

# **Trabajo Final de Teoría de Control: Sistema de Control de Inyección Electrónica con Sonda de Oxígeno**

**Alumnos:**

- **Tomas Valentin Delgado Andrade  
(2035510)**
- **Maria Isabella Innocente (2037350)**

**Materia: Teoría de Control**

**Profesor: Omar Oscár Cívale**

**Comisión: K4572**

**Turno: Lunes noche**

**Año: 2025**

**Nota:**

# **Pautas para el desarrollo del Trabajo**

## **Final de Teoría de Control**

### **1. Objeto de este documento**

Proporcionar una guía de orientación para el desarrollo del Trabajo de Integración de Teoría de Control (oportunamente explicitado en sucesivas clases desde el inicio de la cursada).

Contiene el propósito, objetivos del trabajo, las pautas a seguir y las recomendaciones correspondientes.

### **2. Propósito**

- Aplicar la totalidad de los conceptos fundamentales de la Teoría de Control a un sistema controlado elegido por cada equipo de trabajo.

### **3. Objetivos Generales**

- Seleccionar un sistema de control aplicado a una solución tecnológica (preferentemente, del área de sistemas de la información).
- Fundamentar el sistema propuesto utilizando, a modo de marco teórico, los conceptos, fundamentos, enfoques y estrategias de la Ingeniería de Control.
- Aplicar diferentes técnicas o herramientas informáticas, en forma creativa, para realizar gráficos, modelos, cuadros comparativos, y, en general para expresar el análisis del problema y la solución propuesta.

### **4. Pautas**

#### **§ Desarrollo del trabajo**

El trabajo de investigación será desarrollado por equipos de no más de dos integrantes.

La fecha de entrega del Trabajo Final será informada mediante la plataforma del webcampus. Esta fecha permitirá la corrección del mismo antes de la primera fecha de llamado a final.

Para el caso de que el TP no sea aprobado y requiera de correcciones y/o mayor desarrollo, o no haya sido presentado hasta la fecha indicada, se estipulará una nueva fecha tope de entrega mediante el mismo procedimiento.

(Preferentemente, y por la condición excluyente de aprobación de la materia se sugiere entregarlo antes de las fechas indicadas).

Una vez aprobado el TP, y en caso de tener cumplimentadas la totalidad de las actividades obligatorias pautadas, el alumno estará en condiciones de firmar la libreta.

Para ello, se pautarán fechas a tal efecto.

La entrega se realizará en formato de archivo PDF por cada alumno en el web campus del curso (en el sitio dedicado a tal efecto).

En cada trabajo se incluirá en la carátula el listado de integrantes del grupo.

Pueden realizarse consultas durante el período de desarrollo.

### § Composición del Trabajo de Investigación

El trabajo, desde el punto de vista formal, estará compuesto de las siguientes partes:

- Carátula: incluye el tema e integrantes del equipo de trabajo.
- Copia del presente documento.
- Índice: contenido del documento elaborado por el equipo.
- Introducción: se referirá al “segmento / mercado” en que se encuadra el trabajo (por ejemplo, “...el control del riego y la fertilización de una plantación...”).
- Objetivos: cuales son los objetivos de control a ser alcanzados y cual es la solución que se plantea u ofrece.

- Alcance: definir la estructura del sistema considerado, describiendo e identificando clara y explícitamente las diferentes funcionalidades correspondientes al mismo (por ejemplo: contexto; puntos de interconexión con el mundo exterior; tipo de transductores; variables que se desea controlar, tipos unidades y rangos de entradas y salidas, amplificador de error; señales de error y realimentación; elementos de medición, características y variables componentes de las transferencias presentes en el sistema ; características de la respuesta; perturbaciones externas e internas a considerar; características y tipo de error; caracterización de la estabilidad; ley de control y tipo de actuación utilizada; relación entre señales analógicas y discretas / digitales; carga/s asociadas al sistema).El trabajo deberá incluir un programa confeccionado en LOGO (en lenguaje de bloques), que permita simular y verificar la funcionalidad del sistema.

