



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**TEMA:**

**”MODELO DINÁMICO DE UN SISTEMA DE INYECCIÓN  
DE COMBUSTIBLE”**

**AUTOR: FERNANDO JAVIER MADERA ROSERO**

**DIRECTOR: CARLOS XAVIER ROSERO CHANDI**

**IBARRA - ECUADOR**

**2023**

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**BIBLIOTECA UNIVERSITARIA**

**AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN**  
**A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA**

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

<b>DATOS DEL CONTACTO</b>	
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	0401787775
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Madera Rosero Fernando Javier
<b>DIRECCIÓN:</b>	Mira, barrio San Roque, Jaime Roldós y Chontahuasi
<b>EMAIL:</b>	maderarosero037@gmail.com
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b> 0991268102

<b>DATOS DE LA OBRA</b>	
<b>TÍTULO</b>	Modelo Dinámico de un Sistema de Inyección de Combustible
<b>AUTOR:</b>	Madera Rosero Fernando Javier
<b>FECHA:</b>	08/03/2023
<b>SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO</b>	
<b>PROGRAMA:</b>	Pregrado
<b>TÍTULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniero en Mecatrónica
<b>ASESOR/DIRECTOR:</b>	Carlos Xavier Rosero Chandi

**2. Constancias**

El autor manifiesta que la obra de objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 8 días del mes de Marzo de 2023.

**EL AUTOR:**



Fernando Madera

El autor



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CERTIFICACIÓN**

En calidad de director del trabajo de grado "MODELO DINÁMICO DE UN SISTEMA DE INYECCIÓN DE COMBUSTIBLE", presentado por el egresado FERNANDO JAVIER MADERA ROSERO, para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica, certifico que el mencionado proyecto fue realizado bajo mi dirección.

Ibarra, Marzo del 2023



Carlos Xavier Rosero C.  
DIRECTOR DE TESIS

# Agradecimientos

A mis padres por brindarme su apoyo en todo momento y de todas las formas posibles para que termine este trayecto de mi formación profesional.

A mis amigos y compañeros que hicieron de esta etapa universitaria una parte de mi vida llena de recuerdos.

A mis docentes por haber compartido sus conocimientos y experiencias que me ayudaron a formarme como profesional y como persona.

A mi director de trabajo de grado Xavier Rosero, quien siempre estuvo dispuesto a apoyarme a culminar este proceso.

# Dedicatoria

Dedico este trabajo de grado a mis padres quienes siempre me han apoyado a cumplir mis objetivos.

# Resumen

El control de la relación aire - combustible de un motor de combustión interna puede ser abordado desde distintas estrategias de sistemas de control, todas ellas buscan alcanzar la relación estequiométrica para optimizar el uso del combustible y reducir los niveles de contaminación que se emiten al ambiente. En este trabajo se eligió un control por modelo interno y un Predictor de Smith y se lo aplicó a la planta que en este caso fue representada por un sistema de primer orden más un retardo puro. El sistema de control se sometió a diferentes tipos de señales de referencia y perturbación y se simuló en el software simulink y matlab para analizar la respuesta y estabilidad.

# Abstract

The control of the air-fuel ratio of an internal combustion engine can be approached from different control system strategies, all of them seek to achieve the stoichiometric ratio to optimize the use of fuel and reduce the levels of pollution that are emitted into the environment. In this work, an internal model control and an Smith Predictor was chosen and applied to the plant which in this case was represented by a first order system plus a pure delay. The control system was subjected to different types of reference and perturbation signals and simulated in simulink and matlab software to analyze the response and stability.

# Índice general

<b>1. Revisión Literaria</b>	<b>4</b>
1.1. Controladores Basados en PID . . . . .	4
1.2. Controladores Basados en Observadores . . . . .	5
1.3. Otras Estrategias de Control . . . . .	6
<b>2. Modelo Dinámico y Controlador</b>	<b>10</b>
2.1. Sistema Dinámico . . . . .	10
2.1.1. Flujo de Aire de Admisión . . . . .	10
2.1.2. Flujo de Combustible de Admisión . . . . .	10
2.1.3. Modelo de la Relación Aire - Combustible . . . . .	11
2.2. Control de Modelo Interno (CMI) . . . . .	11
2.2.1. Modelo del Controlador (CMI) . . . . .	13
2.3. Predictor de Smith . . . . .	14
2.3.1. Modelo del Controlador (Predictor Smith) . . . . .	14
2.4. Discusión . . . . .	16
<b>3. Implementación y Pruebas</b>	<b>17</b>
3.1. Planta . . . . .	17
3.2. Diseño del Controlador por CMI . . . . .	17
3.3. Diseño del controlador por Predictor de Smith . . . . .	18
3.4. Pruebas y Análisis de Resultados . . . . .	20
3.4.1. Respuesta al Escalón Unitario . . . . .	20
3.4.2. Respuesta al Escalón Unitario y Perturbación . . . . .	20
3.4.3. Respuesta al Cambio de la Señal de Entrada . . . . .	21
3.4.4. Respuesta al Escalón Unitario con Variación en el Modelo . . . . .	22

3.5. Análisis de Estabilidad . . . . .	22
<b>4. Conclusiones y Trabajo Futuro</b>	<b>24</b>
4.1. Conclusiones . . . . .	24
4.2. Trabajo Futuro . . . . .	26
<b>5. Anexos</b>	<b>30</b>

# Índice de figuras

1.1. Implementación del control PID. . . . .	4
1.2. Respuesta de la relación aire-combustible. . . . .	5
1.3. Relación de exceso de aire. . . . .	6
1.4. Seguimiento de la relación AFR. . . . .	7
1.5. Regulación de la AFR por realimentación del error. . . . .	8
2.1. Estructura de control por modelo interno. . . . .	12
2.2. Estructura de control por modelo interno simplificada. . . . .	13
2.3. Estructura de control del Predictor de Smith. . . . .	14
2.4. Modificación del Predictor de Smith. . . . .	15
2.5. Predictor de Smith a lazo cerrado convencional. . . . .	15
3.1. Implementación del Control por Modelo Interno en Simulink. . . . .	18
3.2. Implementación del Predictor de Smith en Simulink. . . . .	19
3.3. Respuesta al escalón unitario. . . . .	20
3.4. Respuesta al escalón unitario y perturbación. . . . .	21
3.5. Respuesta al cambio de la señal de entrada. . . . .	21
3.6. Respuesta del sistema con variación en el modelo. . . . .	22
3.7. Estabilidad mediante el diagrama de Nyquist. . . . .	23

# Introducción

## Problema

Los motores de combustión interna (CI) consumen el 80% de la energía derivada de los hidrocarburos a nivel mundial. Estos motores transforman la energía química del combustible en trabajo útil. En los motores de CI la energía es liberada por la quema u oxidación del combustible dentro del motor [1].

En los motores de gasolina, la mezcla se prepara utilizando un equipo de carburación, sin embargo, desde hace algunos años ha aumentado la tendencia de preparar la mezcla por medio de inyección de combustible en el colector de admisión. Esta tendencia se explica por las ventajas que supone la inyección de combustible en relación con las exigencias de potencia, consumo, comportamiento de marcha, así como de limitación de elementos contaminantes en los gases de escape [2].

La investigación sobre el control de la inyección de combustible con el fin de optimizar la relación de mezcla de aire de admisión y combustible dentro del cilindro ha experimentado un progreso extraordinario en los últimos años gracias al crecimiento de la capacidad del microprocesador [3]. Para lograr un control preciso con estos sistemas, la cantidad de aire que fluye en el cilindro debe ser detectada de forma precisa y la cantidad de combustible inyectada debe ser determinada [4].

## Objetivos

### Objetivo general

- Proponer un modelo dinámico de sistema de inyección de combustible.

### Objetivos específicos

- Analizar modelos dinámicos de inyección de combustible.
- Modelar el sistema dinámico de un motor de combustión interna considerando como estado principal la relación aire - combustible.
- Probar el modelo a través de ejemplos numéricos.
- Validar el modelo sobre software matemático.

## Justificación

El automóvil se ha convertido rápidamente en un sistema electromecánico complejo debido en parte a los avances en tecnologías informáticas y de detección, así como a los avances en la estimación y teoría del control. Los vehículos ahora incluyen a bordo sistemas de computación distribuida jerárquicamente, que coordinan varias funciones de control asociadas con el motor y la transmisión, control de cruce, control de tracción y suspensiones [5].

