

FECHA	3 de Septiembre de 2009
-------	-------------------------

NÚMERO RA	El número con que entra el resumen analítico de un documento a la Red. Entonces el analista no es quien otorga este número.
PROGRAMA	Ingeniería Electrónica

AUTOR (ES)	ALBARRACÍN VILELGAS, Maryi ALBARACÍN VILLEGAS, Marlon
TÍTULO	DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE INYECTORES PARA GENERAR COMBUSTIÓN EN UN MOTOR A GASOLINA

PALABRAS CLAVES	Control electrónico. Control continuo. Control discreto. Lógica difusa. Inyección electrónica. Inyección multipunto. Matlab. Simulink. Motor de Gasolina. Inyector. Piston. Transformada de laplace. Transformada z. Mezcla estequiométrica.
-----------------	---

DESCRIPCIÓN	El objetivo de este proyecto es el diseño de un sistema de control de inyectores para generar combustión en un motor a gasolina, utilizando Matlab para el correspondiente análisis matemático y sus respectivas simulaciones del diseño de los controladores, con la finalidad de mejorar la eficiencia de la combustión dentro de las cámaras de un motor a gasolina.
-------------	---

FUENTES BIBLIOGRÁFICAS	<p>CREVS, Antonio. Simulación y control de procesos por ordenador. Colonia del Valle, México D.F. Ed. Alfaomega, Segunda Edición. 2007.</p> <p>GÓMEZ, Miguel y GÓMEZ, Miller. Modelamiento geométrico de un motor de combustión interna, simulación del ciclo dinámico y representación gráfica de la transferencia de calor del sistema biela, pistón, cigüeñal. Proyecto de Grado Universidad de La Salle. Facultad de ingeniería de diseño y automatización.</p> <p>GONZALES, Jose Mari. Regulación Automática I. Titulación Ingeniero técnico Industrial. Curso 2°. Especialidad Electronica. 2001.</p> <p>NISE, Norman. Sistemas de control para Ingeniería. Ed. Patria cultural, tercera edición. 2002</p> <p>OROZCO, Felipe. Inyección Electrónica en Motor a gasolina. Editor México Digital</p>
------------------------	--

Comunicacion, 2006 ISBN 9707790687.

WATSON, Ben. Manual de full injection Bosch; Traducción: Enrique Servin Mejia; Revisión Técnica: Miguel Cachón Paz. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1992.

Cilindros Hidráulicos y Neumáticos. Actuadores. Fundamentos de control automático. [En línea]. Formato HTML, Disponible en Internet:

http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica_hidraulica22.htm

Electrónica automotriz, Sistemas controlados electrónicamente. INTRODUCCIÓN, [En línea], Madrid, España, Formato html, Disponible en Internet:

<http://www.autocity.com/manuales-reparacion/index.html?nivelAcceso=3&codigo=220&cat>

Imagen disponible en internet: <http://www.diesel-electric.co.za/Graphics/L-Jetronic%20Fuel%20Injection.gif>

La inyección cumple 40 años [en línea]. Formato html. Disponible en internet:

<http://www.motorspain.com/17-10-2007/varios/mecanica/la-inyeccion-electronica-cumple-40-anos>

Los 10 carros más vendidos en Colombia. Autos cosmos. [En línea]. Formato HTML.

Disponible en Internet: <http://www.co.autocosmos.com/noticias/18988/los-10-carros-mas-vendidos-en-colombia.aspx>

Mac Fuel Inyección. Sistema K- JETRONIC. [En línea], Argentina. Formato html,

Disponible en internet: <http://www.macfuel.com.ar/imagenes/kjetronic.jpg>

National Instruments. Products And Services. NI Labview. [En Línea]. Estados Unidos.

Formato html. Disponible en Internet: <http://www.ni.com/labview/esa/>

NGK. La sonda Lambda. España. [En Línea]. Disponible en Internet:

http://www.ngk.es/Sondas_Lambda.1063.0.html

Prueba Chevrolet Spark. Auto Noticias. [En línea]. Formato HTML Disponible en Internet:

<http://autonoticiasuy.blogspot.com/2009/03/prueba-chevrolet-spark.html>

Robert Bosch Ltda. Sistemas de inyección electrónica. Catalogo [en línea]. Formato pdf.

Disponible en www.todomecanica.com.

Solid Edge- Powerful 3D CAD: Siemens Software. [En Línea]. Disponible en Internet:

http://www.plm.automation.siemens.com/es_sa/products/velocity/solidedge/solidedge.shtml

Test engine Argentina. Diferentes tipos de inyectores. [En línea]. Formato html.

Disponible en Internet: <http://testengineargentina.blogspot.com/2007/04/inyectores-diferentes-tipos.html>

The Mathworks. Acelerating the pace of engineering and science. [En Línea]. Formato

html. Disponible en Internet:

<http://www.mathworks.es/products/matlab/description1.html>

TodoMotores. Combustión Bencina. Mezclas para motor [En Línea]. Chile, Formato

html, Disponible en Internet:

http://www.todomotores.cl/competicion/mezcla_combustible.htm

NÚMERO RA	
PROGRAMA	Ingeniería Electrónica

CONTENIDOS	
CONTENIDO	
INTRODUCCIÓN	¡Error! Marcador no definido
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	¡Error! Marcador no definido
1.1 ANTECEDENTES	¡Error! Marcador no definido
1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	¡Error! Marcador no definido
1.3 JUSTIFICACIÓN	¡Error! Marcador no definido
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	¡Error! Marcador no definido
1.4.1 Objetivo general	¡Error! Marcador no definido
1.4.2 Objetivos específicos	¡Error! Marcador no definido
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO	¡Error! Marcador no definido
2 MARCO DE REFERENCIA	¡Error! Marcador no definido
2.1 MARCO TEORICO-CONCEPTUAL	¡Error! Marcador no definido
2.1.1 Motor	¡Error! Marcador no definido
2.1.2 ¿Qué es la inyección electrónica?	¡Error! Marcador no definido
2.1.3 Clasificación de los sistemas de inyección	¡Error! Marcador no definido
2.1.4 Ventajas de la inyección electrónica de combustible	¡Error! Marcador no definido
2.1.5 Visión general de la inyección electrónica de combustible.	¡Error! Marcador no definido
2.1.6 Introducción sistemas de control	¡Error! Marcador no definido
2.1.7 Definición de un sistema de control	¡Error! Marcador no definido
2.1.8 Características de un sistema de control	¡Error! Marcador no definido
2.1.9 Elementos básicos de un sistema de control	¡Error! Marcador no definido
2.1.10 Clasificación de los sistemas de control	¡Error! Marcador no definido
2.1.11 Proceso de diseño	¡Error! Marcador no definido
3 METODOLOGÍA	¡Error! Marcador no definido

3.1	ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	¡Error! Marcador no definido
3.2	LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE USB / SUB-LÍNEA DE LA FACULTAD / CAMPO TEMÁTICO DEL PROGRAMA	¡Error! Marcador no definido
3.3	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	¡Error! Marcador no definido
3.4	POBLACIÓN Y MUESTRA	¡Error! Marcador no definido
3.5	HIPÓTESIS	¡Error! Marcador no definido
3.6	VARIABLES	¡Error! Marcador no definido
3.6.1	Variables independientes	¡Error! Marcador no definido
3.6.2	Variables dependientes	¡Error! Marcador no definido
4	DESARROLLO INGENIERIL	¡Error! Marcador no definido
4.1	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	¡Error! Marcador no definido
4.2	ANÁLISIS EN EL MOTOR	¡Error! Marcador no definido
4.2.1	Datos del motor de combustión interna	¡Error! Marcador no definido
4.2.2	Disposición de los cilindros	¡Error! Marcador no definido
4.3	PLANTA O PROCESO	¡Error! Marcador no definido
4.4	SENSOR	¡Error! Marcador no definido
4.5	ACTUADOR (INYECTOR)	¡Error! Marcador no definido
4.5.1	Tipo de inyección	¡Error! Marcador no definido
4.5.2	Inyectores	¡Error! Marcador no definido
4.5.3	Simulación del inyector	¡Error! Marcador no definido
4.6	DISEÑO DEL CONTROLADOR	¡Error! Marcador no definido
4.6.1	Controlador PID	¡Error! Marcador no definido
4.6.2	Control Discreto	¡Error! Marcador no definido
4.6.3	Control Fuzzy	¡Error! Marcador no definido
4.7	SELECCIÓN DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN	¡Error! Marcador no definido
4.7.1	MATLAB	¡Error! Marcador no definido
4.7.2	LabVIEW	¡Error! Marcador no definido
4.7.3	Solid Edge	¡Error! Marcador no definido
4.7.4	Software seleccionado	¡Error! Marcador no definido
4.8	DISEÑO GENERAL	¡Error! Marcador no definido

NÚMERO RA	
PROGRAMA	Ingeniería Electrónica

METODOLOGÍA
<p>1. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN</p> <p>Una vez analizado a fondo el proyecto, se observa que el enfoque más apropiado es empírico-analítico, ya que a través del trabajo investigativo en equipo se pretende dejar bases para la continuación de temas dentro del área tratada, así como el aporte de nuevas ideas a los sectores que les concierne el tema del proyecto.</p> <p>2. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE USB / SUB-LÍNEA DE LA FACULTAD / CAMPO TEMÁTICO DEL PROGRAMA</p> <p>Dentro de los documentos relacionados en la universidad de San Buenaventura sobre investigación se ve que se plantean unos campos, sub-líneas y líneas que clasifican los proyectos.</p> <p>Para el caso del proyecto propio a desarrollar se encuentra enmarcado en el campo de <i>control</i> dentro de la sub-línea de <i>instrumentación y control</i> y la línea de <i>tecnologías y sociedad</i>.</p> <p>La sociedad se encuentra inmersa en unas características que hacen que sea muy importante el campo de control, toda la tecnología que es susceptible a ser desarrollada en nuestro país requiere control, como el campo del sector automotriz.</p> <p>La instrumentación y control de procesos está presente en el quehacer cotidiano de los diferentes programas de la facultad de ingeniería como parte integral de su ejercicio de investigación, como lo pone de manifiesto la naturaleza de los proyectos que los núcleos temáticos de los programas definen.</p> <p>La sociedad requiere de conocimientos técnicos y científicos de vanguardia que ayuden a la solución de problemas o faciliten los procesos de mejoramiento de la calidad de vida de las personas que pertenecen a un grupo social determinado. Por ello, se hace necesaria la actualización constante de los conocimientos tecnológicos en el área automotriz con el fin de poder efectuar las aplicaciones y adaptaciones requeridas en la solución de los problemas y en la satisfacción de las necesidades de la sociedad.</p> <p>3. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN</p> <p>Ya que el proyecto se presentara a través de un entorno simulado, fue necesario para la recopilación y análisis de datos el uso de programas simuladores como MATLAB.</p> <p>Por parte del sector automotriz, se consiguió la información a través de personas expertas en el tema de inyección electrónica sobre el funcionamiento del sistema, características, partes principales, etc.</p> <p>A fin de obtener información técnica fue necesario recurrir a revistas provenientes del mercado, universidades, institutos y organizaciones, que disponen de referencias para</p>

el correcto desarrollo del trabajo. También es importante resaltar que fue de gran utilidad la información suministrada por los fabricantes de productos automotrices como hojas técnicas y manuales.

Además de lo anterior, fue necesario realizar cursos relacionados con el tema, con el fin de lograr una orientación clara que permitiera una correcta evolución de la idea planteada.

4. POBLACIÓN Y MUESTRA

Las características más importantes que se requirieron a la hora de escoger y/o utilizar los medios de recolección de datos, fue proporcionada de forma clara y precisa de los temas que se desarrollan en el transcurso del proyecto, así como, las personas que trabajan dentro de las empresas, concesionarios, centros de investigación, y todos aquellos que tengan relación con los temas que se tratan en el marco del proyecto.

En cuanto al software de simulación es necesario que tengan versatilidad en analizar el comportamiento del diseño planteado para el proyecto, así como útil para la programación de algunos dispositivos que se vayan a implementar en el proceso.

5. HIPÓTESIS

¿Cuál es el control más adecuado para generar combustión en un motor a gasolina?

El control más adecuado para el problema planteado es por medio de un PID, el cuál se realizará a través de un software de simulación como MATLAB, proporcionando una manipulación de los inyectores dentro del motor según unos parámetros definidos, tal como la mezcla de aire-combustible y el residuo producto de la combustión.

6. VARIABLES

6.1 Variables independientes

Cantidad de combustible
Cantidad de aire

6.2 Variables dependientes

La concentración de vapor de agua (H_2O) y dióxido de carbono (CO_2) en los gases de salida depende de la calidad de la combustión.