IMPORTANTE: Tal lo explicitado en clase, no se solicita la descripción genérica del sistema controlado sino la identificación y descripción de su estructura.

En definitiva, “encontrar” la totalidad de los contenidos y conceptos trabajados y estudiados desde el dominio de la teoría de control.

- Descripción, desarrollo y fundamentación de la propuesta: debe ser clara, recomendándose técnicas de escritura conceptual y gráfica.
- Conclusión: A modo de conclusión, establecer la necesidad y ventajas comparativas del sistema de control propuesto. Es importante incluir opiniones del grupo en cuanto a posibles mejoramientos, objeciones, etc., que permitan establecer un cierto criterio ingenieril desde la perspectiva del equipo de trabajo.
- Consideraciones especiales: si aplica, indicar.
- Bibliografía: citar libros, documentos de texto y fotográficos, folletos de dispositivos transductores, actuadores, sitios web y papers consultados.

# Índice

<b>Pautas para el desarrollo del Trabajo Final de Teoría de Control.....</b>	<b>2</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>6</b>
<b>Objetivos.....</b>	<b>6</b>
<b>Alcance.....</b>	<b>7</b>
Contexto.....	7
Puntos de Interconexión con el Exterior.....	7
Diagrama de Bloques y Elementos del Sistema.....	8
Elemento de Medición (Sonda Lambda).....	10
Variable a controlar.....	11
Entrada.....	11
<b>Simulación.....</b>	<b>15</b>
<b>Descripción, desarrollo y fundamentación de la propuesta:.....</b>	<b>16</b>
<b>Conclusión:.....</b>	<b>16</b>

# Introducción

En la actualidad, los motores de combustión interna utilizan sistemas de inyección electrónica de combustible (EFI) para regular la cantidad de combustible suministrado a la cámara de combustión. El objetivo principal de estos sistemas es mantener una mezcla aire-combustible adecuada que permita alcanzar una combustión eficiente, reducir el consumo y minimizar las emisiones contaminantes. Para lograrlo, se implementó un sistema de control automático en lazo cerrado basado en la medición del oxígeno residual en los gases de escape.

El elemento central de la realimentación es la sonda de oxígeno (sonda lambda), que mide la concentración de oxígeno presente en los gases de escape y entrega una señal eléctrica en volts a la Unidad de Control Electrónica (ECU). A partir de esta señal, la ECU evalúa si la mezcla resultante es rica (exceso de combustible, poco oxígeno) o pobre (exceso de aire, mucho oxígeno) y ajusta en consecuencia el tiempo de apertura del inyector mediante la modulación del pulso (Pulse Width, PW).

En este trabajo se analizará un modelo simplificado de este sistema de control aplicado a un motor monocilíndrico de inyección electrónica a régimen constante de revoluciones por minuto (rpm).

## Objetivos

El principal objetivo de control es mantener la concentración de oxígeno en los gases de escape (% O<sub>2</sub>) en un nivel óptimo. Este valor es crítico para asegurar una combustión estequiométrica, es decir, una relación ideal entre el aire y el combustible. La consecución de este objetivo resulta en beneficios clave para el rendimiento del motor y el medio ambiente:

- **Eficiencia de la Combustión:** Maximizar la eficiencia del proceso de combustión para obtener el máximo rendimiento energético.
- **Reducción del Consumo de Combustible:** Al mantener la mezcla aire-combustible en su punto ideal, se minimiza el consumo de combustible.
- **Minimización de Emisiones Contaminantes:** Una combustión eficiente reduce la generación de gases contaminantes como monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).

# Alcance

El alcance de este trabajo es definir la estructura del sistema de control de inyección electrónica, describiendo e identificando clara y explícitamente las diferentes funcionalidades, componentes y variables correspondientes al mismo. El objetivo no es una descripción genérica, sino "encontrar" la totalidad de los conceptos de la Teoría de Control aplicados al sistema.

## Contexto

El sistema bajo análisis es un sistema de control automático en lazo cerrado aplicado a motores de combustión interna equipados con inyección electrónica de combustible (EFI). El propósito es regular la cantidad de combustible suministrado para mantener una mezcla aire-combustible óptima.