El uso de componentes electrónicos y microprocesadores han abierto las puertas a métodos más exactos para controlar la dosificación de combustible al motor, conociéndose como inyección electrónica de combustible. El uso de este sistema de control ha incrementado la potencia de los motores y su rendimiento de combustible, que emplean además, componentes electromecánicos, los cuales son mucho más exactos en todo aspecto y relativamente libres de mantenimiento [6].

Las técnicas de identificación de sistemas han cobrado gran relevancia en diversas áreas del conocimiento, donde se requiere de un modelo preciso para fines de análisis, predicción, simulación, diseño y control [7]. El modelado es el proceso mediante el cual un sistema se describe matemáticamente por una aplicación directa de las leyes establecidas; la elaboración de un modelo resulta necesaria para poder llevar a cabo el análisis de un sistema de control [2].

## **Alcance**

En el presente proyecto se propondrá un modelo dinámico del sistema de inyección de un motor de combustión. Se determinarán las entradas y salidas a considerar en el modelo, se aplicará una estrategia de control y se evaluará tanto el modelo como el controlador a través de software matemático.

# Capítulo 1

## Revisión Literaria

En este capítulo se presentan diferentes estrategias de control en modelos matemáticos que de una u otra forma describen el funcionamiento del sistema de inyección en motores de combustión interna, orientados a mantener el valor estequiométrico en la relación Aire-Combustible (AFR, air-fuel-ratio).

### 1.1. Controladores Basados en PID

En [2] se usa un control indirecto, es decir, se controla el caudal de gasolina que ingresa al cilindro mediante una relación entre caudal y RPM, las cuales se usan como set point. Se considera el régimen de giro del motor como variable principal de referencia para que la unidad de control electrónico (ECU, electronic-control-unit) calcule el tiempo de inyección.

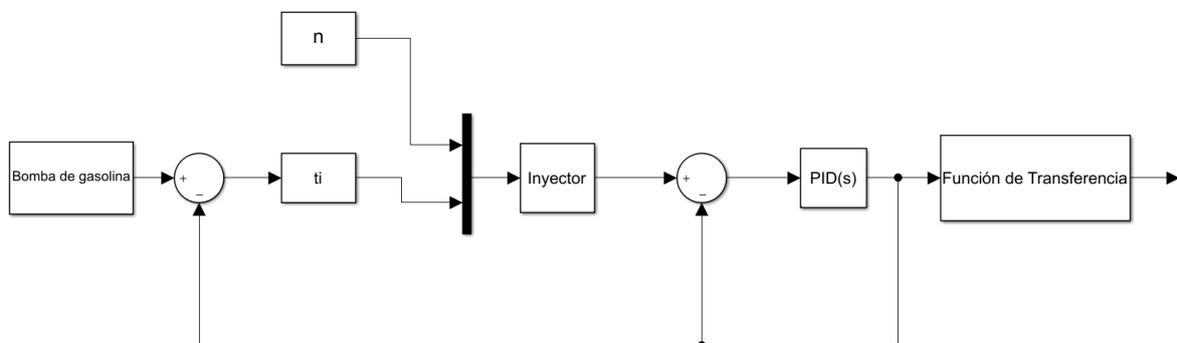


Figura 1.1: Implementación del control PID.

En [8] se sugiere un estimador de dinámica desconocida del sistema. La salida del estimador se la agrega a un control AFR predefinido como el control PID. La característica más destacada de este esquema de control propuesto radica en su simplicidad y el pequeño número de mediciones requeridas, es decir, solo se utilizan el caudal másico de aire, la presión y la temperatura en el colector de admisión y el valor AFR medido.

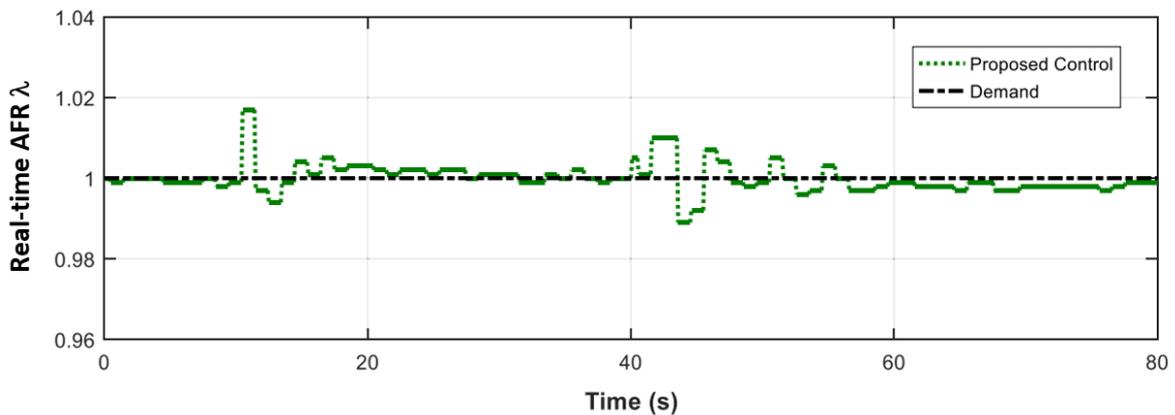


Figura 1.2: Respuesta de la relación aire-combustible.

## 1.2. Controladores Basados en Observadores

En [3] se trabaja sobre un motor de 4 cilindros para optimizar la AFR en cada uno de ellos. En la estrategia de control se aplica una retroalimentación para cada cilindro y se utilizó un observador como el descrito por la teoría del sistema de control moderno como método de estimación, además con el fin de mejorar la precisión de la medición de la AFR, se diseñó un método para compensar el retardo de respuesta del sensor de oxígeno en tiempo real.

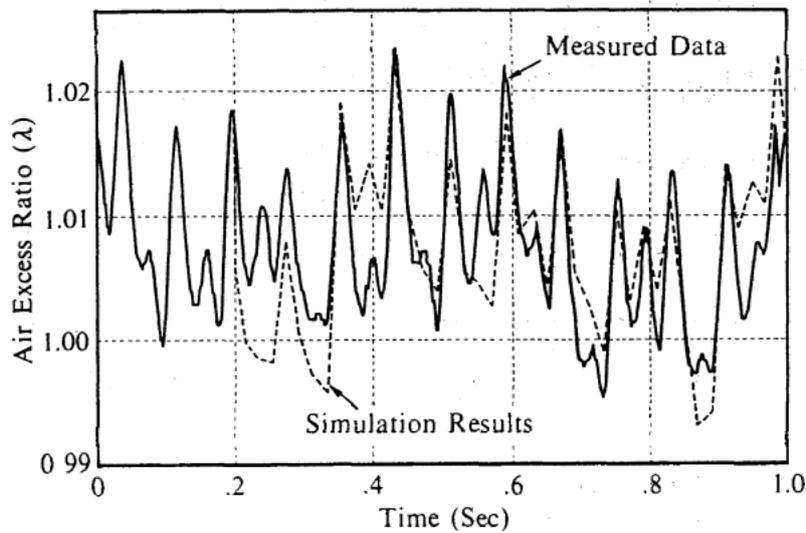


Figura 1.3: Relación de exceso de aire.

En [9] se desarrolla una teoría de implementación de un sistema de control de la AFR usando espacio de estados y un método de estimación. Esto es completado mediante la compensación de la dinámica del aire con un control feedforward, fundamentado en el manejo del movimiento de la mariposa electrónicamente y la dinámica del combustible con un control de realimentación basado en un observador.

En [10] utiliza el análisis de Fourier como alternativa a enfoques basados en observadores y se propone un modelo generalizado que puede calibrarse para configuraciones de motor con un número arbitrario de cilindros y una distancia de fase individual de los cilindros encendidos posteriormente.

### 1.3. Otras Estrategias de Control

En [11] se muestra cómo las técnicas de control de muestreo periódico pueden ser usadas para desarrollar un controlador que ajuste individualmente los inyectores de combustible de un motor de 4 cilindros utilizando un solo sensor de oxígeno.

En [12] se realiza una comparación entre los sistemas de inyección Common Rail de alta presión (HPCR) y el sistema de inyector unitario controlado electrónicamente (HEUI) mediante enfoques de modelos experimentales y numéricos, además de un análisis CFD utilizando el programa comercial AMESim.

En [13] se propone un diseño de ley de control que pueda hacer frente a la demora del sensor de oxígeno o sonda Lambda para garantizar una buena regulación de la AFR, incluso durante transitorios rápidos de la válvula de mariposa. Las leyes de control que se aplican en este trabajo se basan en el modelo Takagi-Sugeno (TS).