CONCLUSIONES

Para obtener el modelo de la función de transferencia de la planta, fue necesario recurrir a modelos matemáticos que involucraban única y exclusivamente sistemas mecánicos, ya que las variables que afectan el desempeño de la planta son de tipo mecánico, así como la composición del pistón y de la camisa donde este se desliza. Los modelos más adecuados fueron los de masa y amortiguamiento.

A la hora de calcular la función de transferencia de la planta, fue necesario obtener por medio de cálculos matemáticos y tablas, valores que no estaban previstos en el diseño, tales como radio y masa del pistón.

La selección de las características del motor, se basó en el panorama general de Colombia, siendo un motor de 1000cc con 60HP y una distribución de cilindros en línea las características que más se ajustaban al diseño, ya que estas son las más óptimas para los carros de bajo cilindraje y potencia delimitados en el marco del proyecto.

Tanto el sensor como el actuador, ofrecieron datos necesarios para poder calcular el tiempo de inyección, tales como las graficas que relacionan la mezcla estequiométrica con los gases producto de la combustión y los tipos de inyección existentes. Para el caso de la clasificación del inyector se escogió el sistema de inyección indirecta-simultanea-electrónico, siendo éste altamente utilizado en la fabricación de los vehículos modernos.

La simulación del inyector, implicó conocer el funcionamiento del mismo, así como su accionamiento por medio de voltaje. El resultado de lo anterior mostró que un PWM controlado por voltaje era lo que más se ajustaba a sus características.

El término básico en el controlador PID es el proporcional **P**, que origina una actuación de control correctiva proporcional el error. El término integral **I** brinda una corrección proporcional a la integral del error. Esta acción tiene la ventaja de asegurar que en última instancia se aplicará suficiente acción de control para reducir el error de regulación a cero. Sin embargo, la acción integral también tiene un efecto desestabilizador debido al corrimiento de fase agregado. El término derivativo **D** da propiedades predictivas a la actuación.

Basados en los criterios de estabilidad, el que cumplió con todos los requisitos fue el controlador PID, desde el punto de vista de la respuesta en tiempo y en la frecuencia. Respecto al controlador discreto, el análisis por medio de root-locus arrojó el resultado de que el sistema es críticamente inestable al tener una raíz cercana al borde del círculo de radio unitario. Además, al utilizar el método de sintonía, se debe tomar en cuenta el ambiente en el que se desenvolverá la aplicación, para así poder estimar el valor de las constantes que se acomoden a la respuesta de la planta.

Dado que las licencias de software especializados en electrónica automotriz son muy costosas, se buscaron programas que fueran utilizados dentro de la universidad y cumplieran con los parámetros necesarios para el diseño del sistema de control, tales como MATLAB. Este programa frente a los demás, ofrece programación dentro de dos entornos: con código y gráfico, además de, realizar operaciones con matrices necesarias para el cálculo de funciones de transferencia en espacio de estados.

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE INYECTORES PARA GENERAR
COMBUSTIÓN EN UN MOTOR A GASOLINA**

**MARYI GIBELY ALBARRACIN VILLEGAS
MARLON ALBARRACIN VILLEGAS**

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PROYECTO DE GRADO
BOGOTÁ D.C
2009**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE INYECTORES PARA GENERAR
COMBUSTIÓN EN UN MOTOR A GASOLINA**

**MARYI GIBELY ALBARRACIN VILLEGAS
MARLON ALBARRACIN VILLEGAS**

**Proyecto de grado como requisito
Para optar al título de Ingeniería Electrónica**

**Asesor
Jairo Romero
Ing. Electrónico**

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PROYECTO DE GRADO
BOGOTÁ D.C
2009**

CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN	11
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.1 ANTECEDENTES	12
1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	20
1.3 JUSTIFICACIÓN	20
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	20
1.4.1 Objetivo general	20
1.4.2 Objetivos específicos	21
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO	21
2 MARCO DE REFERENCIA	22
2.1 MARCO TEORICO-CONCEPTUAL	22
2.1.1 Motor	23
2.1.2 ¿Qué es la inyección electrónica?	24
2.1.3 Clasificación de los sistemas de inyección	26
2.1.4 Ventajas de la inyección electrónica de combustible	30
2.1.5 Visión general de la inyección electrónica de combustible.	31
2.1.6 Introducción sistemas de control	46
2.1.7 Definición de un sistema de control	49
2.1.8 Características de un sistema de control	50
2.1.9 Elementos básicos de un sistema de control	52
2.1.10 Clasificación de los sistemas de control	53
2.1.11 Proceso de diseño	60

3	METODOLOGÍA	63
3.1	ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	63
3.2	LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE USB / SUB-LÍNEA DE LA FACULTAD / CAMPO TEMÁTICO DEL PROGRAMA	63
3.3	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	64
3.4	POBLACIÓN Y MUESTRA	64
3.5	HIPÓTESIS	64
3.6	VARIABLES	65
3.6.1	Variables independientes	65
3.6.2	Variables dependientes	65
4	DESARROLLO INGENIERIL	66
4.1	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	66
4.2	ANÁLISIS EN EL MOTOR	67
4.2.1	Datos del motor de combustión interna	67
4.2.2	Disposición de los cilindros	69
4.3	PLANTA O PROCESO	71
4.4	SENSOR	77
4.5	ACTUADOR (INYECTOR)	79
4.5.1	Tipo de inyección	80
4.5.2	Inyectores	81
4.5.3	Simulación del inyector	82
4.6	DISEÑO DEL CONTROLADOR	84
4.6.1	Controlador PID	84
4.6.2	Control Discreto	89
4.6.3	Control Fuzzy	96
4.7	SELECCIÓN DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN	101
4.7.1	MATLAB	101

4.7.2	LabVIEW	104
4.7.3	Solid Edge	105
4.7.4	Software seleccionado	106
4.8	DISEÑO GENERAL	106
CONCLUSIONES		108
BIBLIOGRAFIA		110
WEBGRAFIA		111
GLOSARIO		113

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. 1. Sistema D-Jetronic.	14
Figura 1. 2. Sistema L-Jetronic.	15
Figura 1. 3. Sistema LH-Jetronic.	16
Figura 1. 4. Sistema K-Jetronic.	17
Figura 1. 5. Sistema KE-Jetronic.	18
Figura 1. 6. Sistema Motronic.	19
Figura 2. 1. Ubicación de los sistemas electrónicos en un automóvil.	22
Figura 2. 2. Sistema de inyección de Fuschaldo (1940).	26
Figura 2. 3. Inyección tipo monopunto.	27
Figura 2. 4. Inyección tipo multipunto.	27
Figura 2. 5. Generación de combustible para diferentes tipos de inyección por sincronismo.	29
Figura 2. 6. Esquema general de inyección electrónica.	31
Figura 2. 7. Sistema de la bomba eléctrica de combustible.	33
Figura 2. 8. Filtro de combustible.	33
Figura 2. 9. Riel de inyectores.	34
Figura 2. 10. Composición de un regulador de presión.	35
Figura 2. 11. Composición de un inyector.	35
Figura 2. 12. Caja de contacto de la mariposa.	36
Figura 2. 13. Ubicación del TPS.	37
Figura 2. 14. Esquema del sensor VAF.	38

Figura 2. 15. Termistor NPC.	39
Figura 2. 16. Sonda Lambda.	40
Figura 2. 17. Señal de encendido.	41
Figura 2. 18. Señal inductiva.	41
Figura 2. 19. Señal Hall.	42
Figura 2. 20. Sensor inductivo para la determinación de las rpm.	42
Figura 2. 21. Diagrama a bloques de la gestión de la ECU en lazo abierto.	43
Figura 2. 22. Arquitectura de la gestión electrónica de un sistema de inyección, modelo Motronic.	45
Figura 2. 23. Descripción simplificada de un sistema de control.	49
Figura 2. 24. Entrada y salida de un sistema, relación.	50
Figura 2. 25. Sistema en lazo abierto	51
Figura 2. 26. Sistema en lazo cerrado.	51
Figura 2. 27. Control en cascada.	57
Figura 2. 28. Control de relación.	57
Figura 2. 29. Control de gama partida.	58
Figura 2. 30. Control Anticipativo.	58
Figura 2. 31. Diagrama a bloques del control adaptativo.	59
Figura 2. 32. Esquema control distribuido.	59
Figura 2. 33. Proceso de diseño de un sistema de control.	60
Figura 4. 1. Diagrama a bloques general del sistema.	66
Figura 4. 2. Motor de combustión interna para Chevrolet Spark.	68
Figura 4. 3. Imagen del pistón dentro de la camisa.	68

Figura 4. 4. Diagrama de fuerzas de un pistón.	71
Figura 4. 5. Planta o sistema a modelar.	72
Figura 4. 6. Circuito equivalente mecánico.	73
Figura 4. 7. Diagrama del modelo continuo en Simulink (MATLAB).	74
Figura 4. 8. Respuesta a la función paso.	75
Figura 4. 9. Diagrama del modelo discreto en Simulink (MATLAB).	77
Figura 4. 10. Respuesta a la función paso en modo discreto.	77
Figura 4. 11. Posición del sensor y la señal DC que arroja.	78
Figura 4. 12. Comportamiento del voltaje según la concentración.	79
Figura 4. 13. Tiempo de inyección pistón.	83
Figura 4. 14. Generador de PWM.	83
Figura 4. 15. PWM, función rampa y voltaje DC.	84
Figura 4. 16. Diagrama a bloques de un PID.	85
Figura 4. 17. Respuesta recomendada según el método Ziegler-Nichols.	86
Figura 4. 18. Controlador PID diseñado.	87
Figura 4. 19. Respuesta a la función paso controlador PID.	87
Figura 4. 20. Lugar geométrico de las raíces.	88
Figura 4. 21. Diagramas de Bode.	88
Figura 4. 22. Diagrama del controlador en el sistema.	90
Figura 4. 23. Respuesta a la función paso.	90
Figura 4. 24. Lugar geométrico de las raíces.	90
Figura 4. 25. Diagramas de bode.	91
Figura 4. 26. Diagrama a bloques para el diseño del controlador.	92

Figura 4. 27. Función de pertenencia variable de entrada.	97
Figura 4. 28. Función de pertenencia variable salida.	98
Figura 4. 29. Variable de entrada VS variable de Salida	98
Figura 4. 30. Controlador Fuzzy	99
Figura 4. 31. Respuesta a la función paso controlador fuzzy.	100
Figura 4. 32. Respuesta a la función rampa controlador fuzzy.	100
Figura 4. 33. Entorno de trabajo.	102
Figura 4. 34. Entorno de trabajo.	104
Figura 4. 36. Diseño del control de inyectores para generar combustión en un motor a gasolina en Simulink.	107

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. 1. Componentes del sistema D-Jetronic	13
Tabla 1. 2. Componentes del sistema L-Jetronic	14
Tabla 1. 3. Componentes del sistema LH-Jetronic.	15
Tabla 1. 4. Componentes del sistemas K-Jetronic.	17
Tabla 1. 5. Componentes del sistema KE-Jetronic.	18
Tabla 1. 6. Componentes del sistema Motronic.	19
Tabla 2. 1. Parámetros y variables.	52
Tabla 2. 2. Ondas de prueba empleadas en los sistemas de control.	62
Tabla 4. 1 Carros más comprados y usados en Colombia.	67
Tabla 4. 2. Comparación diferentes tipos de distribución de pistones en los motores.	69
Tabla 4. 3. Valor constantes sistema.	75
Tabla 4. 4. Concentración VS Voltaje.	79
Tabla 4. 5. Comparación tipos de inyección.	80
Tabla 4. 6. Comparación entre los tipos de inyectores.	82
Tabla 4. 7. Valores para calcular las constantes restantes.	86
Tabla 4. 8. Características de los Toolboxes relacionados con control	103

INTRODUCCIÓN

Las tecnologías a través del tiempo nos han ayudado a facilitar la realización de las actividades tanto industriales como cotidianas. En el campo de la ingeniería de control se observa que ha venido presentándose migración hacia sistemas completamente electrónicos en procesos como la generación de combustión en un motor a gasolina.

El presente proyecto consiste en diseñar el control de inyectores en un motor a gasolina basado en el estudio de dos variables (cantidades de aire y combustible), que hacen posible la generación de combustión en el motor a gasolina. Estas variables están relacionadas por medio de una concentración ideal (por cada gramo de gasolina hay 14.8 gramos de aire).