Para este trabajo, el modelo se enfoca en un motor operando a régimen constante (RPM fijas), una temperatura del ambiente en un rango de  $-5^{\circ}\text{C}$  a  $45^{\circ}\text{C}$  y una presión atmosférica desde el nivel del mar (aprox. 1013 hPa) hasta condiciones de alta montaña (aprox. 700 hPa). El elemento central de la realimentación es una sonda de oxígeno (Sonda Lambda), que mide la composición de los gases de escape.

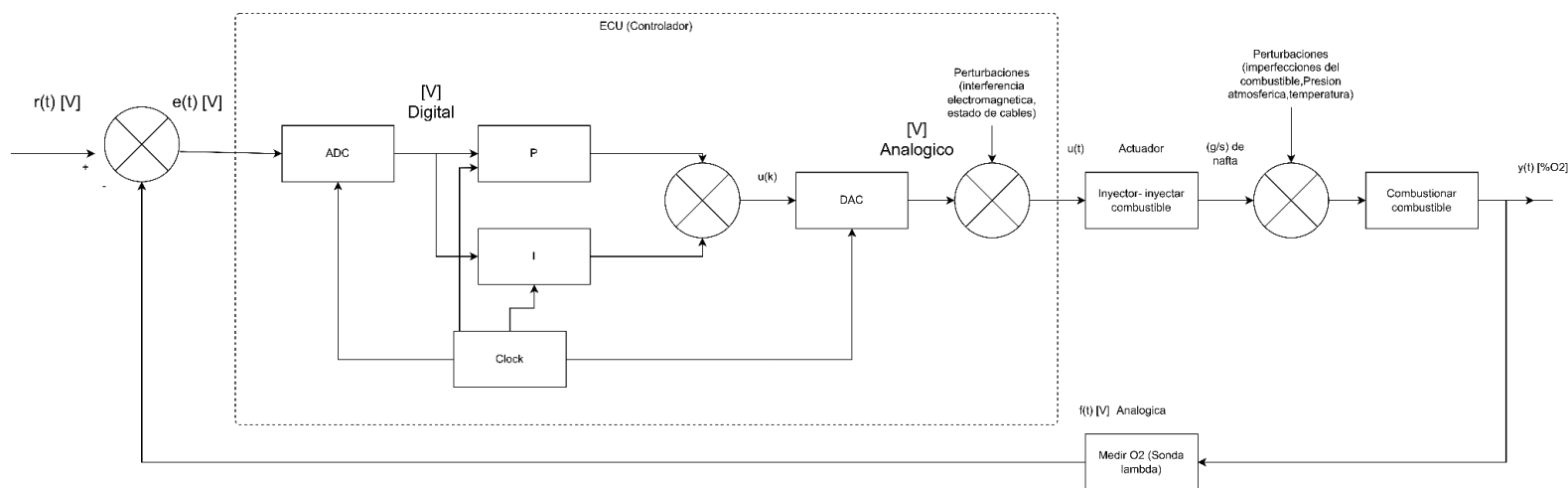
## Puntos de Interconexión con el Exterior

El sistema interactúa con su entorno a través de los siguientes puntos:

- **Entrada de Referencia (Setpoint):** Valor de voltaje (V) fijado por software dentro de la ECU, que representa la concentración de  $\text{O}_2$  ideal para la mezcla estequiométrica (ej. 0.45 V).
- **Salida del Proceso:** Emisión de gases de escape hacia la atmósfera, cuya composición es medida por el sensor.
- **Entorno Físico (Perturbaciones):** El sistema es sensible a las variaciones bruscas de los parámetros del entorno, como la temperatura ambiente (rango  $-5^{\circ}\text{C}$  a  $45^{\circ}\text{C}$ ) y la presión atmosférica (que varía con la altitud), ya que afectan directamente la densidad del aire.

## Diagrama de Bloques y Elementos del Sistema

El sistema opera como un lazo de control digital híbrido, donde el controlador (ECU) es digital, mientras que la planta (motor) y el sensor (sonda) son analógicos.