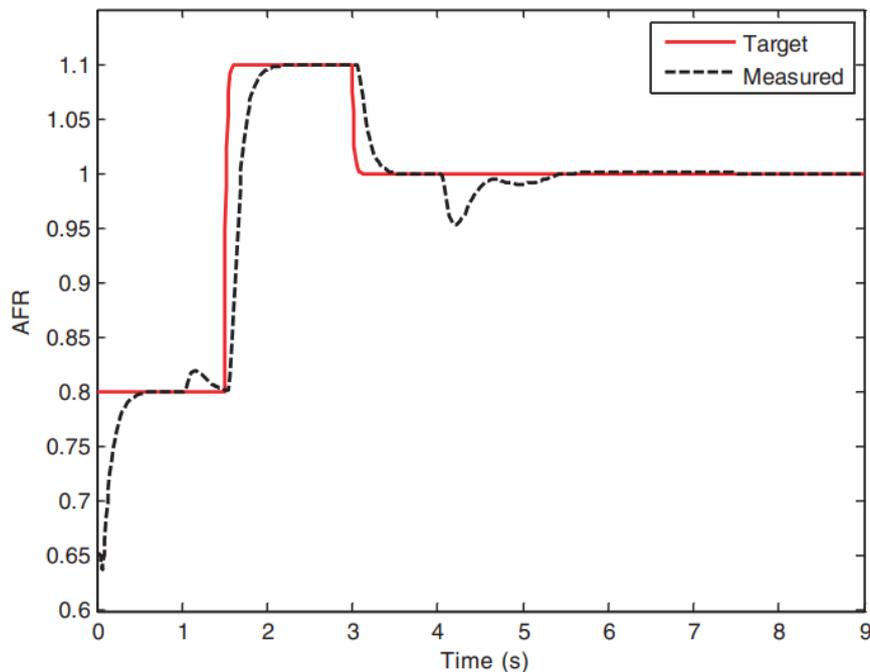


Figura 1.4: Seguimiento de la relación AFR.

En [14] se ha desarrollado un modelo cuyo sistema se ha estructurado en espacio de estados 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 la AFR. 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.

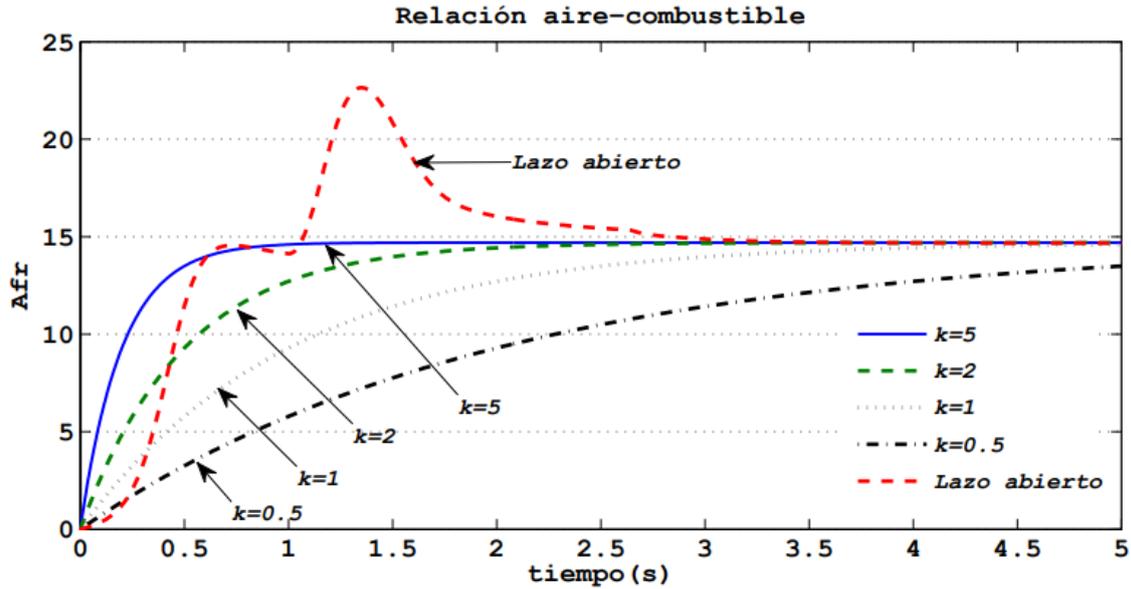


Figura 1.5: Regulación de la AFR por realimentación del error.

En [15] se aplica una estrategia de control sobre un motor de combustión interna que incluye un convertidor catalítico de 3 vías. Para el modelo matemático del sistema se considera un sensor universal de oxígeno para gases de escape (UEGO) montado aguas arriba del convertido catalítico, y un sensor de oxígeno para gases de escape calentado (HEGO) que está montado a la salida del convertidor, estas señales retroalimentadas se usarán para el control de la AFR.

En [16] se describe el desarrollo, validación e implementación de un estimador de carga de aire de circuito abierto no lineal para un motor de 8 cilindros. La implementación del prototipo se logró utilizando un código de control de lenguaje de alto nivel en una PC dedicada y se comunica a través de una placa de memoria compartida con el controlador de producción basado en microprocesador.

En [17] el modelo para el motor y el controlador para la AFR se basan en redes neuronales recurrentes con retroalimentación externa. Los requisitos para acciones de control factibles y la precisión estática del control se han integrado en el diseño del controlador para guiar el aprendizaje hacia una solución de control eficaz.

En [18] se propone una formulación de control predictivo de modelo analítico adaptativo, lineal, de espacio de estado para el control de la AFR, la cual se mide mediante un sensor universal de oxígeno de gases de escape (UEGO) de amplio rango.

## Capítulo 2

# Modelo Dinámico y Controlador

En este capítulo se describirá brevemente una representación simplificada de la relación aire - combustible en un modelo matemático y la estrategia de control a implementarse.

### 2.1. Sistema Dinámico

#### 2.1.1. Flujo de Aire de Admisión

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 de la relación entre el volumen del múltiple y el volumen del cilindro (también conocido como eficiencia volumétrica) [14]. Lo descrito está dado por

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{ai} - \dot{m}_{ao}, \quad (2.1)$$

donde  $\dot{m}_a$  es el aire contenido en el múltiple de admisión,  $\dot{m}_{ai}$  es el flujo de entrada y  $\dot{m}_{ao}$  es la masa de aire que sale del múltiple para entrar al cilindro.

#### 2.1.2. Flujo de Combustible de Admisión

En un motor de combustión interna 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 [14], que viene dada por

$$\dot{m}_{fi} = k_{iny}(t_i - t_{iny}) \quad (2.2)$$

donde  $\dot{m}_{fi}$  es la cantidad de combustible a inyectar,  $k_{iny}$  es la ganancia del inyector,  $t_i$  es el tiempo de apertura del inyector, y  $t_{iny}$  es el tiempo que requiere para abrirse el inyector al ser un elemento mecánico.

### 2.1.3. Modelo de la Relación Aire - Combustible

El control de la relación aire - combustible, también denominado control lambda, está determinado por la razón entre la cantidad de aire y la cantidad de combustible que entra al cilindro del motor, y se la expresa como

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{ao}/\dot{m}_{fi}}{\lambda_{ST}}, \quad (2.3)$$

siendo  $\lambda_{ST}$  el valor estequiométrico de 14.7 partes de masa de aire por una de combustible.

En problemas de control para la relación aire - combustible el motor puede ser modelado simplemente por un retraso puro más un retraso de primer orden [5]

$$G_p(s) = \frac{K_M e^{-sT_L}}{\tau_M s + 1}. \quad (2.4)$$

## 2.2. Control de Modelo Interno (CMI)

El controlador de modelo interno (CMI) es una técnica de control basada en el modelo del proceso que ha manifestado excelentes resultados tanto en el sistema de control del proceso frente a las perturbaciones como en la robustez del mismo [19].

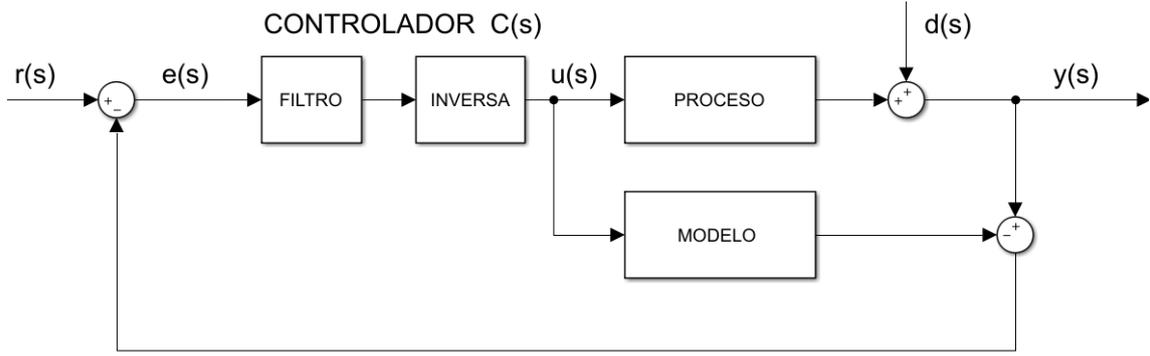


Figura 2.1: Estructura de control por modelo interno.