Por medio de este proyecto se pretende dejar las bases para que en la universidad, dentro de los grupos y semilleros de investigación, se continúe con trabajos relacionados en las áreas de la electrónica automotriz y la ingeniería de control.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 ANTECEDENTES

El sistema de inyección mecánica que utiliza una bomba de alta presión que envía el combustible a los inyectores situados en la culata de un motor de combustión interna, fue utilizado experimentalmente hace más de 100 años en el avión de los hermanos Wright, debido a su eficiencia y precisión, frente a los tradicionales carburadores demasiado primitivos y poco eficientes. Los progresos en el sistema de inyección han estado ligados en especial a los avances del motor diesel. En este proceso de investigación y desarrollo, se han destacado por sus aportes el ingeniero alemán Rudolf Diesel, inventor del motor a combustión de alto nivel que lleva su nombre, y el industrial alemán Robert Bosch, fundador de la empresa Robert Bosch GmbH.

Por otra parte, los sistemas eléctricos han sido parte del automóvil desde que este se introdujo a mediados del siglo XIX. La electricidad se utilizó primero para producir una chispa de alto voltaje para encender la carga aire-combustible en la cámara de combustión. Con el paso del tiempo se utilizó la electricidad en los sistemas de iluminación, sistemas de arranque, en radios, en limpiaparabrisas y en una amplia variedad de accesorios de potencia como el equipo de sonido.

Después de la segunda guerra mundial, y especialmente para el uso en automóviles deportivos se comenzó a utilizar el sistema de inyección de combustible electromecánico. El nuevo sistema ofrecía como principal ventaja mayor potencia frente a la que se lograba con el uso de carburadores. Esta diferencia se situaba aproximadamente un 15% por encima del tradicional carburador en funcionamiento normal.

A finales de la década de los sesentas, la electrónica empezó a ser utilizada en los automóviles. A medida que los sistemas eléctricos y electrónicos se vuelven más complejos, de igual manera lo hacen las fuentes de energía para estos componentes. A principios del siglo XX, cuando el uso de la electricidad estaba limitado sólo al encendido, el magneto era la única fuente de energía eléctrica.

Cuando se agregaron las luces al vehículo, una fuente diferente al magneto de alto voltaje fue necesaria para energizarlas; así se agregó la batería de almacenamiento. Consecuentemente, los talleres de acumuladores fueron surgiendo, puesto que la batería necesitaba cargarse con frecuencia para energizar las luces y eventualmente al arrancador, se creó entonces el generador.

De esta manera, la industria al servicio del automóvil se enfrentó con el uso de nuevas tecnologías. El generador hizo un trabajo adecuado al mantener cargada

la batería, pero no pudo proporcionar potencia necesaria a los accesorios durante las velocidades del motor bajas. Consecuentemente, el alternador reemplazó al generador.

Aun así, con toda esta sofisticación mejorada, todavía existen sólo dos fuentes primarias de voltaje en los automóviles actuales; la química y la electromagnética.

El primer sistema de inyección de combustible era muy rudimentario comparado con los actuales; constaba en su gran mayoría de componentes electromecánicos de los cuales el único que era novedoso era la ECU (Unidad Electrónica de Control), aunque haciendo de nuevo otra comparación, la electrónica de la ECU del primer sistema con la computadora de un sistema de inyección electrónico moderno, es como comparar un avión P-51 de la segunda guerra mundial contra un avión F-22 Raptor. Ambos son sofisticados pero el avión F-22 Raptor hace muchas más cosas que el avión P-51.¹

El sistema de inyección D-Jetronic fue el primer sistema electrónico en alcanzar una verdadera producción masiva. En su aparición la industria lo vio como un sistema único en su género, más bien como una estrategia de mercado técnica de la industria de las reparaciones que una alternativa real del carburador. La figura 1.1 ilustra la configuración física del sistema D-Jetronic y la tabla 1.1 los elementos que lo componen.²

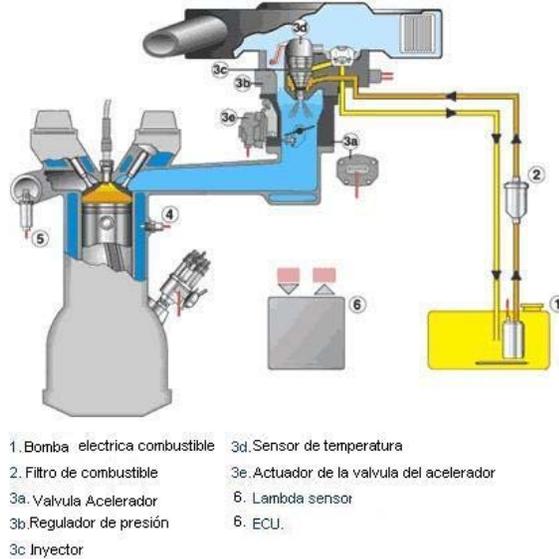
Tabla 1. 1. Componentes del sistema D-Jetronic

SISTEMA DE SENSORES	SISTEMA DE COMBUSTIBLE	SISTEMA DE AIRE
Platinos de disparo	Filtro del tanque	Manguera de vacío del sensor de presión
Sensor Temperatura 1	Bomba de combustible	Válvula de aire auxiliar
Sensor Temperatura 2	Filtro de combustible	Derivación de aire en mínimo
Interruptor del acelerador	Regulador de presión de combustible	
Sensor de presión	Inyectores	
ECU	Riel de combustible	
	Inyector de arranque en frío	

¹ WATSON, Ben. Manual de full injection Bosch; Traducción: Enrique Servin Mejia; Revisión Técnica: Miguel Cachón Paz. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1992. p. 1.

² Ibid., p. 41.

Figura 1. 1. Sistema D-Jetronic.



Fuente: La inyección electrónica cumple 40 años.³

El sistema L-Jetronic de Bosch fue introducido en 1974 en Estados Unidos. Destaca en él un sistema de medición de aire que resulta bastante menos sensible al desgaste del motor que el sensor de presión del múltiple utilizado por el sistema D-Jetronic. Otras diferencias sutiles junto con el desarrollo actual, han hecho del sistema L, la base para la mayor parte de los sistemas de inyección de combustible fabricados fuera de Estados Unidos. Gracias al medidor de flujo de aire se provee una información para el control del combustible a través de los inyectores. Un prototipo de este sistema se muestra en la figura 1.2 y sus componentes en la tabla 1.2.⁴

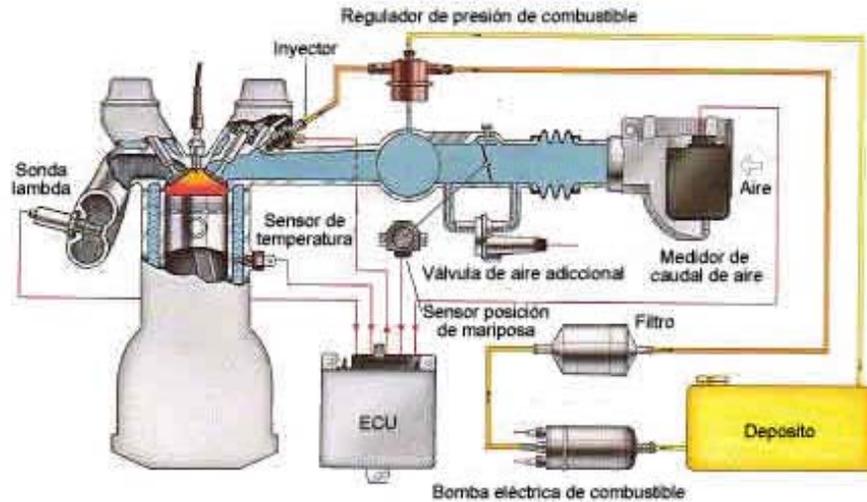
Tabla 1. 2. Componentes del sistema L-Jetronic

SISTEMA DE SENSORES	SISTEMA DE COMBUSTIBLE	SISTEMA DE AIRE
Medidor de flujo de aire	Filtro del tanque	Medidor de flujo de aire
Sensor Temperatura 1	Bomba de combustible	Válvula de aire auxiliar
Sensor Temperatura 2	Filtro de combustible	Derivación de aire en marcha mínimo
Señal de Tacómetro	Regulador de presión de combustible	
Interruptor del acelerador	Inyectores	
Sensor Lambda	Riel de combustible	
ECU	Inyector de arranque en frío	

³ La inyección cumple 40 años [en línea]. Formato html. Disponible en internet: <http://www.motorspain.com/17-10-2007/vari0s/mecanica/la-inyeccion-electronica-cumple-40-anos>

⁴ WATSON. Op. cit., p. 62-63.

Figura 1. 2. Sistema L-Jetronic.



Fuente: Diesel-Electric.⁵

El sistema LH-Jetronic es una mejora considerable del sistema L-Jetronic, ya que se reemplazó el medidor de flujo de aire por el medidor de masa de aire. El diseño del medidor de masa de aire proporciona dos ventajas importantes sobre el medidor de flujo de aire: no existe una aleta móvil para restringir el flujo de aire, ni tampoco hay partes móviles que se desgasten o se traben. La configuración física del sistema LH-Jetronic se puede observar en la figura 1.3 y sus componentes se relacionan en la tabla 1.3.⁶

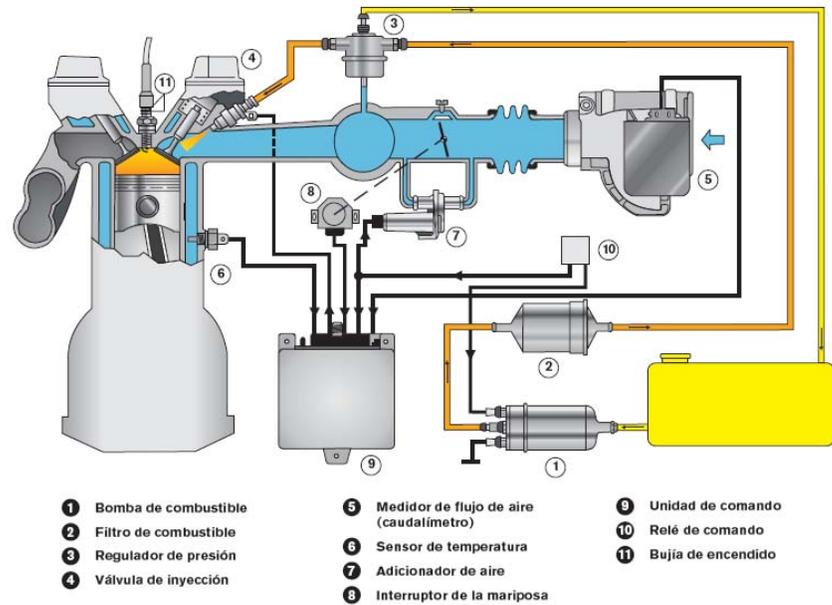
Tabla 1. 3. Componentes del sistema LH-Jetronic.

SISTEMA DE SENSORES	SISTEMA DE COMBUSTIBLE	SISTEMA DE AIRE
Medidor de masa de aire	Filtro del tanque	Medidor de masa de aire
Sensor Temperatura 1	Bomba de combustible	Válvula de aire auxiliar
Interruptor de vacío	Filtro de combustible	Derivación de aire en marcha mínima
Señal de Tacómetro	Regulador de presión de combustible	Estabilizador de marcha mínima en vacío
Interruptor del acelerador	Inyectores	
Sensor Lambda	Riel de combustible	
ECU	Inyector de arranque en frío	

⁵ Imagen disponible en internet: <http://www.diesel-electric.co.za/Graphics/L-Jetronic%20Fuel%20Injection.gif>

⁶ WATSON. Op. cit., p.87-88.

Figura 1. 3. Sistema LH-Jetronic.



Fuente: Sistemas de inyección electrónica.⁷

El sistema K-Jetronic fue introducido en 1974 como un reemplazo del sistema mecánico de inyección de combustible Bosch tecnológicamente viejo, que se desarrolló en la década de los 30. El sistema K-Jetronic debe su inicial a la palabra alemana *kontinuerlich*, que significa continuo. Así, el sistema K se llama con frecuencia Sistema de Inyección Continua, o CIS.

Este sistema mecánico que rocía continuamente combustible a través de los inyectores con una relación mínima para proporcionar sólo lo que es necesario para cada cilindro, generando la relación adecuada de aire-combustible. Una característica única de este sistema es que es controlado por sistemas electrónicos; el control de la inyección es mediante la acción hidráulica del combustible que pasa a través del sistema, véase figura 1.4,⁸ los componentes de este sistema se muestran en la tabla 1.4⁸

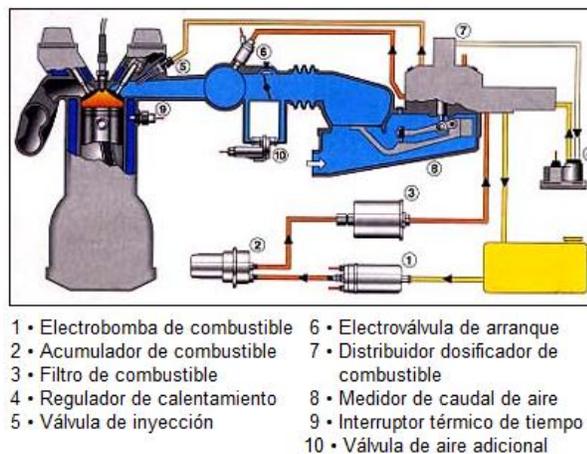
⁷ Robert Bosch Ltda. Sistemas de inyección electrónica. Catalogo [en línea]. Formato pdf. Disponible en www.todomecanica.com.