Identificación de Elementos:

Elemento del Sistema	Función en el Lazo de Control	Variables Componentes
Punto Suma (Comparador)	Realizado por software dentro de la ECU. Calcula la señal de error $e(k)$ restando la señal de realimentación de la señal de referencia.	Entrada: Referencia (V), Realimentación (V)
ADC	Transductor que muestrea y convierte la señal analógica de la sonda (Voltaje) en una señal digital que la ECU pueda procesar.	Entrada: Señal de error analógica [V] Salida: Señal de Error Digital [V]



Controlador (ECU)	Unidad de Control Electrónica. Implementa la Ley de Control Proporcional-Integral (PI) para calcular la acción correctiva.	Salida: Señal de Control Digital $u(k)$ [V]
DAC	Transductor que convierte la señal de control digital $u(k)$ en una señal física de actuación: un pulso de voltaje con un ancho (tiempo) variable (PWM).	Salida: Señal de Control Analógica $u(t)$ (ms)
Actuador (Inyector)	Inyector de combustible. Es una válvula solenoide que se abre durante el tiempo $u(t)$ especificado por el PWM para dosificar el combustible.	Acción: Flujo de combustible (caudal)
Planta (Proceso)	El Motor de Combustión Interna. Recibe el combustible (actuación) y el aire (perturbación), y realiza el proceso de Combustión, generando como salida los gases de escape.	Transferencia: $G(s)$ [%O <sub>2</sub> ]
Sensor (Elemento de Medición)	Sonda de Oxígeno (Sonda Lambda). Transductor que mide la variable controlada (% O <sub>2</sub> ) en los gases de escape.	Salida: Señal de Realimentación $f(t)$ (V)

No se utiliza un amplificador de error analógico en la entrada. La comparación se realiza digitalmente. Sin embargo, sí es necesaria una etapa de Acondicionamiento de Señal (Signal Conditioning) antes del ADC (Incluida dentro del ADC en el grafico).

### Elemento de Medición (Sonda Lambda)

El elemento de medición es una sonda de Zirconio Bosch LSH-25. A continuación, se detallan sus especificaciones técnicas operativas.

- **Exactitud:**  
El punto de conmutación del sensor se produce en el punto estequiométrico ( $\lambda = 1$ ). La exactitud del voltaje de referencia en este punto es de  $450\text{ mV} \pm 15\text{ mV}$  (a temperatura de operación).
- **Precisión:**  
La repetibilidad de la medición, una vez alcanzada la temperatura de operación, es alta. Presenta una fluctuación de voltaje (ruido intrínseco) inferior a  $\pm 10\text{ mV}$  respecto a una medición anterior bajo idénticas condiciones de mezcla.
- **Sensibilidad:**  
Es una de sus características principales y es altamente no lineal. La sensibilidad es máxima cerca del punto estequiométrico ( $\lambda = 1$ ), donde un cambio mínimo en la mezcla (ej.  $\pm 0,1\lambda$ ) provoca un salto de voltaje de más de  $600\text{ mV}$ . Lejos de este punto, la sensibilidad es muy baja (la curva se "aplana").
- **Linealidad:**  
Nula. El sensor no es lineal y no está diseñado para serlo. Su respuesta es sigmoide (forma de "S"), diseñada para actuar como un "interruptor" (switch) que indica dos estados: "Rico" ( $> 450\text{ mV}$ ) o "Pobre" ( $< 450\text{ mV}$ ).
- **Ruido:**  
La señal es altamente susceptible a interferencia electromagnética (EMI) del sistema de ignición. Un cableado y apantallamiento correctos deben mantener el ruido exógeno por debajo de  $20\text{-}30\text{ mV p-p}$  (pico a pico). Este es el motivo principal por el que no se utiliza una acción Derivativa (D) en el controlador.
- **Constante de tiempo:**  
Es el tiempo de respuesta al 63.2% de un escalón. Este valor depende críticamente de la temperatura del sensor ( $> 350\text{ C}$ ).
  - Respuesta (Rica a Pobre,  $0.8\text{V} \rightarrow 0.2\text{V}$ ):  $\tau \approx 50\text{ms}$
  - Respuesta (Pobre a Rica,  $0.2\text{V} \rightarrow 0.8\text{V}$ ):  $\tau \approx 80\text{ms}$
- **Rango de Medida :**  
Es el conjunto de valores de la variable física (%  $\text{O}_2$ ) que el sensor puede medir. El sensor está expuesto al rango total de  $\text{O}_2$  en el escape, que puede ir desde  **$\sim 0.1\%$   $\text{O}_2$**  (condición muy rica) hasta  **$\sim 4\%$   $\text{O}_2$**  (condición muy pobre, como en una desaceleración).
- **Alcance:**  
Es la diferencia entre el valor máximo y mínimo del rango de medida. Basado en el rango operativo total:  $4.0\% - 0.1\% = 3.9\% \text{ O}_2$
- **Fondo de escala:**  
El valor máximo nominal de salida es  $\sim 0.9\text{ V}$ . En condiciones de saturación (mezcla extremadamente rica, sin  $\text{O}_2$ ), el sensor puede alcanzar hasta  $1.0\text{ V}$ .
- **Resolución:**
  - **Sensor:** Como dispositivo analógico (celda galvánica), su resolución teórica es infinita.
- **Fiabilidad:**  
La vida útil de diseño (MTBF - Mean Time Between Failures) para un sensor de este tipo está especificada para  $80.000$  a  $150.000\text{ km}$  de uso, asumiendo condiciones normales (sin combustible con plomo o silicona).