La idea principal del CMI es conectar el modelo de la planta con la planta real en paralelo, y el controlador se aproxima al inverso dinámico del modelo [20]. En particular si el sistema de control ha sido desarrollado implementando un modelo exacto del proceso real, entonces un control perfecto sobre la variable controlada es teóricamente posible [21].

Los diagramas de bloques de la Figura (2.1) pueden ser representados mediante funciones de transferencia en el dominio de Laplace como

$$\tilde{G}(s) = \frac{K_M e^{-sT_L}}{\tau_M s + 1}, \quad (2.5)$$

donde  $\tilde{G}(s)$  es el modelo del proceso,  $K_M$ ,  $\tau_M$  y  $T_L$  son los parámetros que determinan las características del proceso. La parte invertible del modelo  $\tilde{G}(s)$  se representa por

$$\tilde{G}^-(s) = \frac{\tau_M s + 1}{K_M}, \quad (2.6)$$

considerando como terminos no invertibles retardos de tiempo y ceros de fase no mínima. El filtro queda representado por

$$f(s) = \frac{1}{\tau_f s + 1}, \quad (2.7)$$

donde  $\tau_f$  es la constante de filtrado para el diseño del controlador. [19].

### 2.2.1. Modelo del Controlador (CMI)

La Figura (2.2) muestra una versión simplificada mediante álgebra de bloques de la estructura de control por modelo interno descrita en la Figura (2.1),

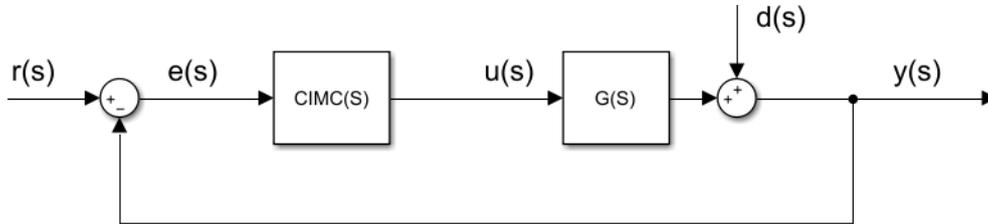


Figura 2.2: Estructura de control por modelo interno simplificada.

donde se obtiene que

$$C_{IMC} = \frac{C(s)}{1 - C(s)\tilde{G}(s)}, \quad (2.8)$$

por lo tanto la relación de la señal de salida con respecto a la señal de entrada queda determinada por

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{C_{IMC}(s) * G(s)}{1 + C_{IMC}(s) * G(s)}, \quad (2.9)$$

Reemplazando el valor de  $C_{IMC}$  en (2.9) se obtiene la siguiente ecuación

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{C(s) * G(s)}{1 - C(s) * \tilde{G}(s) + C(s) * G(s)}. \quad (2.10)$$

Para realizar el análisis, si se asume que el modelo de la planta representa de manera exacta al proceso real, se tiene que  $\tilde{G}(s) = G(s)$ , por lo tanto la ecuación (2.10) se reduce a

$$\frac{y(s)}{r(s)} = C(s) * G(s). \quad (2.11)$$

Del diagrama de bloques de la Figura (2.1) se tiene que el controlador  $C(s)$  es igual a la trayectoria directa entre el filtro y la parte invertible del modelo de manera que

$$C(s) = \tilde{G}^{-}(s) * f(s), \quad (2.12)$$

reemplazando  $\tilde{G}^{-}(s)$  y  $f(s)$  en la ecuación (2.12) y multiplicando se obtiene

$$C(s) = \frac{\tau_M s + 1}{K_M(\tau_f s + 1)}. \quad (2.13)$$

### 2.3. Predictor de Smith

El controlador de Smith es una estrategia de control basada en modelos. Dichos predictores usan un modelo de la planta para predecir los próximos valores de la salida. Este predictor también elimina el tiempo muerto de la ecuación característica. Por lo tanto permite diseñar el controlador sin considerar el retardo del proceso [22].

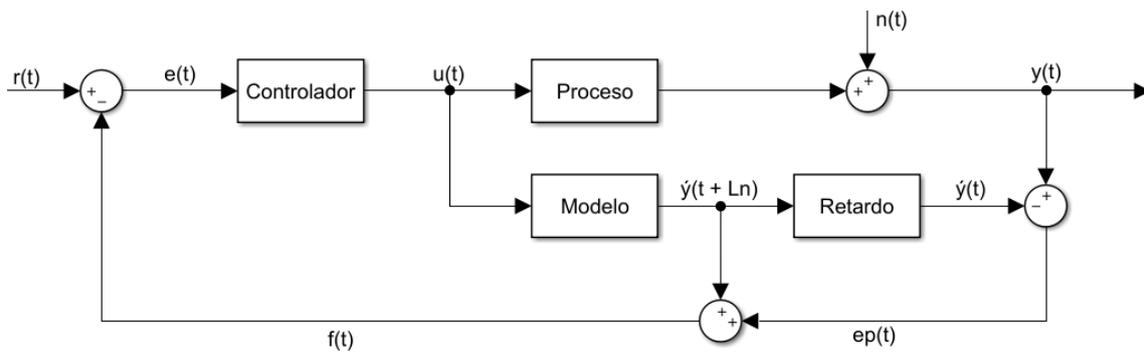


Figura 2.3: Estructura de control del Predictor de Smith.

El Predictor de Smith emplea una adaptación de la estructura por modelo interno que consiste en obtener un modelo matemático del proceso real y separarlo en dos bloques, uno que contenga la dinámica de la planta sin retardo y el otro que contenga el retardo, tal como se indica en la Figura (2.3). Los bloques de esta estructura pueden ser representados como  $P(s)$  para el proceso real,  $G_n(s)$  el modelo del proceso sin el retardo y  $C(s)$  el controlador.

#### 2.3.1. Modelo del Controlador (Predictor Smith)

Para lograr obtener una representación de control de lazo cerrado tradicional es necesario simplificar la estructura del Predictor de Smith mediante álgebra de bloques.

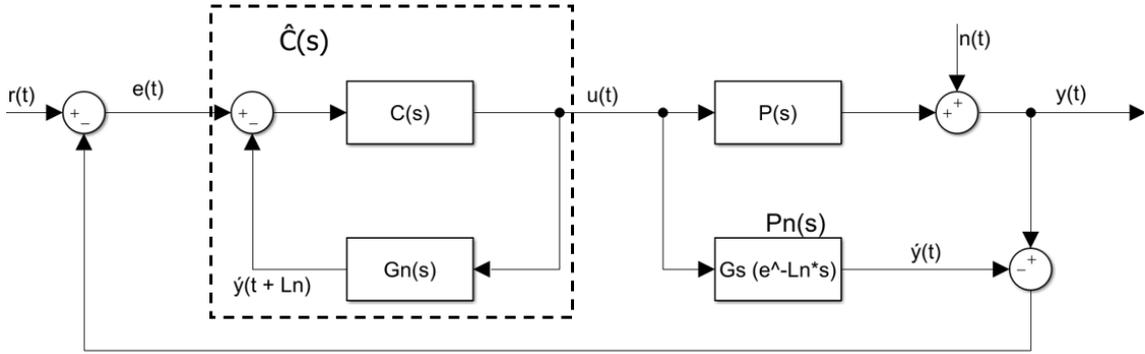


Figura 2.4: Modificación del Predictor de Smith.

En la Figura (2.4) se muestra una nueva expresión  $P_n(s)$  que representa al modelo del proceso incluido el retardo, y un nuevo controlador  $\hat{C}(s)$  que debido a la operación del diagrama de bloques está determinado por

$$\hat{C}(s) = \frac{C(s)}{1 + C(s)G_n(s)}. \quad (2.14)$$

Operando nuevamente para reducir el diagrama de bloques se obtiene un controlador equivalente  $C_{eq}(s)$  determinado por

$$C_{eq}(s) = \frac{\hat{C}(s)}{1 - \hat{C}(s)P_n(s)}. \quad (2.15)$$

Reemplazando la ecuación (2.14) en (2.15) se obtiene que

$$C_{eq}(s) = \frac{C(s)}{1 + C(s)G_n(s) - C(s)P_n(s)}, \quad (2.16)$$

con la siguiente estructura de control a lazo cerrado convencional.