⁸ WATSON. Op. cit., p.103-104.

Tabla 1. 4. Componentes del sistemas K-Jetronic.

SISTEMA DE SENSORES	SISTEMA DE COMBUSTIBLE	SISTEMA DE AIRE
Sensor de flujo de aire	Filtro del tanque	Medidor de flujo de aire
	Prebomba	Válvula de aire auxiliar
	Distribuidor de combustible	Derivación de aire en marcha mínimo
	Regulador de presión de combustible	
	Regulador de presión de control	
	Filtro de combustible	
	Bomba de combustible	
	Inyectores	
	Inyector de arranque en frio	

Figura 1. 4. Sistema K-Jetronic.



Fuente: Sistema K- JETRONIC.⁹

El sistema KE-Jetronic, véase figura 1.5, también conocido como sistema CIS-E, fue introducido durante la década de los 80 en respuesta a las fuertes regulaciones de control de emisiones de gases. Al igual que el sistema K, el corazón del sistema KE es el sensor de flujo de aire y el distribuidor de combustible; el control del regulador de la presión se ha reemplazado por uno

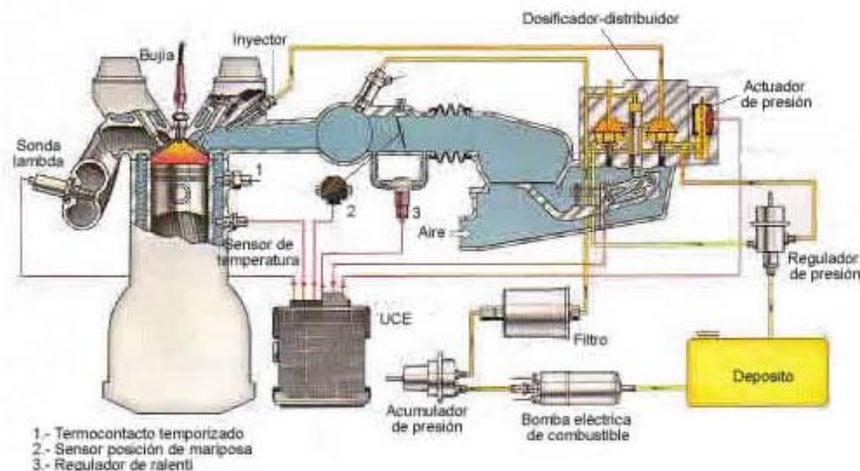
⁹ Mac Fuel Inyección. Sistema K- JETRONIC. [En línea], Argentina. Formato html, Disponible en internet: <http://www.macfuel.com.ar/imagenes/kjetronic.jpg>

electrónico y la ECU vuelve a ser tenida en cuenta para controlar todo con gran precisión. Los componentes del sistema KE-Jetronic se relacionan en la tabla 1.5¹⁰

Tabla 1. 5. Componentes del sistema KE-Jetronic.

SISTEMA DE SENSORES	SISTEMA DE COMBUSTIBLE	SISTEMA DE AIRE
Sensor de flujo de aire	Bomba de combustible	Medidor de flujo de aire
Sensor lambda	Acumulador	Válvula de aire auxiliar
Interruptor del acelerador	Filtro de combustible	Válvula del acelerador
Potenciómetro del sensor de flujo de aire	Distribuidor de combustible	Válvula de aire de velocidad de marcha mínima
	Regulador de presión de combustible	
	Enfriador de combustible	
	Inyectores	
	Válvula de arranque en frío	
	Inyector de arranque en frío	

Figura 1. 5. Sistema KE-Jetronic.



Fuente: Sistema KE-Jetronic.¹¹

El sistema Motronic incorpora un regulador de tiempo de encendido computarizado con la inyección de combustible, para tener un paquete completo de control del motor. A principios de los ochenta, las leyes para el control de las emisiones automotrices en todo el mundo se tornaron más severas. En los Estados Unidos se comenzó a reglamentar tales emisiones a raíz del uso de

¹⁰ WATSON. Op. cit., p. 152.

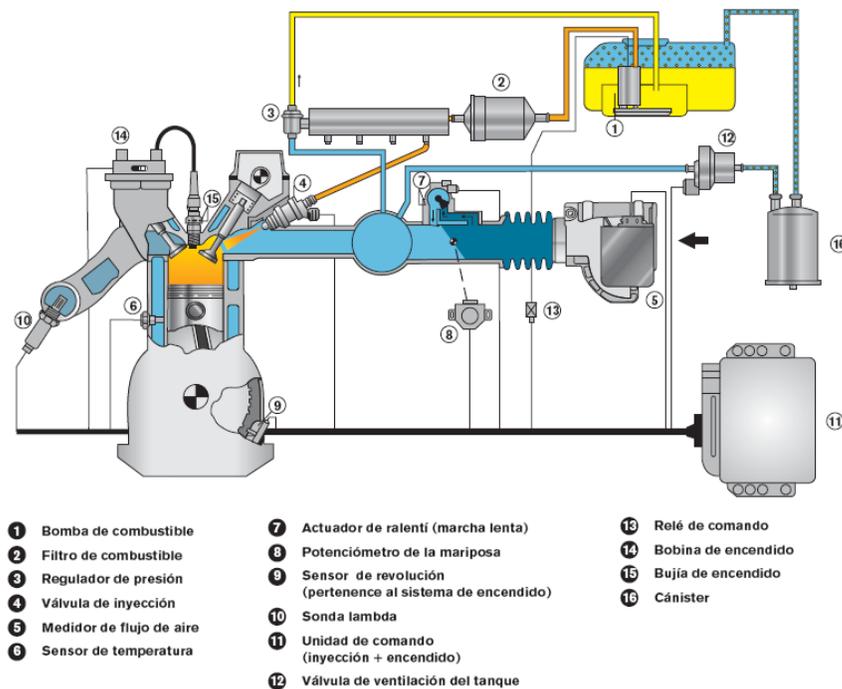
¹¹ Mac Fuel Inyección. Sistema K- JETRONIC. [En línea], Argentina. Formato html, Disponible en internet: <http://www.macfuel.com.ar/imagenes/kjetronic.jpg>

sistemas controlados y altamente integrados basados en computadora para el control. Se puede ver el diagrama físico en la figura 1.6 con sus respectivos componentes en la tabla 1.6.¹²

Tabla 1. 6. Componentes del sistema Motronic.

SISTEMA DE SENSORES	SISTEMA DE COMBUSTIBLE	SISTEMA DE AIRE
Sensor de Temperatura	Bomba de combustible	Medidor Caudal de aire
Sensor lambda	Filtro de combustible	Válvula de ventilación del tanque
Sensor de revolución	Regulador de presión de combustible	Potenciómetro de la mariposa
Sensor caudalimetro de aire	Válvula de inyección	Canister
ECU	Inyectores	
	Relé de comando	
	Bobina de encendido	
	Actuador de ralentí	

Figura 1. 6. Sistema Motronic.



Fuente: Sistemas de inyección electrónica.¹³

¹² WATSON. Op. cit., p. 163-164.

¹³ Robert Bosch Ltda. Sistemas de inyección electrónica. Catalogo [en línea]. Formato pdf. Disponible en www.todomecanica.com. p.5

1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Es muy conocido que en países industrializados como Alemania, Francia, Estados Unidos y Japón, la tecnología automotriz de los últimos años ha avanzado notablemente tanto en los aspectos mecánicos como electrónicos. Observando este panorama, en Colombia no se fabrican los sistemas de inyección electrónica sino que se importan y se ensamblan en las fábricas como SOFASA. También es necesario decir, en cuanto a la investigación, que no se han realizado proyectos tales que ayuden a la creación de estos productos electrónicos.

Por tal motivo, en Colombia es necesario empezar a avanzar en el diseño y la construcción de pequeños productos electrónicos aplicados en la industria automotriz como son los controles de inyectores de combustible. Esto podría lograrse a través de recursos e infraestructura Colombiana, por medio de instituciones como las universidades, dentro de grupos y semilleros de investigación.

Con base en lo anterior, se puede formular la siguiente pregunta ¿Cómo diseñar el controlador más óptimo que debe ser aplicado a los inyectores en el proceso de generar combustión en un motor a gasolina?

1.3 JUSTIFICACIÓN

Debido a que no hay suficiente investigación dentro del área de control en inyección electrónica y a pesar de los pocos esfuerzos de instituciones y/o empresas por incursionar en este campo de la ingeniería, la posibilidad de fabricar este tipo de sistemas electrónicos en el país es prácticamente nula.

Por tal razón, se ve la necesidad de empezar a crear, desde pequeños proyectos, las ideas que van a contribuir con la creación y desarrollo de pequeños productos electrónicos como los sistemas de inyección electrónica automotriz.

Con el proyecto se busca dejar bases para que la investigación sobre control e inyección electrónica se continúe trabajando dentro de los grupos de investigación existentes en la universidad y en otras instituciones interesadas.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Objetivo general

Diseñar el control de los inyectores para generar combustión en un motor a gasolina.

1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar las características del motor.
- Definir el tipo de control más recomendable para generar una óptima combustión dentro del motor.
- Caracterizar cuáles serán los elementos tanto electrónicos como mecánicos más recomendables para el buen funcionamiento del control de los inyectores.
- Seleccionar el software más recomendable para el diseño del control.
- Diseñar el programa de control para los inyectores con el software seleccionado.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO

Se diseñará el control para motores en un rango de 500cc a 1000cc, para cuatro pistones. El diseño será entregado para un solo tipo de control escogido a través de un previo análisis.

Como se presentará un programa de control, se hará una prueba de simulación a través del software previamente seleccionado demostrando la funcionalidad del diseño.

2 MARCO DE REFERENCIA

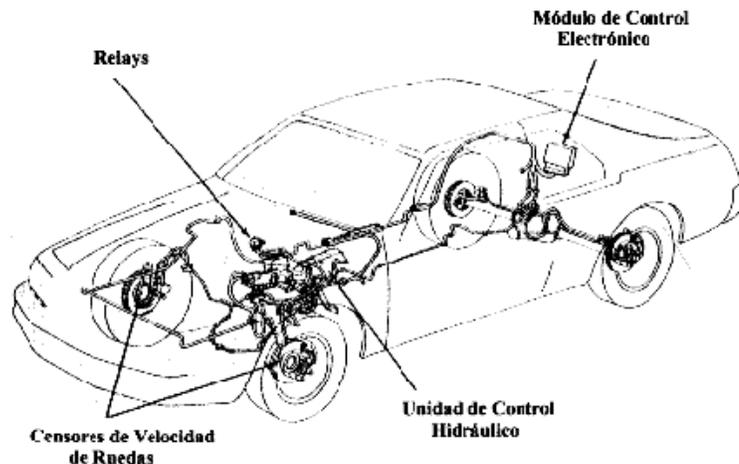
2.1 MARCO TEORICO-CONCEPTUAL

Actualmente la mayoría de los vehículos, o prácticamente todos, contienen todos los sistemas de control electrónico disponibles:

- Sistema antibloqueo de ruedas en el momento de frenado del vehículo (ABS-Antilock Brake System).
- Control electrónico de velocidad.
- Control electrónico del motor.
- Control de climatización.
- Sistemas de dirección y suspensión.
- Sistema de bolsas de seguridad de inflado automático suplementarias.
- Instrumentación electrónica.

Todos estos sistemas tienen un punto en común, son controlados electrónicamente. Éstos contienen componentes eléctricos que proveen constantemente información a varias unidades procesadoras de señal, las cuales interpretan la información recibida y realizan ajustes a medida que es necesario, de modo que se mantenga las condiciones óptimas de operación del sistema.

Figura 2. 1. Ubicación de los sistemas electrónicos en un automóvil.