- Deriva:  
Es el principal modo de falla por envejecimiento. ). Un sensor "viejo" se vuelve lento, pudiendo aumentar su  $\tau$  de 80 ms a +500 ms, lo que degrada críticamente la estabilidad y la frecuencia de la oscilación de control.

## Variable a controlar

La variable controlada es la concentración de oxígeno (% O<sub>2</sub>) en los gases de escape. En este sistema la concentración de oxígeno en los gases de escape se produce con el funcionamiento regular del motor. El motor utiliza combustible y oxígeno para generar una combustión y generar movimiento. Luego el resultado de esta combustión deja gases remanentes entre los cuales se encuentra el oxígeno. Si el porcentaje de oxígeno dentro de estos gases es elevado, significa que sobró oxígeno después de la combustión. Esto ocurre porque se inyectó poco combustible para la cantidad de aire que entró. Esto se llama "mezcla pobre". Casi todo el combustible sí se quemó, pero el exceso de oxígeno y las altas temperaturas en el cilindro reaccionan entre sí, produciendo una gran cantidad de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), que son contaminantes muy nocivos. En cambio un nivel bajo (o casi nulo) de O<sub>2</sub> en el escape significa que faltó oxígeno para completar la combustión. Esto ocurre porque se inyectó demasiado combustible para la cantidad de aire disponible. Esto se llama "mezcla rica". Como faltaba oxígeno, el combustible no se pudo quemar por completo. Esto genera una enorme cantidad de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC, combustible que salió crudo) por el escape.

En este sistema el %O<sub>2</sub> es medido a través de un sensor de oxígeno que genera una señal eléctrica para que la ECU del motor identifique el estado de la mezcla. A partir de esta señal recibida, se determina si en el próximo giro del motor se debe abrir por más tiempo los inyectores, ingresando una mayor cantidad de combustible o si debe abrirlos una menor cantidad de tiempo. A través de este mecanismo el sistema busca alcanzar la denominada relación estequiométrica. En este punto, hay exactamente la cantidad de oxígeno necesaria para quemar exactamente la cantidad de combustible inyectado.

## Entrada

La entrada de nuestro sistema corresponde al voltaje que arroja el sensor de oxígeno correspondiente al %O<sub>2</sub> en los gases de escape. Es una entrada de tipo escalon que puede variar entre 0.1 V (mezcla pobre) y 0.9 V (mezcla rica). El valor de referencia que se utiliza es 0,45 V que representa el valor ideal.