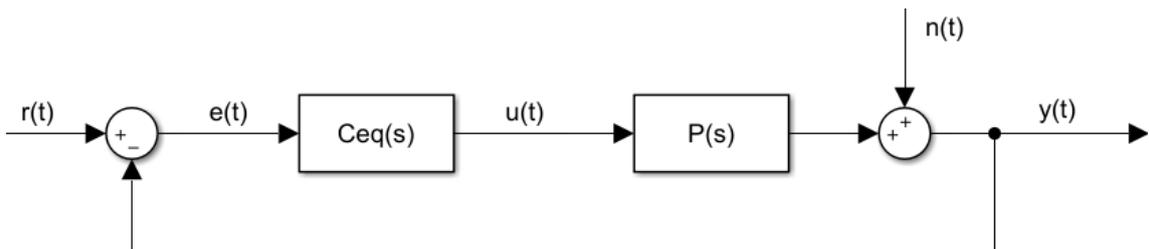


Figura 2.5: Predictor de Smith a lazo cerrado convencional.

La dinámica a lazo cerrado de la estructura de la Figura (2.5) está representada por

$$H(s) = \frac{C_{eq}(s)P(s)}{1 + C_{eq}(s)P(s)}, \quad (2.17)$$

reemplazando la ecuación (2.16) en (2.17) y simplificando se llega a la expresión

$$H(s) = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)[P(s) - P_n(s) + G_n(s)]}. \quad (2.18)$$

Para objetivos de análisis, si se asume un modelo perfecto del proceso real, se obtiene que  $P_n(s) = P(s)$ , por lo tanto la ecuación (2.18) se reduce a

$$H(s) = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)G_n(s)}, \quad (2.19)$$

lo cual elimina el retardo de la ecuación característica del sistema, por lo tanto el controlador se lo puede sintonizar como en un sistema sin retardo por el método que se considere más conveniente.

## 2.4. Discusión

En esta sección se ha obtenido un CMI y un Predictor de Smith que describen la dinámica de la relación aire - combustible que está representada para los dos casos por la ecuación (2.5) como un sistema de primer orden más un retardo puro, donde los parámetros  $T_L$ ,  $K_M$  y  $\tau_M$  representan el retardo, la ganancia y la constante de tiempo del sistema respectivamente. El desarrollo del modelo del controlador  $C(s)$  para el CMI basado en lo propuesto por [20] está expresado por la ecuación (2.13), donde  $\tau_f$  es el parámetro de diseño, mientras que para el Predictor de Smith el controlador actuará sobre la dinámica en lazo cerrado de la ecuación (2.19).

## Capítulo 3

# Implementación y Pruebas

En este capítulo se valida la teoría propuesta a través de simulaciones en el software Matlab y Simulink, además se analizan los resultados obtenidos para evaluar su funcionamiento<sup>1</sup>.

### 3.1. Planta

Para la validación de los métodos de control propuestos en el capítulo anterior se analiza el modelo de la planta (2.5). En [5] se pueden encontrar los valores del retardo  $T_L$ , que varía de 100 a 1000 ms y la constante de tiempo  $\tau_M$  que varía de 50 a 500 ms. Para una ganancia en estado estacionario  $K_M = 1$  y seleccionando ciertos valores entre los ya mencionados se tiene el siguiente modelo de la planta sobre la cual se realiza las simulaciones

$$\tilde{G}(s) = \frac{e^{-0.1s}}{0.05s + 1}. \quad (3.1)$$

### 3.2. Diseño del Controlador por CMI

Para el controlador  $C(s)$  descrito en la ecuación (2.13), se elige el valor de  $\tau_f = 0.025$  como parámetro de diseño para reducir la constante de tiempo del proceso a la mitad, dando como resultado

---

<sup>1</sup>Los archivos de las simulaciones se encuentran en el siguiente repositorio digital <https://github.com/MaderaFernando/Archivos-Tesis-Matlab.git>

$$C(s) = \frac{0.05s + 1}{0.025s + 1}. \quad (3.2)$$

En la Figura (3.1) se muestra la implementación del lazo de control en Simulink propuesto en el capítulo 2 en función de los parámetros de la planta, además se tiene una señal de entrada de tipo escalón unitario y una señal de perturbación a la salida de la planta que serán empleadas para el análisis del sistema.

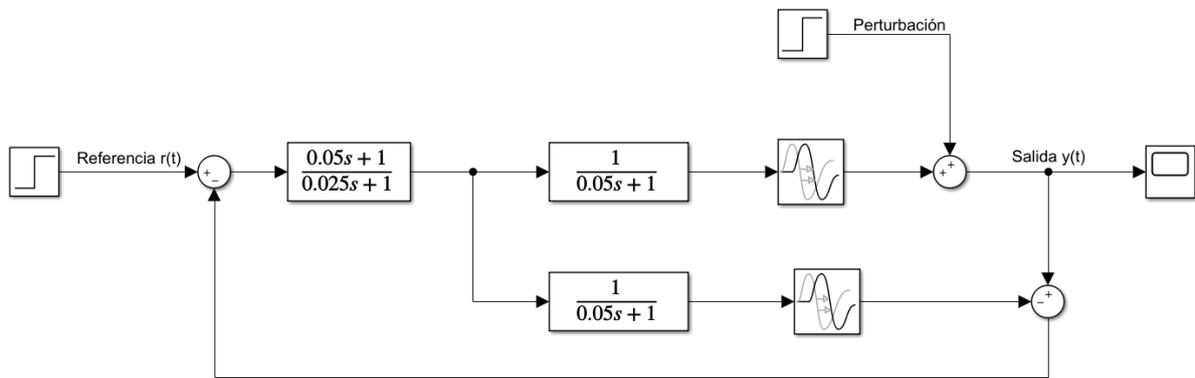


Figura 3.1: Implementación del Control por Modelo Interno en Simulink.

### 3.3. Diseño del controlador por Predictor de Smith

De acuerdo con [22] el Predictor de Smith permite desarrollar un controlador sin tomar en cuenta el retardo del proceso, por lo tanto se propone un controlador PI mediante cancelación de polos para la planta representada por el sistema de primer orden en (3.1).

El controlador PI para el Predictor de Smith se expresa por

$$C(s) = \frac{Kc(\tau_i s + 1)}{\tau_i s}, \quad (3.3)$$

donde  $Kc$  es la ganancia proporcional y  $\tau_i$  es el tiempo integral. Para aplicar el método de cancelación de polos, el cero del controlador tiene que ser igual al polo de la planta, por lo tanto  $\tau_i = \tau_M = 0.05$ , y se obtiene que

$$C(s) = \frac{K_c(0.05s + 1)}{0.05s}. \quad (3.4)$$

Reemplazando (3.1) sin el retardo y (3.4) en (2.19) y simplificando se obtiene la expresión

$$H(s) = \frac{1}{\frac{\tau_M}{K_c K_M} s + 1}, \quad (3.5)$$

donde el término  $\frac{\tau_M}{K_c K_M}$  representa una nueva constante de tiempo deseada y expresada como

$$\tau_d = \frac{\tau_M}{K_c K_M}. \quad (3.6)$$

Finalmente despejando  $K_c$  de la expresión anterior y reemplazando los valores de  $K_M$ ,  $\tau_M$  y con  $\tau_d = 0.025$  para reducir la constante de tiempo a la mitad, se obtiene el valor de la ganancia proporcional,  $K_c = 2$ , que reemplazando en (3.4) da como resultado la función de transferencia del controlador

$$C(s) = \frac{0.1s + 2}{0.05s}. \quad (3.7)$$

La Figura (3.2) muestra la implementación del Predictor de Smith en Simulink, donde se puede apreciar la función de transferencia del controlador  $C(s)$  obtenido y dos señales de tipo escalón, una como referencia y la otra como perturbación.