Fuente: Electrónica automotriz.¹⁴

¹⁴ Electrónica automotriz, Sistemas controlados electrónicamente. INTRODUCCIÓN, [En línea], Madrid, España, Formato html, Diponible en Internet: <http://www.autocity.com/manuales-reparacion/index.html?nivelAcceso=3&codigo=220&cat>

Sistema Control Electrónico del Motor

En el Módulo de Control Electrónico del Motor (Electronic Engine Control - EEC) se encuentra el centro inteligente del sistema de operación del motor. Está formado por un Conjunto Electrónico de Control (Electronic Control Assembly - ECA), distintos sensores que envían señales eléctricas conteniendo información hacia las entradas del ECA, señales eléctricas de salida del ECA que constituyen los mandos hacia los distintos actuadores que maneja y conductores que conectan las entradas, salidas y la alimentación eléctrica del ECA.

El ECA es un Microcomputador que continuamente evalúa o procesa las señales de entrada provenientes del sistema de operación del motor y determina la mejor secuencia de operación para sus órdenes de salida. Continúa monitoreando las condiciones de operación del motor a través de las informaciones recibidas desde varios sensores localizados en el motor y en el compartimento de motor. Entre otros y solamente citando algunos, estos son:

- Sensor de Temperatura del Refrigerante del Motor (Engine Coolant Temperature Sensor - ECT)
- Sensor de Presión Absoluta (Manifold Absolute Pressure Sensor - MAP)
- Sensor de Temperatura del Aire Admitido (Air Charge Temperature - ACT)
- Sensor de Velocidad del Vehículo (Vehicle Speed Sensor - VSS)
- Sensor de Detonación (Knock Sensor - KS)
- Sonda de Oxígeno (Exhaust Gas Oxygen Sensor - EGO).

El ECA maneja cosas tales como la Mezcla de Aire/Combustible, Tiempos de Avance del Encendido y la Velocidad de Rotación del Motor en ralentí. Incluidas en estas está el manejo de los Inyectores de Combustible, el Módulo de Encendido, la Válvula de Recirculación de Gases de Escape (EGR) y la Válvula Bypass de Aire Controladora de RPM en Ralenti (ISC - BPA solenoid). Todos estos componentes trabajan en conjunto para lograr el mejor rendimiento del motor y mantener una baja emisión de gases contaminantes.¹⁵

2.1.1 Motor

Un motor de combustión interna es básicamente una máquina que mezcla oxígeno con combustible gasificado. Una vez mezclados íntimamente y confinados en un espacio denominado cámara de combustión, los gases son encendidos para quemarse (combustión).

¹⁵ Electrónica automotriz, Sistemas controlados electrónicamente. INTRODUCCIÓN, [En línea], Madrid, España, Formato html, Disponible en Internet: <http://www.autocity.com/manuales-reparacion/index.html?nivelAcceso=3&codigo=220&cat>

Debido a su diseño, el motor, utiliza el calor generado por la combustión, como energía para producir el movimiento giratorio del cigüeñal.

2.1.1.1 Tiempos del motor

- **1er tiempo-Carrera de admisión.** Se abre la válvula de admisión, el pistón baja y el cilindro se llena de aire mezclado con combustible.
- **2do tiempo-Carrera de compresión.** Se cierra la válvula de admisión, el pistón sube y comprime la mezcla de aire/gasolina.
- **3er tiempo-Carrera de expansión.** Se enciende la mezcla comprimida y el calor generado por la combustión expande los gases que ejercen presión sobre el pistón.
- **4to tiempo-Carrera de escape.** Se abre la válvula de escape, el pistón se desplaza hacia el punto muerto superior, expulsando los gases quemados.¹⁶

2.1.2 ¿Qué es la inyección electrónica?

Debido a la evolución muy rápida de los vehículos, el viejo carburador ya no sirve más para los nuevos motores, en lo que se refiere a la contaminación del aire, economía de combustible, potencia y respuestas rápidas en las aceleraciones, etc.

Los sistemas de inyección electrónica tienen la característica de permitir que el motor reciba solamente el volumen de combustible que necesita. Con eso se garantiza:

- menos contaminación
- más economía
- mejor rendimiento
- arranque más rápido
- no utiliza el ahogador (choque)
- mejor aprovechamiento del combustible.¹⁷

¹⁶ TodoMotores. Combustión interna. Como funciona un motor a cuatro tiempos. [En Línea]. Chile, Formato html, Disponible en Internet: http://www.todomotores.cl/mecanica/el_motor.htm

¹⁷ Robert Bosch Ltda. Sistemas de inyección electrónica. Catalogo [en línea]. Formato pdf. Disponible en www.todomecanica.com. p. 2

2.1.2.1 Historia de la inyección¹⁸

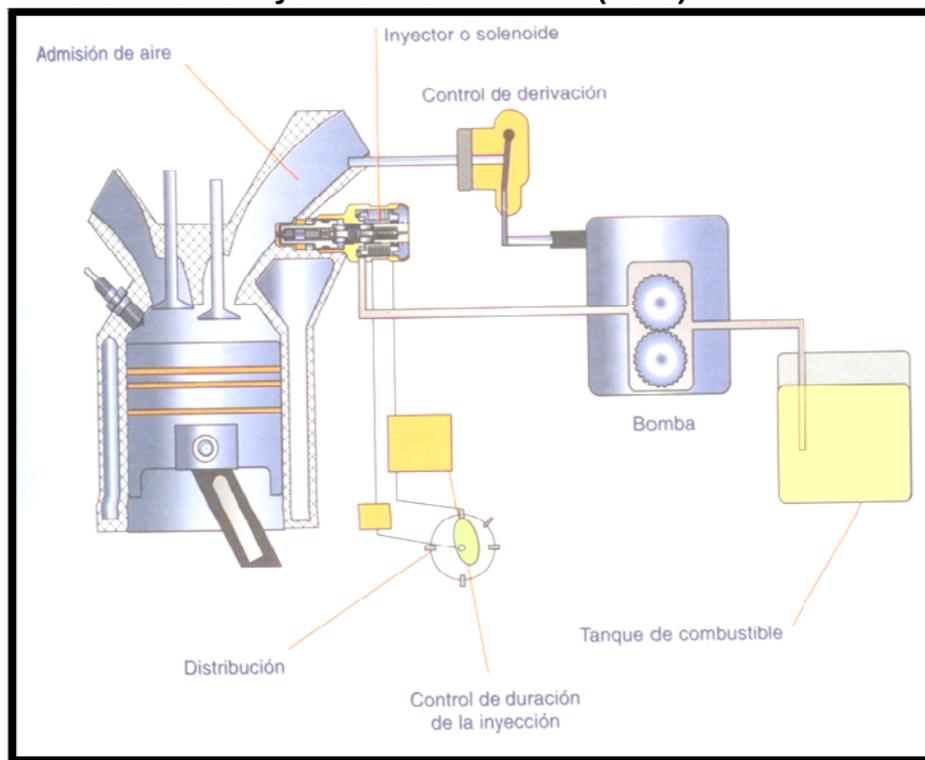
La historia de la inyección de combustible no debe desligarse de los primeros días del carburador. La razón de su existencia se debe a las desventajas del carburador. A continuación, en la tabla, hay un resumen de los acontecimientos más relevantes que precedieron a la inyección electrónica.

Fecha	Hecho
1775	Robert Street logró la evaporación de aceite de alquitrán de hulla y la trementina en un motor atmosférico.
1824	Samuel Morey y Erskine Hazard crearon el primer carburador para un motor de tipo atmosférico, éste incluía el precalentamiento para favorecer la evaporación
1825	Michael Faraday experimentó con la evaporación de combustibles líquidos e hidrocarburos.
1833	Eilhard Mitscherling logró la separación de ácidos benzoicos por calor, después surgió un nuevo producto ligero, el cuál denomino bencina.
1838	Willian Barnet patentó un dispositivo para evaporar gasolina. Con éste Barnet intentaba utilizar la gasolina en el motor de compresión con el cual experimentaba.
1860	Nokolaus August Otto, el inventor del motor Deutz de gas de cuatro tiempos, comenzó a experimentar con un motor de combustión, el cual poseía un dispositivo para evaporar combustibles líquidos de hidrocarburos. Otto ensayo el motor con una bencina natural y como no obtuvo éxito se concentró en la producción de motores a gas.
1865	Siegfried Marcus solicito una patente para un carburador, y subrayo la sencillez de su dispositivo comparado con los complicados generadores de vapor que existían hasta entonces.
1875	Wilhem Maybach, de la deutz, fue el primero en convertir un motor a gas que funcionara a gasolina.
1883	Deutz inventó el carburador de mecha el cual era de tipo estático. La mecha absorbía el combustible en la parte sumergida y lo llevaba hacia el aire en la parte expuesta.
1884	Fernand Forest ideó y construyo un carburador, el cual incluía una cámara de flotador y una boquilla con rociador de combustible.
1886	Carlos Benz mejoro el carburador de superficie, adicionando una válvula de flotador para asegurar un nivel constante de combustible.
1892	Maybach planeó el carburador con rociador, el cual se convirtió en la base de todos los carburadores.
1901	Krastin creó el primer carburador de dos gargantas.
1902	Arthur Krebs inventó un carburador de tres partes con desviación automática para el aire, con el fin de reducir al mínimo las desviaciones de la proporción ideal de aire combustible.
1903	Se introdujo no solo la bomba de pistón, sino el principio de inyectores calibrados.
1912	Bosch convirtió un motor de dos tiempos fuera de borda, a inyección de combustible, utilizando una bomba reconstruida de presión.

¹⁸ OROZCO, Felipe. Inyección Electrónica en Motor a gasolina. Editor México Digital Comunicacion, 2006 ISBN 9707790687. p.1-8

1957	Chevrolet introdujo su primer motor con inyección de combustible para la producción masiva de corbette. El sistema Ramjet utilizó una bomba de alta presión, la cual movía el combustible del tanque de los inyectores
1968	La Wolkswagen introdujo el sistema D-jetronic de Bosch en el mercado americano con el modelo tipo 3. Este sistema fue utilizado en una variedad de modelos europeos a principios de 1970 hasta 1976
1975	Cadillac introdujo la primera producción masiva del sistema de inyección de combustible, como equipo estándar en el Cadillac Seville, modelo 1976.
1980	Introducción del sistema de inyección digital (DFI) por Cadillac.
1982	Chevrolet introdujo el Camaro y el Corvette, con lo que se llamó Crossfire Injection. Éste presentó dos unidades sencillas de inyector en el cuerpo del acelerador, montadas en el múltiple de admisión común.

Figura 2. 2. Sistema de inyección de Fuscaldo (1940).



Fuente: Historia de la Inyección.¹⁹

2.1.3 Clasificación de los sistemas de inyección²⁰

Para los sistemas de inyección se pueden aplicar cuatro clasificaciones:

- Por el número de inyectores

¹⁹ Ibid., p. 6

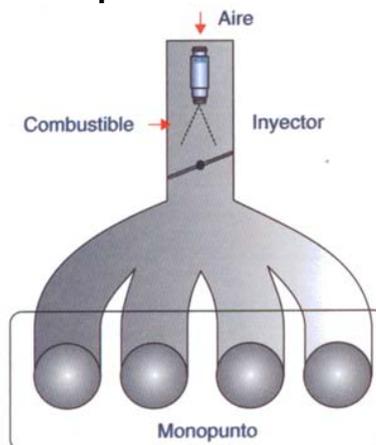
²⁰ Ibid., p.20-25

- Por la ubicación del inyector
- Por el sincronismo de la inyección
- Por el sistema de control y accionamiento de los inyectores

2.1.3.1 Por el número de inyectores

- **Monopunto:** existe un inyector en una posición similar a la que tendría un carburador. La principal diferencia con el carburador es que la cantidad de combustible no depende de la depresión del colector.

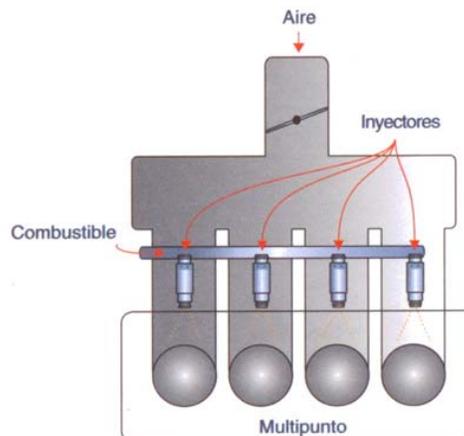
Figura 2. 3. Inyección tipo monopunto.



Fuente: Clasificación de los sistemas de inyección de combustible.²¹

- **Multipunto:** Se dispone de un inyector para cada cilindro.

Figura 2. 4. Inyección tipo multipunto.



Fuente: Clasificación de los sistemas de inyección de combustible²²

²¹Ibid., p.21

2.1.3.2 Por la ubicación del inyector

- **Directa en el cilindro:** el inyector se encuentra en contacto con la cámara de combustión y lanza el combustible al interior de ésta. Este sistema se utiliza poco debido al tiempo para realizarse la mezcla y por los problemas tecnológicos del inyector (altas presiones y temperatura).
- **Indirecta en el colector de admisión:** los inyectores están situados muy cerca de la válvula de admisión, en el colector de admisión.