## Proceso

El proceso es el ciclo termodinámico y químico de combustión que ocurre dentro de los cilindros del motor. Este proceso actúa como un mezclador y reactor químico que transforma energía. El proceso se caracteriza por:

- **Integración de Entradas:** La planta recibe dos flujos de masa fundamentales que deben combinarse:
  - El Aire (Perturbación de Carga): Determinado por la apertura del acelerador y las condiciones atmosféricas.
  - El Combustible (Variable Manipulada): Dosificado por el inyector a través de la señal de control  $u(t)$ .
- **Transformación Química:** El proceso realiza la reacción exotérmica entre estos dos elementos. La eficiencia de esta reacción depende de la Relación Aire-Combustible (AFR). Si la proporción es correcta (estequiométrica), se maximiza la energía y se minimizan los residuos nocivos.

## Perturbaciones externas e internas

Perturbación de Carga (Externa): variaciones en la presión atmosférica, temperatura, ya que afectan la densidad del aire que ingresa al cilindro.

Perturbación de Señal (Interna): "Interferencia electromagnética, estado de cables". Ruido eléctrico que se suma a la señal de control (salida del DAC/PWM) y corrompe el pulso de inyección.

Perturbación del Material (Externa): "Imperfecciones del combustible". Un combustible de mala calidad o con un poder calorífico diferente al esperado altera el resultado de la combustión.

## Ley de control

Implementamos un control de tipo Proporcional-Integral (PI). El componente Proporcional (P) permite que el sistema reaccione de forma inmediata y adecuada al error actual, mientras que el componente Integral (I) aporta la capacidad de eliminar por completo el error en estado estable, asegurando la máxima precisión. El componente Derivativo (D) se excluye deliberadamente por dos razones críticas. Primero, la acción 'D' es contraproducente para nuestro objetivo: su función es amortiguar oscilaciones, mientras que nuestro sistema requiere una oscilación controlada (rica-pobre) para el funcionamiento del catalizador. Segundo, la acción 'D' es inestable en este proceso. La señal de la sonda de oxígeno no es suave, sino que "salta" bruscamente. La derivada de este salto generaría "patadas" de control (picos) enormes y erráticas, desestabilizando el sistema en lugar de ayudarlo.

El controlador recibe una señal de error  $e(t)$  que corresponde con la resta entre el valor nominal (el setpoint estequiométrico de 0.45V) y el valor de la medición (voltaje real de la sonda de oxígeno).

A diferencia de un control por umbrales, nuestro controlador PI es continuo y su objetivo es forzar el error promedio a cero.

Acción de Control: La salida del controlador PI ajusta continuamente el tiempo de apertura de los inyectores. Si  $e(t) > 0$  (V sonda < 0.45V, mezcla pobre), el controlador incrementa el tiempo de inyección. Si  $e(t) < 0$  (V sonda > 0.45V, mezcla rica), el controlador reduce el tiempo de inyección.

La acción Integral (I) acumula cualquier error persistente, forzando al sistema a ajustar el combustible hasta que el promedio de la señal de la sonda sea exactamente 0.45V.

## Transferencias del sistema

$G_c(s)$  (Controlador): Es la función de transferencia de la ECU, que implementa una ley Proporcional-Integral (PI). Su forma es:  $G_c(s) = K_p + K_i/s$

$G_p(s)$  (Planta): Representa la dinámica del motor. Relaciona el ancho de pulso del inyector (ms) con el %O<sub>2</sub> resultante en el escape. Esta transferencia incluye inherentemente un retardo de transporte (tiempo muerto), que es el tiempo que tardan los gases en viajar desde el cilindro hasta la sonda.

$H(s)$  (Sensor): Representa la dinámica de respuesta de la Sonda Lambda. Se simplifica como una ganancia conversión %O<sub>2</sub> a V.

## Características de la respuesta:

### Estado Transitorio

El estado transitorio ahora es lo que sucede cada vez que hay un cambio o perturbación. Por ejemplo: pisas el acelerador (cambia el caudal de aire), el combustible tiene una imperfección.