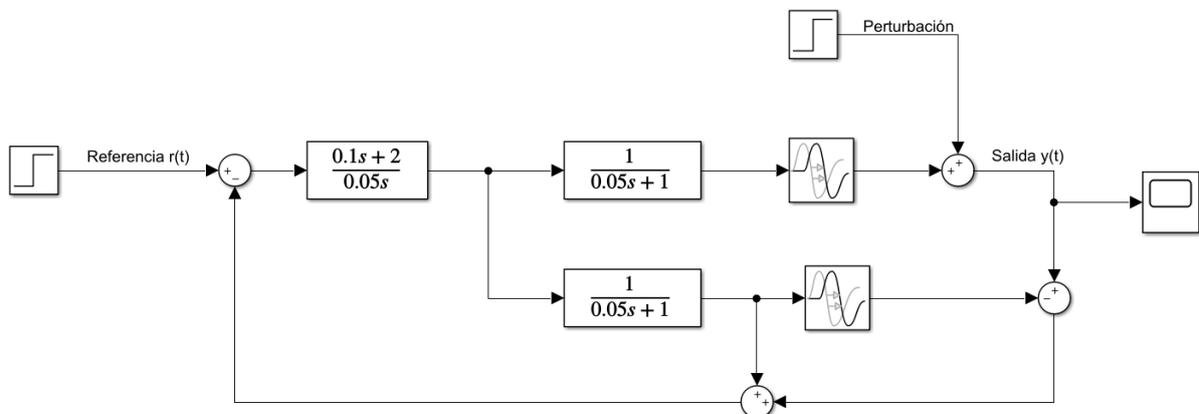


Figura 3.2: Implementación del Predictor de Smith en Simulink.

## 3.4. Pruebas y Análisis de Resultados

### 3.4.1. Respuesta al Escalón Unitario

La prueba consiste en someter al sistema a una señal de escalón unitario. La Figura (3.3) muestra las respuestas del sistema sin controlador, con el controlador por modelo interno y el Predictor de Smith. Se puede apreciar como los parámetros de diseño  $\tau_f$  y  $\tau_d$  actúan en las respuestas alcanzando el 63.2% de la amplitud máxima en un tiempo de 0.125 segundos acelerando su tiempo de establecimiento, a diferencia de la planta sin controlador que alcanza el 63.2% en un tiempo de 0.15 segundos.

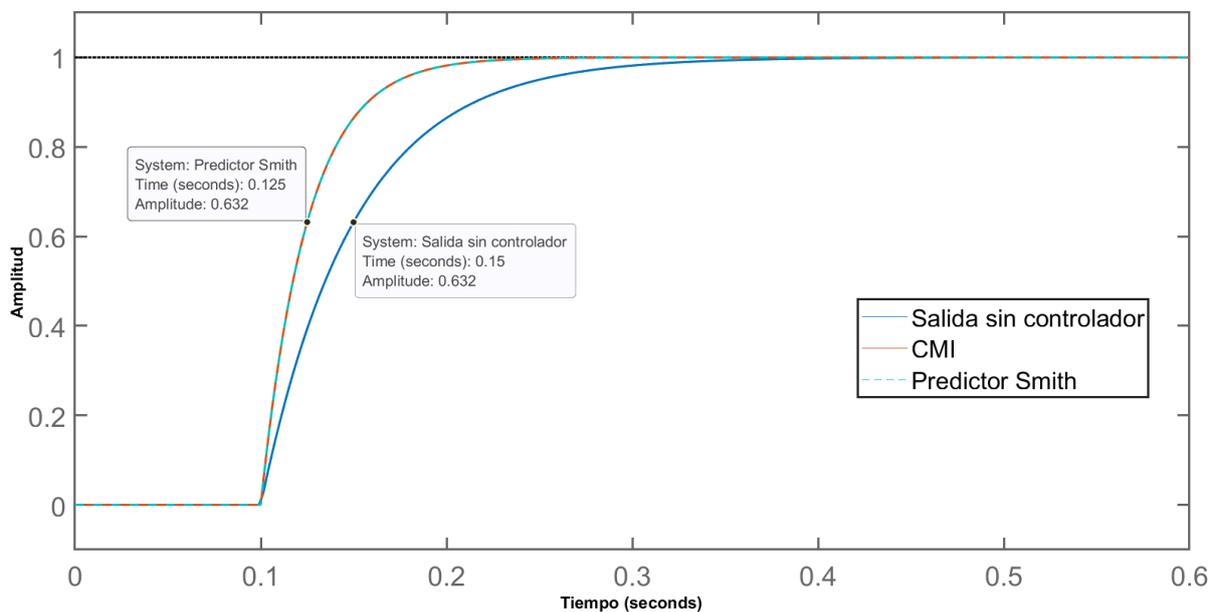


Figura 3.3: Respuesta al escalón unitario.

### 3.4.2. Respuesta al Escalón Unitario y Perturbación

La prueba consiste en someter al sistema a una señal de escalón unitario y a una segunda señal de entrada como perturbación a la salida de la planta con una amplitud del 20% de la señal de referencia en un tiempo de 0.3 segundos. La Figura (3.4) muestra como las salidas del sistema se ven afectadas cuando detectan la perturbación y después del tiempo de retardo la acción de control actúa llevando las señales de salida al valor de la referencia a pesar de que la perturbación aún permanece activa.

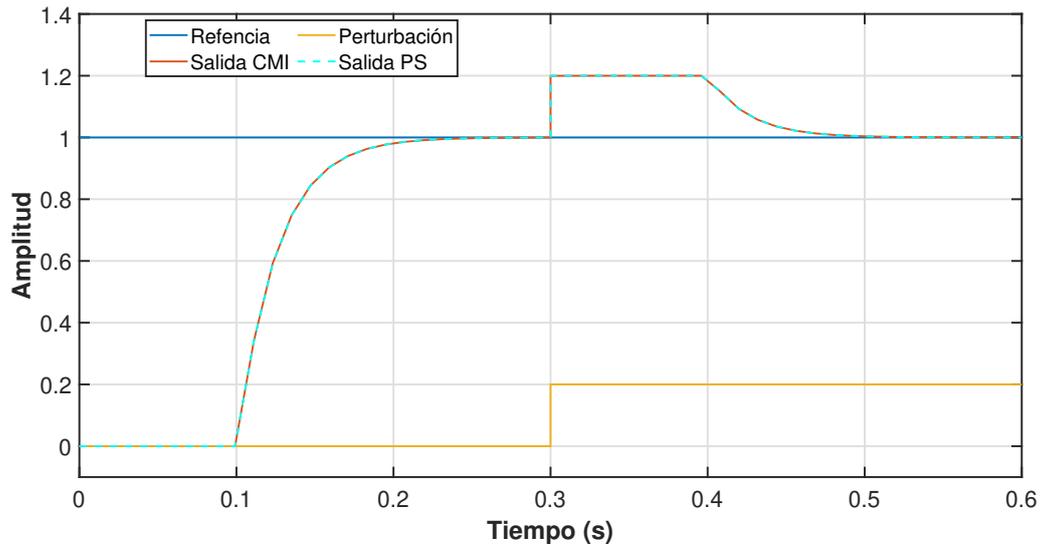


Figura 3.4: Respuesta al escalón unitario y perturbación.

### 3.4.3. Respuesta al Cambio de la Señal de Entrada

La prueba consiste en someter al sistema a una señal de entrada que varía de forma aleatoria en el tiempo. En la Figura (3.5) se puede apreciar como las salidas tienden a seguir a la señal referencia con una leve desviación provocada por el retardo de la planta, y una vez la señal de entrada se mantiene estable las salidas también tienden a estabilizarse en el valor de la referencia.

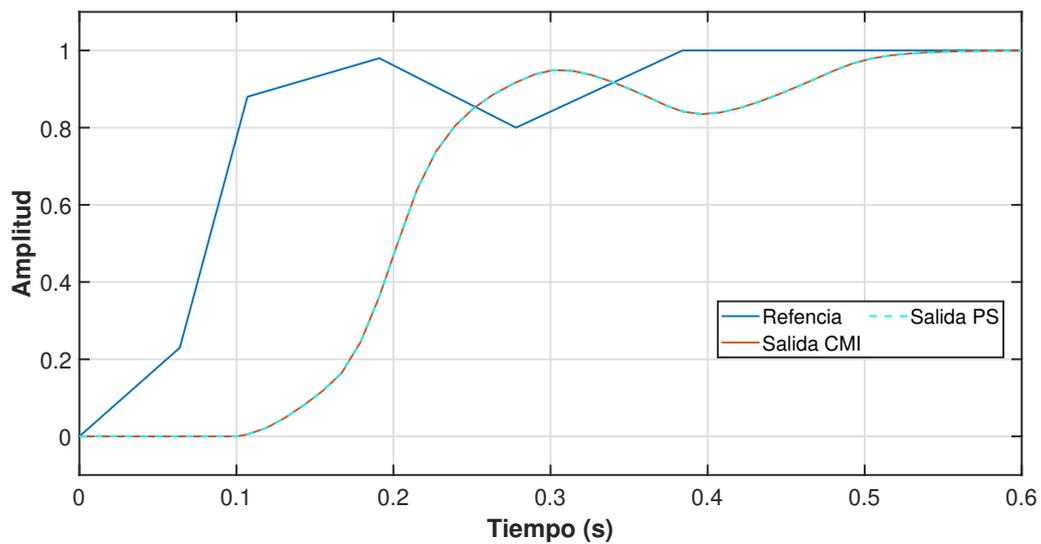


Figura 3.5: Respuesta al cambio de la señal de entrada.