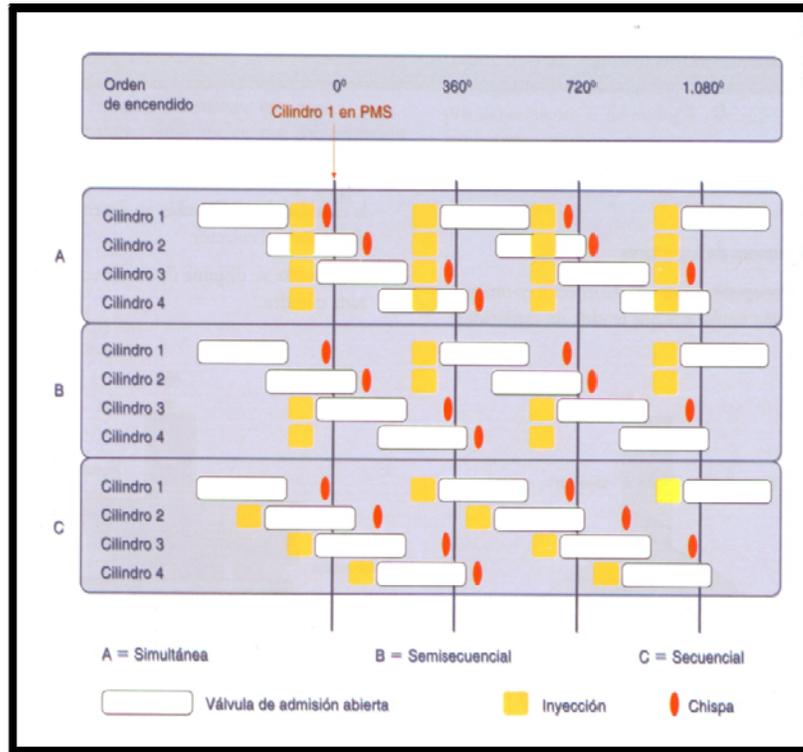
2.1.3.3 Por el sincronismo de la inyección

- **Simultanea:** debe ser indirecta, y se basa en inyectar combustible simultáneamente en todos los inyectores a cierta frecuencia que no coincide con la apertura de la válvula de un determinado cilindro, de modo que el combustible inyectado se acumula en el colector de admisión, mientras la válvula de admisión permanece cerrada. Cuando se abre la válvula, se produce la entrada de la mezcla acumulada y de la nueva proveniente del inyector.
- **Semisecuencia:** el combustible es inyectado en los cilindros de forma que los inyectores abren y cierran de dos en dos.
- **Secuencial:** La inyección solo se produce solo en el momento de apertura de la válvula de admisión.

El inyector regula la cantidad de combustible por el tiempo que permanece abierto, y la frecuencia de apertura depende del régimen de giro del motor. En la figura 2.5, se puede observar la generación de combustión en la cámara de acuerdo a los tipos de inyección por sincronismo mencionados anteriormente:

²²Ibid., p.21

Figura 2. 5. Generación de combustible para diferentes tipos de inyección por sincronismo.



Fuente: Clasificación de los sistemas de inyección de combustible.²³

2.1.3.4 Por el sistema de control y accionamiento de los inyectores

- **Mecánica:** control y accionamiento mecánico de los inyectores (K-Jetronic).
- **Mecánica electrónica:** control electrónico de accionamiento mecánico de los inyectores (KE-Jetronic).
- **Electrónica:** Control y accionamiento electrónico de los inyectores (L-Jetronic, LE-Jetronic, Motronic, DigiFant).

Las configuraciones más comunes que se pueden presentar en el mercado son:

- Inyección directa, multipunto y secuencial.
- Inyección indirecta, multipunto y secuencial.
- Inyección indirecta, multipunto y simultánea.
- Inyección indirecta, multipunto y simultánea.

²³ Ibid., p. 23

Actualmente existen varias formas de inyectar el combustible controlado electrónicamente, principalmente, con la ubicación del inyector, el número de inyectores, el tipo de lazo o bucle y el tiempo de apertura del inyector.

2.1.4 Ventajas de la inyección electrónica de combustible²⁴

La inyección electrónica se puede entender en tres sistemas:

- **Suministro de aire:** el aire entra por un ducto que lo filtra, pasa al cuerpo de la válvula mariposa, de igual forma que él en carburador. Al accionar el pedal del acelerador se dosifica la entrada de aire y no de combustible. Existe un sistema eléctrico que permite el paso de aire para el funcionamiento de la marcha mínima. El diseño de los múltiples de admisión hace que cada cilindro le llegue la misma cantidad de aire.
- **Suministro de combustible:** la bomba sumergida en el tanque, envía combustible hacia los inyectores; un regulador permite mantener la presión constante en la galería (ó riel) de inyectores; otra tubería de retorno devuelve al tanque el combustible sobrante. Los inyectores son válvulas eléctricas que dosifican y pulverizan el combustible sobre las válvulas de admisión, antes de entrar en la cámara de combustión.
- **Parte electrónica:** la computadora, dosifica la entrada de combustible, por lo tanto controla el tiempo durante el cual deben permanecer abiertos los inyectores. Esta cantidad de combustible depende de varios factores como la temperatura del motor, velocidad del motor, carga y posición de la válvula de mariposa (acelerador). Todos los cambios mencionados son captados por sensores que envían la información a la computadora.

Una variedad de sensores miden el flujo de aire, temperatura del motor, presión atmosférica, revoluciones del motor, posición de los pistones, etc. La información captada por los sensores es enviada a la computadora que dosifica el combustible de acuerdo con los requerimientos del motor.

En el sistema de inyección electrónica de combustible sólo pasa aire y el múltiple de admisión se puede construir de mayor diámetro, dando mayor alimentación a los motores y, en consecuencia, mayor potencia.

Como no es requerido que existan puntos calientes en el múltiple de admisión para vaporizar la gasolina, el aire puede entrar más frío y por lo tanto en mayor cantidad para cada bajada de pistón con lo que el llenado es más completo.

²⁴ Ibid., p.18-19

2.1.5 Visión general de la inyección electrónica de combustible.²⁵

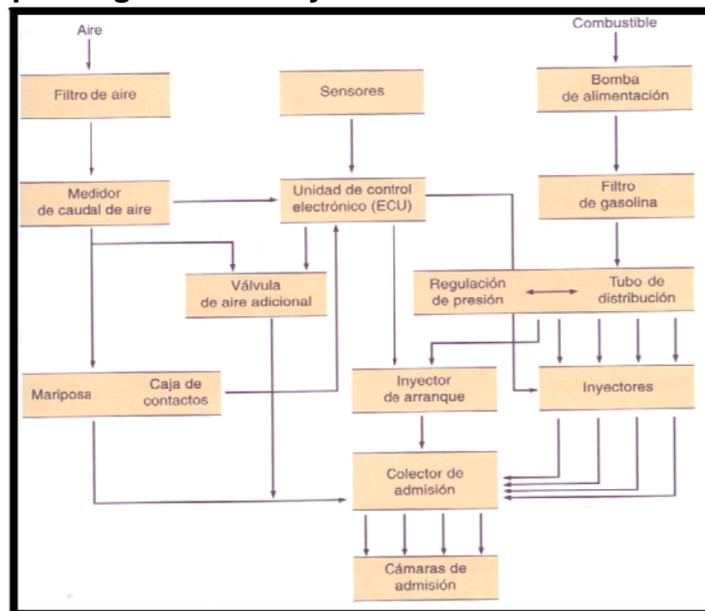
El control de dosificación se puede realizar ya que se controla una serie de parámetros para determinar el tiempo básico de inyección, como son:

- Densidad de aire
- Temperatura del motor
- Régimen de giro del motor
- Carga del motor
- Tensión de la red del vehículo
- Oxígeno residual de la mezcla
- Condiciones de funcionamiento

Para la determinación de estos parámetros son utilizados transductores capaces de determinar modificaciones de tensión eléctrica, de acuerdo con la magnitud que controlan. Los transductores transmiten a la ECU (unidad de control electrónico) la información que será procesada, y así transmitir las órdenes al sistema.

En el siguiente esquema podemos apreciar los diferentes procesos a los cuales son sometidos tanto el aire como la gasolina antes de ser mezclados. También se puede apreciar las relaciones electrónicas entre algunos elementos y la ECU.

Figura 2. 6. Esquema general de inyección electrónica.



Fuente: Visión general de la inyección electrónica de combustible multipunto.²⁶

²⁵ Ibid., p. 26- 69

²⁶ Ibid., p. 28

El aire aspirado pasa primero por el filtro de aire, en seguida pasa al medidor de flujo de aire, el cual envía la información al ECU. La cantidad de aire que entra está regulada por la válvula mariposa, que a través de la caja de contactos envía la señal de su estado a la ECU y por la válvula de aire adicional controlada por la ECU.

El recorrido de la gasolina empieza por desde el tanque de combustible, donde es aspirada por la bomba eléctrica de combustible, que recibe al corriente del relé principal, regida por el interruptor de contacto y la ECU. La bomba de combustible impulsa la gasolina a través del filtro, al tubo de distribución (riel), y llega al regulador de presión de inyección. Después de tener la presión adecuada, pasa finalmente al inyector de arranque frío (si lo tiene) seguido de los inyectores.

Los sistemas de inyección de gasolina dosifican exactamente la cantidad de combustible que es requerida en cada régimen de giro y carga del motor. En los sistemas actuales de inyección indirecta el combustible es inyectado en el colector de admisión, justamente delante de las válvulas de admisión, por medio de un sistema de inyección autónoma, gobernado mediante un dispositivo electrónico; de esta forma se consigue un mayor control en la mezcla aire-combustible en cualquiera de las condiciones de marcha del motor, de los que resultan unos niveles reducidos de emisión de gases contaminantes y mejor rendimiento del motor.

La supresión del carburador permite una concepción óptima de los colectores y conductos de admisión, gracias a la cual se mejora considerablemente el llenado de los cilindros. De lo anterior resulta una potencia específica mayor.

A través de los colectores y conductos de admisión circula aire solamente, inyectándose la gasolina justamente en la entrada del cilindro, dosificándola adecuadamente de manera que el motor reciba la cantidad justa para sus necesidades reales. Así mismo, cada uno de los cilindros recibe la misma cantidad de combustible.

2.1.5.1 Circuito hidráulico (Alimentación de combustible)

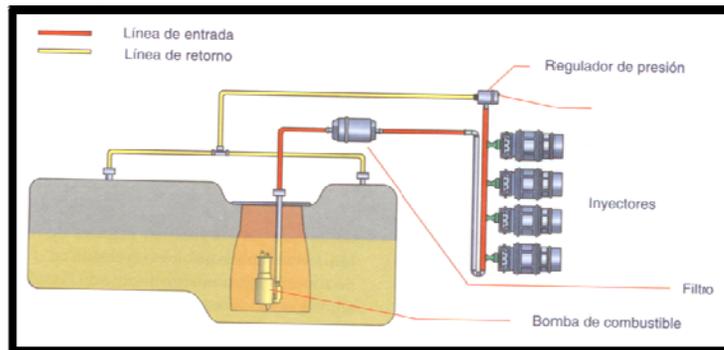
Bomba eléctrica de combustible

Se encarga de extraer el combustible desde el tanque (depósito de combustible) y lo envía al riel de inyectores. Está ubicada dentro del tanque y es accionada por un motor eléctrico, véase figura 2.7. La bomba es de funcionamiento continuo y recibe la alimentación de un relé, el cual es comandado por la ECU.

Los sistemas actuales de combustible son el tipo “returnless”, es decir, con un solo conducto de conexión entre el tanque y el motor; lo cual permite;

- Reducir al mínimo, en caso de accidente, la posibilidad de incendio.
- Reducir las emisiones de los vapores de combustibles a la atmosfera.

Figura 2. 7. Sistema de la bomba eléctrica de combustible.



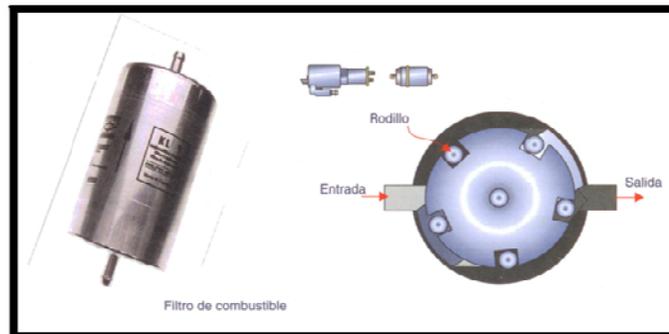
Fuente: Visión general de la inyección electrónica de combustible multipunto.²⁷

La bomba no sólo debe alimentar todos los conductos, sino que debe proporcionar una presión y flujos mayores que los de máximo consumo de la instalación. Usualmente la presión es de 5 bar y el caudal de 2 litros por minuto, aproximadamente.