Se busca una respuesta rápida a las perturbaciones pero amortiguada. Un sobreimpulso grande generaría picos de mezcla rica o pobre, afectando las emisiones y la vida del catalizador.

### Estado Estable

En la práctica, el sistema está diseñado para oscilar de forma controlada y permanente alrededor del setpoint. Esta oscilación (rica-pobre-rica-pobre) es necesaria para que el catalizador de tres vías funcione eficientemente.

## Características y tipo de error

El error es el desvío del voltaje de la sonda respecto al setpoint (0.45V).

Gracias a la **acción Integral (I)** del controlador PI, el sistema es de **Tipo 1**. Esto garantiza que el **error en estado estable (EE) ante una entrada escalón (el setpoint) será CERO**. La acción integral ajustará el pulso de inyección base hasta que el *promedio* de la oscilación de la sonda se centre exactamente en el setpoint.

El margen operativo admisible del sensor está entre un voltaje mínimo (cercano a 0.1V) y un voltaje máximo (cercano a 0.9V), correspondientes a los límites físicos de generación de voltaje del sensor para las condiciones de mezcla completamente pobre y completamente rica.

Por lo tanto, cualquier valor que caiga sostenidamente fuera de este rango físico lo consideramos como una falla eléctrica del sensor o de su circuito.

## Estabilidad

La estabilidad del sistema de lazo cerrado se determina por los polos de la ecuación característica:  $1 + G_c(s)G_p(s)H(s) = 0$ . El sistema es matemáticamente estable (no diverge al infinito). El controlador PI (específicamente la 'I') fuerza al sistema a oscilar de forma sostenida (rica-pobre-rica) alrededor del setpoint de 0.45V en el rango de 0.1 a 1,0 V.

## Relación entre señales analógicas y discretas / digitales

El sistema es **híbrido**.

Inicialmente como analógico tenemos el proceso (motor), la variable (%O<sub>2</sub>) y la medición del sensor (Voltaje). Luego esta señal se resta en el punto suma con el valor de referencia y se convierte a digital a través del ADC, para ser procesada en los controladores. El **DAC/PWM** convierte la decisión digital en un pulso analógico para el inyector. Que determina la cantidad de combustible que ingresa al motor.

## Carga asociadas al sistema :

La carga asociada al sistema es el **medio ambiente**. Una mezcla con exceso de combustible arroja estos restos al medio ambiente, contaminando fuera de las normativas establecidas.

La normativa (VTV / Ley 24.449) exige que el valor de Lambda calculado a la salida del escape se mantenga dentro de una ventana específica. A continuación, se detalla la

correspondencia entre el valor normativo (lambda), la variable física real (O2) y la señal eléctrica de realimentación del sistema (Voltaje):

- **Límite VTV:** El vehículo aprueba si lambda se encuentra entre **0.97 y 1.03**.
- **Equivalencias de Control:**
  - **Punto Estequiométrico (Ideal):**
    - **Normativa:** lambda = 1.00
    - **Física (Proceso):**  $\approx 0.5\%$  de O2 residual.
    - **Señal de Control (Setpoint):** 450mV.
  - **Límite de Mezcla Rica (lambda = 0.97):**
    - **Estado:** Exceso de combustible, falta de aire.
    - **Física (Proceso):** El oxígeno cae drásticamente a **< 0.2% O2**.
    - **Señal de Control (Realimentación):** El sensor genera un voltaje alto, aprox. **800mV** ).
  - **Límite de Mezcla Pobre (lambda = 1.03):**
    - **Estado:** Exceso de aire, falta de combustible.
    - **Física (Proceso):** El oxígeno sube a aprox. **1.0% - 1.5% O2**.
    - **Señal de Control (Realimentación):** El voltaje cae a aprox. **100mV**.

## Simulación

A partir del sistema descrito se puede ejecutar una simulación en tiempo real, que permite ver cómo al ingresar una perturbación (Un mayor o menor caudal de aire) el sistema la detecta y empieza a corregir, aumentando el ancho del pulso de inyección o reduciéndolo.