### 3.4.4. Respuesta al Escalón Unitario con Variación en el Modelo

Para esta prueba se emplea tanto para el controlador por modelo interno como para el Predictor de Smith un modelo que difiere levemente del proceso real de la planta donde se establece el valor de  $\tau_M = 0.04$  y se somete al sistema a una entrada de tipo escalón. En la Figura (3.6) se puede observar cómo las respuestas empiezan a presentar sobreimpulso y un incremento en el tiempo de establecimiento, lo cual indica que cuando el modelo de la planta se aleje lo suficiente del proceso real, los lazos de control se volverán inestables. También se puede observar que el controlador por modelo interno alcanza por primera vez el valor de la referencia más rápido que el Predictor de Smith pero con un sobreimpulso también mayor.

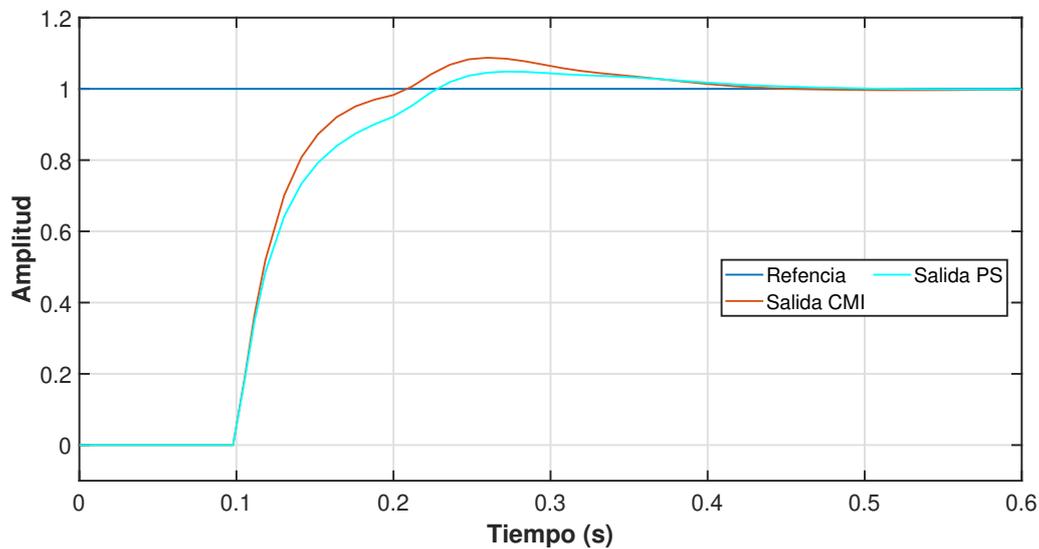


Figura 3.6: Respuesta del sistema con variación en el modelo.

## 3.5. Análisis de Estabilidad

La estabilidad del sistema se puede analizar mediante su respuesta en frecuencia a través de la taza de Nyquist y estudiar su comportamiento con respecto del punto  $(-1, j0)$ . En la Figura (3.7) se puede observar que el sistema es estable ya que los trazos del diagrama de Nyquist no encierran el punto  $(-1, j0)$  el cual de acuerdo con la teoría representa la inestabilidad.

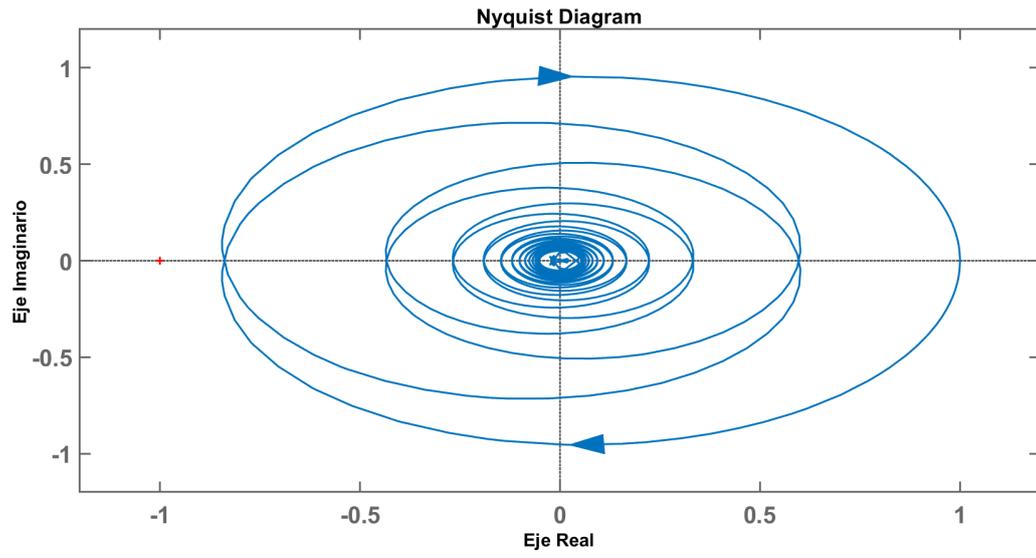


Figura 3.7: Estabilidad mediante el diagrama de Nyquist.

## Capítulo 4

# Conclusiones y Trabajo Futuro

En este capítulo se muestran algunas conclusiones del presente proyecto y se proponen posibles estudios a futuro.

### 4.1. Conclusiones

- El sistema de inyección de combustible puede ser muy complejo de representar, por lo que para sistemas de control hay que elegir el modelo que mejor se adapte a las necesidades y objeto de estudio, en muchas ocasiones se escoge un entorno con condiciones ideales para su análisis. En este trabajo se representó un modelo SISO y se tomó en cuenta como variable principal la relación aire - combustible.
- El modelo empleado para describir la relación aire - combustible de un motor de inyección fue representado por un sistema de primer orden más un retardo puro, el cual representa la dinámica del proceso para lograr obtener la relación estequiométrica entre el aire y el combustible que entra al cilindro.
- En este trabajo se utilizó control por modelo interno y un predictor de Smith en un entorno ideal, donde las variables del modelo representaron de manera exacta al proceso real y se comprobó de forma satisfactoria el control ante distintas señales de entrada y perturbaciones. También se probó los controladores con un modelo aproximado al real pero no igual, en el cual se determina que si los valores de los parámetros de la función de transferencia difieren demasiado se empiezan a producir oscilaciones y sobreimpulso, lo cual puede generar inestabilidad o un comportamiento no deseado.

- El retardo puro al ser intrínseco de la planta no se puede manipular pero sí el tiempo para alcanzar el estado estable variando los parámetros de diseño del controlador, en este caso se logró reducir la constante de tiempo del sistema a partir del retardo en un 50% de acuerdo con las simulaciones realizadas en Matlab y Simulink.

## 4.2. Trabajo Futuro

En el presente trabajo se representó la relación aire - combustible mediante un sistema de primer orden más un retardo puro y dos estrategias de control, la primera basada en modelo interno y la segunda en un Predictor de Smith. Por medio de en Matlab y Simulink se comprobó su comportamiento ante señales de referencia y perturbaciones. La validación experimental de los controladores en este sistema puede resultar costosa y complicada de implementar, así que como trabajo futuro se propone representar el modelo sin el retardo de tiempo mediante aproximación de Padé o Series de Taylor y emplear otras estrategias de control clásico para la sintonías de controladores o aplicar estrategias de control moderno para comparar cuáles presentan un mejor desempeño.