Filtro de combustible

Se encarga de retener las partículas de suciedad existentes en la gasolina, para que éstas no obstruyan los pequeños orificios de descarga de inyectores. El filtro es de alta presión y debe ser reemplazado de acuerdo con las especificaciones del fabricante. Generalmente consiste en una malla fina de papel en una lata metálica que filtra las partículas muy pequeñas, véase figura 2.8.

Figura 2. 8. Filtro de combustible.



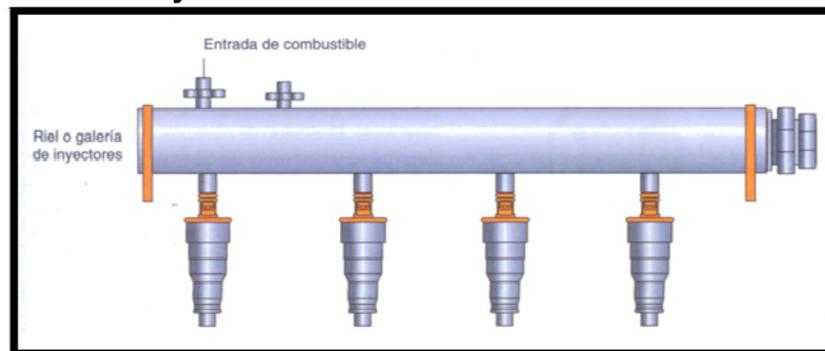
²⁷ Ibid., p.31

Fuente: Visión general de la inyección electrónica de combustible multipunto.²⁸

Riel o galería de inyectores

Es utilizado en los sistemas de inyección multipunto y no en los monopunto, proporciona una presión uniforme de combustible a todos los inyectores, asegurando un suministro homogéneo en cada uno.

Figura 2. 9. Riel de inyectores.



Fuente: Visión general de la inyección electrónica de combustible multipunto.²⁹

Regulador de presión de combustible (PRC)

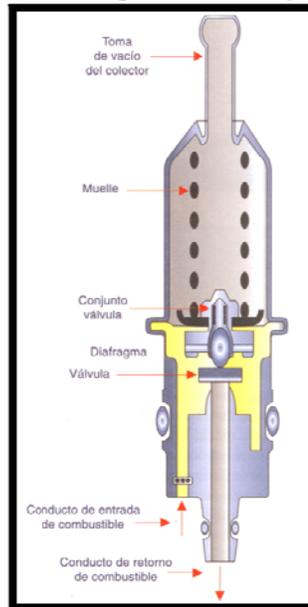
Una de sus funciones es transferir el combustible al tanque por el conducto de rebose (línea de retorno) en el caso que supere la presión máxima admisible en el riel de inyectores. Adicionalmente, el regulador se encuentra comunicado con el colector de admisión, por lo que la regulación se hace sensible a la depresión que exista en el colector.

El objetivo fundamental de esta regulación es impedir que las variaciones de vacío en el colector influyan en la cantidad de combustible inyectado. Al aumentar dicha presión, aumenta la cantidad de combustible suministrado, por lo que en esas condiciones el regulador disminuye la presión de inyección quedando compensada con la cantidad real de combustible que ingresa a los cilindros. Cuando la presión disminuye, el regulador actúa de forma contraria.

²⁸ Ibid., p.32

²⁹ Ibid., p.32

Figura 2. 10. Composición de un regulador de presión.

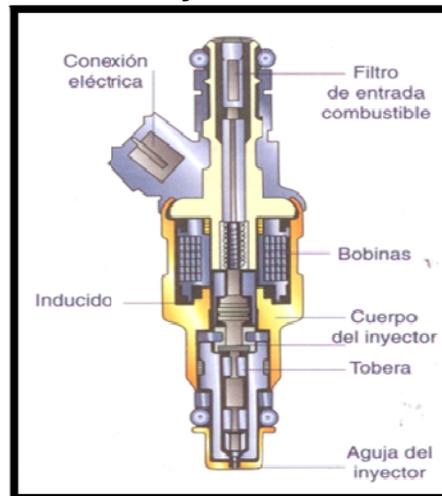


Fuente: Visión general de la inyección electrónica de combustible multipunto.³⁰

Inyectores

Los sistemas actuales utilizan inyectores gobernados eléctricamente, es decir, válvulas de regulación eléctricas. Son dispositivos de tipo “todo o nada”, ya que tienen dos estados estables (abiertos y cerrados). Cuando están abiertos permiten el paso de combustible y cuando están cerrados lo bloquean.

Figura 2. 11. Composición de un inyector.



Fuente: Visión general de la inyección electrónica de combustible multipunto.³¹

³⁰ Ibid., p. 34

La ECU es la encargada de mandar los impulsos eléctricos que gobiernan la apertura de inyectores. El tiempo de duración de los impulsos determina el tiempo de apertura de la aguja pulverizadora, y debido a que la presión de alimentación del inyector es constante, la cantidad de combustible inyectado será proporcional al tiempo de duración del impulso eléctrico.

El inyector debe ser una válvula que responda con una gran precisión a los impulsos eléctricos que reciba. Los componentes que lo conforman deben ser de gran precisión.

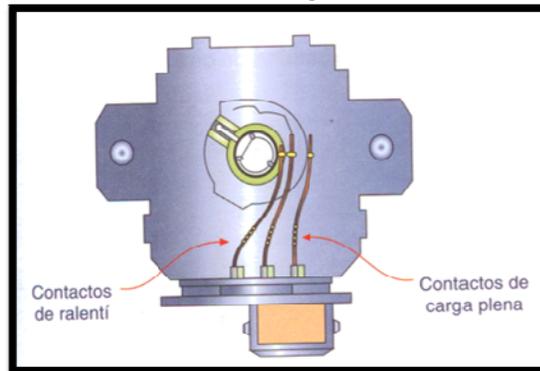
2.1.5.2 Circuito neumático

La determinación de la posición de la mariposa es esencial para la gestión electrónica del sistema. Es lo que determina el estado ralentí, media, plena carga del motor y, adicionalmente, la voluntad del conductor de solicitud de mayor potencia para las aceleraciones en todas sus variaciones.

Caja de contactos de la mariposa

Debido a que el sistema de medición de flujo de aire es bastante preciso, a su vez es muy sencillo. Sólo debe determinar dos posiciones, una relacionada con el ralentí y la otra, con el estado en plena carga, por intermedio del eje de la mariposa, véase figura 2.12.

Figura 2. 12. Caja de contacto de la mariposa.



Fuente: Visión general de la inyección electrónica de combustible multipunto.³²

Los cortes de desaceleración los determina la ECU cuando los contactos de ralentí están cerrados, restableciendo nuevamente la inyección cuando el motor

³¹ Ibid., p.35

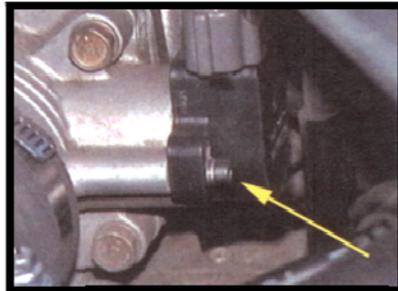
³² Ibid., p.36

alcanza 1200 r.p.m., aproximadamente. El cierre de los contactos de plena carga (pedal del acelerador a fondo) indica a la ECU un enriquecimiento de la dosificación.

Sensor de posición de la mariposa (TPS)

Debido a que la medición de flujo de aire es bastante precisa en los sistemas actuales, la ECU puede gestionar los estados estacionarios del motor, sin la necesidad de conocer la posición física de la mariposa en todo momento.

Figura 2. 13. Ubicación del TPS.



Fuente: Visión general de la inyección electrónica de combustible multipunto.³³

No obstante, para la gestión de estados transitorios (positivos ó negativos) resulta ventajoso para la ECU determinar la posición física inicial y final de la mariposa, y así es posible determinar exactamente la cantidad de combustible que se va a inyectar. En los sistemas de inyección que no poseen potenciómetro para el seguimiento de la posición de la mariposa, la gestión de los estados transitorios la realiza la ECU basándose en la variación de lectura del elemento de medición del flujo de aire.

De la evaluación correcta de los transitorios, y fundamentalmente de los positivos, depende del incremento de combustible inyectado. Este incremento no debe ser excesivo ni escaso, ya que tiene una repercusión en el incremento del par como de los contaminantes.

Actuador ralentí

Consiste en regular directamente la posición de la mariposa mediante una señal eléctrica enviada por la ECU. El actuador está montado en el cuerpo mariposa y constituido por un motor de corriente continua que regula la apertura de la mariposa de 0° a 15°. En el actuador hay normalmente potenciómetros integrados

³³ Ibid., p.37

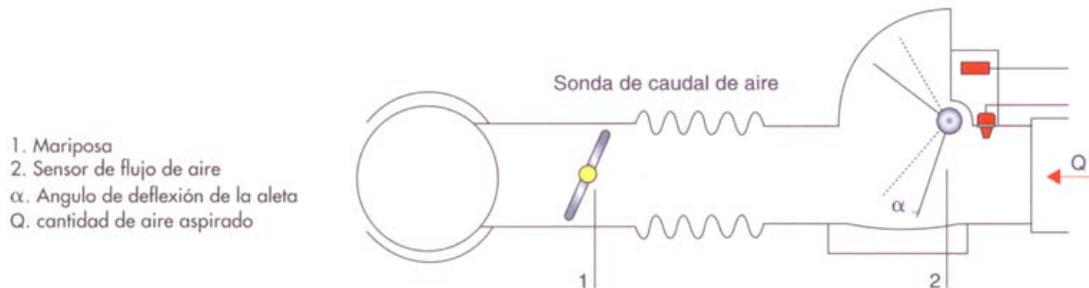
que transmiten respectivamente a la ECU la posición angular. Esto es, de 0° a 15° para ralenti y de 0° a 83° para el resto de rpm del motor.

Determinación de flujo de aire

Existen diversas maneras de determinar el flujo de aire en el motor. Las soluciones difieren entre ellas en cuanto al concepto, pero el concepto del principio eléctrico se mantiene prácticamente inalterado.

Un ejemplo, es el sensor de caudal de aire (VAF, figura 2.14), tiene como función medir el volumen de aire aspirado por el motor, lo que determina su estado de carga. La medición del caudal determina, entre otros factores, el tiempo en el que los inyectores deben permanecer abiertos.

Figura 2. 14. Esquema del sensor VAF.



Fuente: Visión general de la inyección electrónica de combustible multipunto.³⁴

Sensor de presión barométrica

Mide la presión atmosférica y la convierte en un voltaje que envía a la ECU. La ECU utiliza la señal para calcular la altitud a que funciona el vehículo y corrige la tasa de aire combustible y la distribución de encendido, mejorando así la conducción a gran altitud.

2.1.5.3 Circuito eléctrico

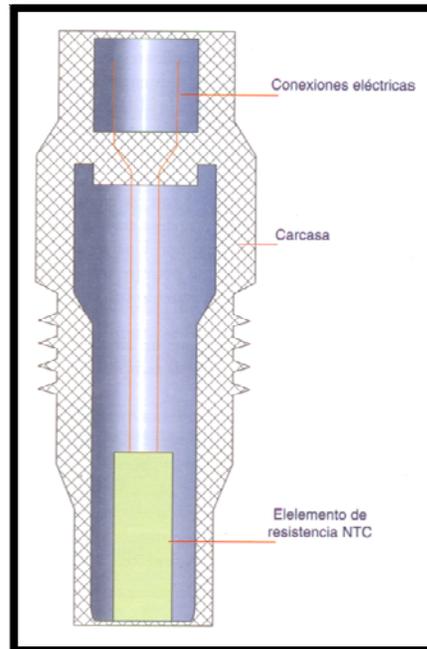
Determinación de la temperatura del motor

Se realiza mediante una resistencia eléctrica variable (Termistor) tipo NPC (Negative Temperature Coefficient, figura 2.15) que está en contacto directamente con el líquido refrigerante. La variación es detectada por la ECU, la cual ajusta los pulsos de inyección de acuerdo con la interpretación de la temperatura del motor.

³⁴ Ibid., p.42

Básicamente la ECU disminuye los pulsos de inyección en la medida en que le motor se calienta y los incrementa cuando el motor esta frío.