# Conclusión:

El presente trabajo ha permitido analizar y fundamentar un sistema de inyección electrónica de combustible, demostrando cómo la aplicación directa de los conceptos de la Teoría de Control ha sido fundamental para resolver uno de los problemas más críticos de la ingeniería automotriz: la alta contaminación e ineficiencia de los sistemas a carburador.

Este tipo de sistema de inyección vino a mejorar el impacto ambiental de los motores antiguos, donde la inyección de combustible se hacía a través de un carburador, ajustado manualmente por una persona y sin una corrección en tiempo real, causando grandes niveles de contaminación en el aire y generando un gran desperdicio e ineficiencia de combustible.

Se ha establecido que un carburador, al ser un sistema de lazo abierto, carece de la capacidad de adaptarse en tiempo real a las condiciones operativas o perturbaciones del entorno. Su ajuste manual y estático inevitablemente resulta en una combustión incompleta, generando un desperdicio de combustible y la emisión masiva de gases contaminantes como CO, HC y NOx.

En contraposición, la solución analizada implementa un sistema de control robusto en lazo cerrado. El pilar de este diseño es la realimentación provista por la Sonda Lambda, que mide la variable controlada (%O<sub>2</sub>) y permite a la ECU corregir la mezcla en cada ciclo.

El análisis de la ley de control PI demostró ser la estrategia óptima para este proceso:

La acción Proporcional (P) brinda la respuesta inmediata necesaria para reaccionar a perturbaciones, como los cambios en la admisión de aire.

La acción Integral (I), como se detalló, convierte al sistema en Tipo 1, garantizando que el error en estado estable sea nulo. Esta acción es crucial, ya que fuerza al sistema a ajustar el pulso de inyección hasta que el promedio de la señal oscile exactamente sobre el setpoint estequiométrico (0.45V).

Asimismo, se justificó la exclusión deliberada de la acción Derivativa (D), cuya aplicación sería contraproducente. La naturaleza ruidosa y el comportamiento de "interruptor" de la sonda provocarían que la acción 'D' amplifique el ruido, generando picos de control erráticos que desestabilizarían el sistema.

Finalmente, se ha caracterizado el estado estable del sistema no como un punto fijo, sino como una oscilación controlada (rica-pobre). Lejos de ser un defecto, esta oscilación es un requisito de diseño indispensable, ya que es precisamente este vaivén el que permite el funcionamiento óptimo del catalizador de tres vías, un componente crítico que no puede operar eficientemente con la mezcla errática de un carburador.

En conclusión, este trabajo demuestra que el control de inyección electrónica no es una simple mejora, sino una tecnología habilitante. La aplicación de la teoría de control



(realimentación, control PI, análisis de estabilidad y error) ha sido la herramienta de ingeniería que permitió a la industria automotriz cumplir con las normativas ambientales globales, reduciendo drásticamente las emisiones vehiculares. Sin este sistema, el impacto ambiental de los millones de vehículos en circulación sería hoy insostenible.

## Bibliografía y Referencias

1. **Bolton, W.** (2001). *Ingeniería de Control* (2ª edición). México: Alfaomega Grupo Editor. (Marco teórico de sistemas de control, lazos cerrados y controladores PID).
2. **Robert Bosch GmbH.** (2016). *Bosch Automotive Electrics and Automotive Electronics* (5th Edition). Springer Vieweg. (Especificaciones técnicas de sensores de oxígeno tipo Zirconio y sistemas Motronic).
3. **Poder Ejecutivo Nacional (Argentina).** *Decreto 779/1995 - Reglamentación de la Ley de Tránsito N° 24.449*. Anexo N: "Límites de emisiones contaminantes para vehículos automotores". (Normativa legal para los límites de lambda, CO y HC utilizados como parámetros de carga y validación).
4. **Bosch Auto Parts.** *Oxygen Sensors Technical Data Sheet (LSH-25)*. Recuperado de catálogo técnico oficial. (Curvas de respuesta y tiempos de conmutación del sensor).