekete, and C. _F. Chang, “Observer Based Air-Fuel Ratio Control,” IEEE Control Systems, pp. 72–83 (1998). 1.2

[Pushkaraj, 2005]

Pushkaraj A. Panse, Shashikanth Suryanarayanan. Dynamic Modeling and Control of Port Fuel Injection Engines. Departament of Mechanical Engineering. Indian Institute of Technology Bombay. 2005. 1, 1.2, 2.10, 3.5, 3.7

- [Rajamani, 2006]
Rajamani Rajesh. Vehicle Dynamics and Control. University of Minnesota, USA. Springer 2006. 2.4.11, 2.5, 2.6.6, 2.8
- [Shamdani, 2008]
Shamdani Amir H. and M. Ziabasharh. Air Intake Modelling with Fuzzy AFR Control of a Turbocharged Diesel Engine. Department of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. 2008. 1, 1.2, 2.5, 3.4, 4.4.1
- [Turin, 1994]
Turin and H. P. Geering, “Model Based Adaptive Fuel Control in a SI Engine,” SAE paper, No. 940374, 119–128, 1994. 1.2
- [Vachtsevanos, 1993]
Vachtsevanos George, Shehu S. Farinwata, and Dimitrios K. Pirovolou. Fuzzy Logic Control of an Automotive Engine. IEEE Control Systems. 1993. 1, 2.6.6
- [Velasco, 2011] Velasco Hurtado Carlos. Hornos Metalurgicos, Universidad Técnica de Oruro. Facultad Nacional de Ingenieria, 2011. 4.4.1, 4.4.1
- [Vyrubov, 1983]
Vyrubov, N. A. Ivashchenko, V. I. Ivin, et al., Internal Combustion Engines: Theory of Piston and Combined Engines, Ed. by A. S. Orlin and M. G. Kruglov. Mashinostroenie, Moscow, 1983. 1.2
- [Weaver 1993] . Weaver Christopher S, Walsh Michael P. Air Pollution from Motor Vehicles Standards and Technologies for Controlling Emissions The World Bank Washington, D.C. 1993. (document), 4.1
- [Weeks, 1995]
Weeks Robert , John j. Moskwa. Automotive Engine Modeling for Real-Time Control Using Matlab/Simulink. University of Wisconsin-Madison. SAE Technical Paper No. 950417,1995. 2.2, 2.4.1
- [Wu 2011]
Wu Hai. Performance simulation and control design for diesel engine

no_x emission reduction technologies. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2011. 1.2, 4.4.1

[Yacoub 1999]

Yacoub Yasser. Mean Value Modeling and Control of a Diesel Engine Using Neural networks. Morgantown, West Virginia. 1999. (document), 3.2, 4.4

[Zhai 2011]

Zhai Y. J. Fast predictive control for air-fuel ratio of SI engines using a nonlinear internal model . International Journal of Engineering, Science and Technology Vol. 3, No. 6, 2011, pp. 1-17 1.2