# Bibliografía

- [1] MY RAFAEL MORALES y A HERNANDEZ GUZMAN. “CARACTERIZACION DE UN MOTOR DE COMBUSTION INTERNA CON DOS TIPOS DE COMBUSTIBLE”. En: *PUBLICACION TECNICA* 417 (2014).
- [2] Yandri Loayza Romero y Raúl Abril Rivera. “Control del sistema de inyección de un motor a gasolina”. B.S. thesis. Universidad del Azuay, 2006.
- [3] Yusuke Hasegawa, Shusuke Akazaki, Isao Komoriya, Hidetaka Maki, Youichi Nishimura y Toshiaki Hirota. *Individual cylinder air-fuel ratio feedback control using an observer*. Inf. téc. SAE Technical Paper, 1994.
- [4] Shinsuke Takahashi y Teruji Sekozawa. “Air-fuel ratio control in gasoline engines based on state estimation and prediction using dynamic models”. En: *Proceedings of IECON'95-21st Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*. Vol. 1. IEEE. 1995, págs. 217-222.
- [5] A Galip Ulsoy, Huei Peng y Melih Çakmakci. *Automotive control systems*. Cambridge University Press, 2012.
- [6] Wilians Roberto Yáñez Molina. “Simulación del sistema de inyección electrónica de combustible, usando MATLAB y lógica difusa”. B.S. thesis. Quito: EPN, 2002., 2002.
- [7] Cristian Kunusch. “IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS DINÉMICOS”. En: *Universidad Nacional de la Plata, Cátedra de control y servomecanismos* (2003), pág. 39.
- [8] Jing Na, Anthony Siming Chen, Yingbo Huang, Ashwini Agarwal, Andrew Lewis, Guido Herrmann, Richard Burke y Chris Brace. “Air-Fuel Ratio Control of Spark Ignition Engines With Unknown System Dynamics Estimator: Theory and Experiments”. En: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 29.2 (2021), págs. 786-793. DOI: 10.1109/TCST.2019.2951125.

- [9] Gastón Marcos Giner y Alejandro Oscar Bulla. “Control de la mezcla aire-combustible y encendido, en un motor de combustión interno, ciclo Otto”. Tesis doct. Universidad Católica de Córdoba, 1996.
- [10] Wolfgang Schick, Christopher Onder y Lino Guzzella. “Individual cylinder air-fuel ratio control using Fourier analysis”. En: *IEEE transactions on control systems technology* 19.5 (2010), págs. 1204-1213.
- [11] Jessy W Grizzle, Kelvin L Dobbins y Jeffrey A Cook. “Individual cylinder air-fuel ratio control with a single EGO sensor”. En: *IEEE Transactions on vehicular technology* 40.1 (1991), págs. 280-286.
- [12] Aditya Mulemane, Joong-Sub Han, Pai-Hsiu Lu, Suck-Ju Yoon y Ming-Chia Lai. *Modeling dynamic behavior of diesel fuel injection systems*. Inf. téc. SAE Technical Paper, 2004.
- [13] Jimmy Lauber, Thierry-Marie Guerra y Michel Dambrine. “Air-fuel ratio control in a gasoline engine”. En: *International Journal of Systems Science* 42.2 (2011), págs. 277-286.
- [14] Miguel Ángel Mancilla Morelos et al. “Diseño de un control no lineal para la mezcla de aire-combustible en un motor de combustión interna mediante regulación por retroalimentación del error”. En: (2012).
- [15] Akira Ohata, Michihiro Ohashi, Masahiro Nasu y Toshio Inoue. *Model based air fuel ratio control for reducing exhaust gas emissions*. Inf. téc. SAE Technical Paper, 1995.
- [16] JW Grizzle, JA Cook y WP Milam. “Improved cylinder air charge estimation for transient air fuel ratio control”. En: *Proceedings of 1994 American Control Conference-ACC'94*. Vol. 2. IEEE. 1994, págs. 1568-1573.
- [17] Cesare Alippi, Cosimo de Russis y Vincenzo Piuri. “A neural-network based control solution to air-fuel ratio control for automotive fuel-injection systems”. En: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* 33.2 (2003), págs. 259-268.
- [18] Kenneth R Muske, James C Peyton Jones y EM Franceschi. “Adaptive analytical model-based control for SI engine air-fuel ratio”. En: *IEEE Transactions on control systems technology* 16.4 (2008), págs. 763-768.

- [19] YohnSanjuán Marco Smith CarlosGarcía. “Controlador de modelo interno con filtro difuso(IMCFD)”. Español. En: *Ingeniería y Desarrollo* (2005). ISSN: 0122-3461. URL: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85201704>.
- [20] Mathew K Anish. “Internal model control of pressure process using arm microcontroller”. En: *2012 International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies (ICCEET)*. IEEE. 2012, págs. 351-353.
- [21] Israel García YohnLobo. “Controlador PID integrado por la estructura de control de modelo interno (IMC) y lógica difusa”. Español. En: *Ciencia e Ingeniería* (2008). ISSN: 1316-7081. URL: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=507550784005>.
- [22] Deepak Kumar, Pulakraj Aryan y G Lloyds Raja. “Design of a novel fractional-order internal model controller-based Smith predictor for integrating processes with large dead-time”. En: *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering* 17.1 (2022), e2724.

```

% Se limpia el espacio de trabajo
clear all
clc
close all

%% Codigo para el controlador IMC%%

% Proceso real
Km=1;
Tl=0.1;
TauM=0.05;
num=Km;
den=[TauM 1];
Gs=tf(num,den,'outputdelay',Tl)

% Modelo de la planta
KmMod=1;
TlMod=0.1;
TauMod=0.05;
numMod=KmMod;
denMod=[TauMod 1];
Gmodelo=tf(numMod,denMod,'outputdelay',TlMod)

% Filtro
TauF=0.025 %Parámetro de diseño
numF=1;
denF=[TauF 1];
fs=tf(numF,denF)

% Controlador
numCs=[TauM 1];
denCs=Km*[TauF 1];
Cs=tf(numCs,denCs)
% Salida del sistema
y_s=(Cs*Gs)

%% Código para el Predictor de Smith

Ps=tf(num,den,'outputdelay',Tl)
Gn=tf(numMod,denMod)
Taud=TauF
Kc=TauM/(Taud*Km)
Taut=TauM
numCsSM=Kc*[Taut 1]
denCsSM=[Taut 0]
CsSM=tf(numCsSM,denCsSM)
% Salida del sistema
Hs=(CsSM*Ps)/(1+(CsSM*Gn))

```

```

%% Gráfica de la respuesta al escalón unitario
step(Gs,y_s,Hs,'c--')
box on
grid off
xlim([0 0.6])
ylim([-0.1 1.1])
xlabel('Tiempo','FontWeight','bold')
ylabel('Amplitud','FontWeight','bold')
legend('Salida sin controlador','CMI','Predictor Smith','LineWidth',1.5,'fontsize',16,'Location','best','NumColumns',1)
set(gca,'linewidth',1.5,'fontsize',18)

%% Grafica la respuesta del sistema ante una entrada escalón y una perturbación CMI y PS
close all
clc
hold on
box on
grid on
plot(out.CMI_Ref_Pert,'LineWidth',1.5)
plot(out.CMI_Salida_Pert,'LineWidth',1.5)
plot(out.CMI_Pert,'LineWidth',1.5)
plot(out.PS_Salida_Pert,'C--','LineWidth',1.5)
xlim([0 0.6])
ylim([-0.1 1.4])
xlabel('Tiempo (s)','FontWeight','bold')
ylabel('Amplitud','FontWeight','bold')
legend('Referencia','Salida CMI','Perturbación','Salida PS','fontsize',16,'Location','best','NumColumns',2)
set(gca,'linewidth',1.5,'fontsize',18)

%% Grafica la respuesta del sistema ante el cambio a la entrada CMI y PS
close all
clc
hold on
box on
grid on
plot(out.CMI_Ref_Camb_Entr,'LineWidth',1.5)
plot(out.CMI_Salida_Camb_Entr,'LineWidth',1.5)
plot(out.PS_Salida_Camb_Entr,'C--','LineWidth',1.5)
xlim([0 0.6])
ylim([-0.1 1.1])
xlabel('Tiempo (s)','FontWeight','bold')
ylabel('Amplitud','FontWeight','bold')
legend('Referencia','Salida CMI','Salida PS','fontsize',16,'Location','best','NumColumns',2)
set(gca,'linewidth',1.5,'fontsize',18)

%% Grafica la respuesta del sistema ante variación en el modelo CMI y PS
close all
clc
hold on
box on
grid on
plot(out.CMI_Ref_Var_Mod,'LineWidth',1.5)
plot(out.CMI_Salida_Var_Mod,'LineWidth',1.5)
plot(out.PS_Salida_Var_Mod,'C-','LineWidth',1.5)
xlim([0 0.6])
ylim([-0.1 1.2])
xlabel('Tiempo (s)','FontWeight','bold')
ylabel('Amplitud','FontWeight','bold')
legend('Referencia','Salida CMI','Salida PS','fontsize',16,'Location','best','NumColumns',2)
set(gca,'linewidth',1.5,'fontsize',18)

```

### Control Por Modelo Interno