Figura 2. 15. Termistor NPC.



Fuente: Visión general de la inyección electrónica de combustible multipunto.³⁵

Sonda lambda (oxígeno)

Es una sonda que analiza los gases de escape en el mismo momento que circulan por el sistema de escape, detectando posibles excesos o defectos de oxígeno que provocan la intervención de la ECU para evitarlos. Actualmente la sonda se calienta artificialmente mediante una resistencia eléctrica, antes de poner en marcha el motor.

³⁵ Ibid., p. 47

Figura 2. 16. Sonda Lambda.



Fuente: Visión general de la inyección electrónica de combustible multipunto.³⁶

Posee dos electrodos que se encuentran en contacto con un medio diferente, es decir, por un lado los gases del escape, y, por el otro, el aire de ambiente, véase figura 2.16. Si el contenido de oxígeno de ambos electrodos difiere, aparece entre ellos una diferencia eléctrica. Como la tasa de oxígeno de los gases de escape es función de la riqueza de la mezcla, la sonda lambda es capaz de detectar y medir esta riqueza, enviando la señal conveniente al a ECU para que corrija el pulso de inyección.

Régimen de giro del motor

Las rpm de funcionamiento del motor son el principal principio de análisis de la ECU del sistema de inyección, y este análisis está presente en todos los sistemas de inyección electrónica. La señal para la determinación de las rpm del motor es analógica de tipo inductiva, y es portadora, adicionalmente, de la información de la posición del cigüeñal, por lo que es utilizada de diferentes formas según el tipo de inyección.

Si el sistema de inyección es secuencial, se necesita una información adicional sobre la posición exacta de un pistón (normalmente el primero), por lo cual será necesario una segunda señal de referencia, en este caso casi siempre el árbol de levas mediante un sensor de tipo hall.

Los sistemas multipunto simultáneos no requieren la sincronización exacta para determinar el momento de la inyección, en estos casos basta con la señal de posición de PMS (punto muerto superior) de la señal inductiva de las rpm o la señal del circuito primario de encendido.

³⁶ Ibid., p. 49

- **Señal de circuito de encendido:** esta señal puede utilizarse por los sistemas multipunto simultáneo para determinar las rpm del motor y sincronizar la inyección.

Figura 2. 17. Señal de encendido.

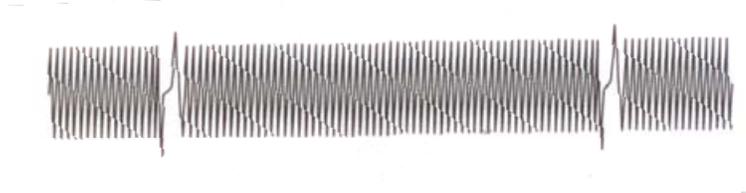


Fuente: Visión general de la inyección electrónica de combustible multipunto.³⁷

En motores de cuatro tiempo y cuatro cilindros (dos saltos de chispa por vuelta del cigüeñal), será necesario incorporar un divisor de frecuencia en la ECU, ya que estos sistemas normalmente activan los inyectores simultáneamente una vez por vuelta del cigüeñal. La determinación de las rpm se efectúa tratando la señal en un circuito conformador, que convierte la señal en pulsos cuadrados, luego por un divisor de frecuencia y finalmente por un contador de pulsos.

- **Señal inductiva del cigüeñal:** esta señal es generada por un elemento inductivo acoplado frente a una rueda dentada fijada al cigüeñal. La rueda dentada posee tallados 58 dientes, faltando uno o dos dientes donde coincide con el PMS del cilindro No.1 (generalmente), esta zona es donde se inducen los pulsos de mayor amplitud.

Figura 2. 18. Señal inductiva.



Fuente: Visión general de la inyección electrónica de combustible multipunto.³⁸

Estos pulsos bastan para los sistemas simultáneos multipunto en la sincronización y determinación de las rpm del motor. Para ello solo es necesario conformar la señal y contar los pulsos de mayor amplitud y se obtienen las rpm, sin la necesidad de un divisor de frecuencia, ya que corresponde a un pulso por vuelta del cigüeñal.

³⁷ Ibid., p. 50

³⁸ Ibid., p. 51

La sincronización de la inyección se efectúa utilizando el pulso mayor como trigger (debidamente retardado) para el comienzo de la inyección. Algunos sistemas que intentan ser más precisos, cuentan continuamente con los pulsos menores a la determinación de las rpm, y reserva los pulsos mayores solo para la sincronización con la inyección.

- **Señal hall de árbol de levas:** los sistemas de inyección multipunto secuencial, además de la señal inductiva del cigüeñal, requieren una segunda señal para su correcta sincronización de la inyección, generalmente de tipo Hall y acoplada al árbol de levas. La determinación de la rpm se efectúa a partir del sensor inductivo del cigüeñal, exactamente igual que en los sistemas multipunto simultáneo.

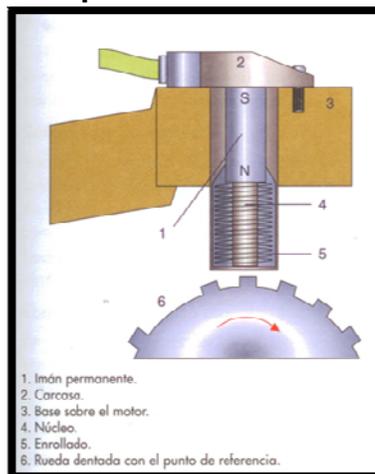
Figura 2. 19. Señal Hall.



Fuente: Visión general de la inyección electrónica de combustible multipunto.³⁹

La señal tipo hall genera un pulso por vuelta, justo en el momento que el pistón 1 se encuentra en PMS y en fase de admisión, a diferencia de la señal inductiva del cigüeñal que indica el PMS del pistón 1, pero no en una fase determinada. Cuando el sistema detecta la coincidencia de ambas señales, genera un tren de pulsos hacia los inyectores siguiendo el orden exacto de inyección (1, 3, 2, 4).

Figura 2. 20. Sensor inductivo para la determinación de las rpm.



Fuente: Visión general de la inyección electrónica de combustible multipunto.⁴⁰

³⁹ Ibid., p. 52

⁴⁰ Ibid., p. 52

La ECU calcula el tiempo entre cada inyección de acuerdo a las rpm del motor, consiguiendo así una inyección secuencial y sincronizada con cada cilindro. También es posible generar la señal de inyección para los cilindros 1 y 3, y con la siguiente señal del cigüeñal la de los cilindros 4 y 2.

2.1.5.4 Unidad de control electrónico

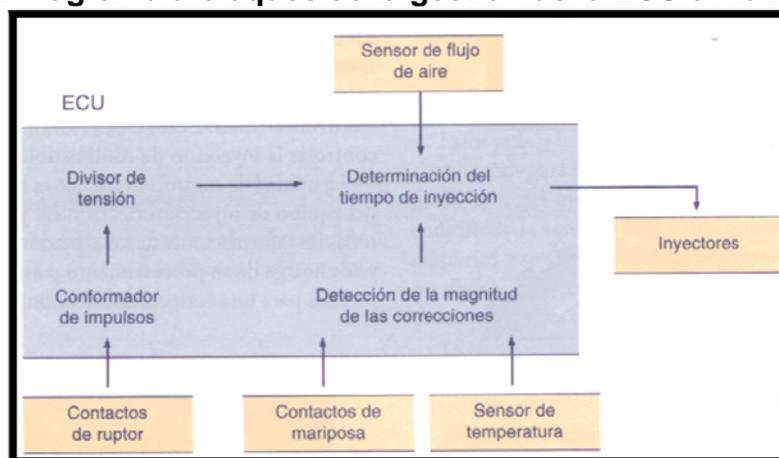
La ECU es la parte básica del equipo de inyección electrónica, ya que recibe toda la información de los sensores, se encarga de su procesamiento para dar órdenes precisas para una correcta dosificación de la mezcla. El resultado final de la ECU es la determinación del tiempo es instante de inyección y el salto de la chispa de encendido.

Gestión de lazo o bucle abierto

Dispone de tres entradas de información: los contactos de ruptor, cuya señal se hace pasar previamente por un conformador de impulsos, que transforma las señales recibidas en diferentes señales rectangulares, y después, por un divisor de tensión. Esta señal tratada informa de los elementos de salto de la chispa de la bujía y con ello, proximidades de PMS del pistón.

Por otro lado recibe la información del sensor de flujo de aire que determina el tiempo de inyección. Finalmente, una entrada del bloque de detección de la magnitud de las correcciones, determina las correcciones que deben hacerse para conseguir una dosificación adecuada a las condiciones de funcionamiento en cada instante, gracias a la información de los contactos de la mariposa y sensor mariposa.

Figura 2. 21. Diagrama a bloques de la gestión de la ECU en lazo abierto.



Fuente: Visión general de la inyección electrónica de combustible multipunto.⁴¹

⁴¹ Ibid., p.55

Gestión de lazo o bucle cerrado

Las normas anticontaminación obligan al empleo de catalizadores, los cuales ofrecen una eficacia directamente condicionada a la relación aire combustible, que se establece en la mezcla al ser introducida al cilindro. La sensibilidad a éste parámetro es alta, de modo que se introduce una sonda lambda para realimentar la ECU y conseguir una relación lazo cerrado.

La sonda lambda, situada en el escape, informa si la mezcla esta es rica o pobre, lo que permite modificar la inyección realizada por la ECU para el aporte de combustible a las condiciones de una adecuada eficacia del catalizador.

El siguiente paso, después de la regulación aire/combustible, es incorporar la regulación y control del sistema de encendido de la ECU. De esta forma controla conjuntamente el momento y tiempo de inyección, la bomba de combustible y el momento de encendido.

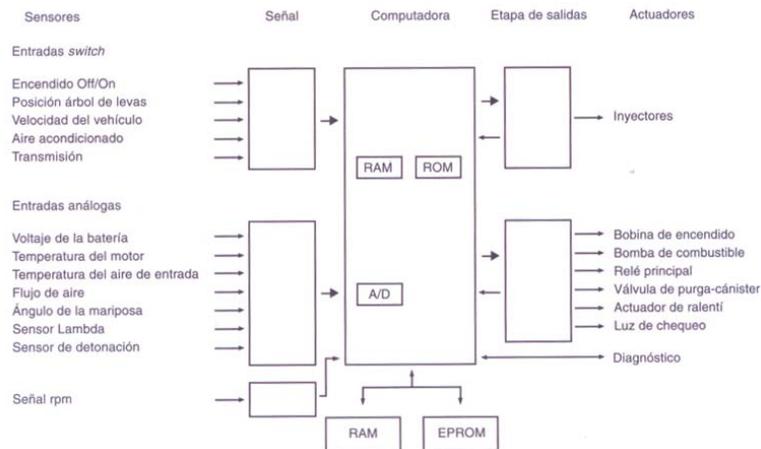
Arquitectura de la ECU

Está conformada por un conformador de impulsos, un convertido analógico a digital, un bus digital de transmisión y una microcomputadora.

- **Controlador de impulsos:** recibe los impulsos de información de encendido, donde éstos se modifican en magnitud y forma, para que sean procesados en la computadora. Una vez hechas las modificaciones pasan al circuito de entrada y salida.
- **Convertidor analógico digital:** convierte las señales provenientes de los sensores analógicos, las procesa y convierte en información digital, luego los distribuye hacia un bus de datos.
- **Bus digital de transmisión:** transporta la información proveniente de los sensores digitales y el ADC hacia la microcomputadora.
- **Microcomputadora:** Se encarga de tomar la información, procesarla y controlar los respectivos actuadores.

A continuación podemos visualizar un ejemplo

Figura 2. 22. Arquitectura de la gestión electrónica de un sistema de inyección, modelo Motronic.



Fuente: Visión general de la inyección electrónica de combustible multipunto.⁴²

2.1.5.5 Condiciones en el motor para realizar combustión

La relación entre aire y combustible varía constantemente en un motor de pistones. Esta proporción se calcula de acuerdo al peso.

$$\text{Proporción de Mezcla} = \frac{\text{aire atmosférico en gramos}}{\text{consumo de gasolina en gramos}}$$

Mezcla Estequiométrica

En condiciones normales, la combustión total de 1 gramo de gasolina se consigue con 14.8 gramos de aire. Sin embargo, los motores de pistón no son capaces de crear las condiciones de homogeneidad entre aire y gasolina para quemarla el ciento por ciento.

Para contrarrestar esta deficiencia los sistemas de alimentación están diseñados de manera que la mezcla contenga un 10 por ciento más de aire por gramo de gasolina. Esta proporción se denomina "mezcla económica" y se forma con 16 partes de aire por cada parte de combustible.

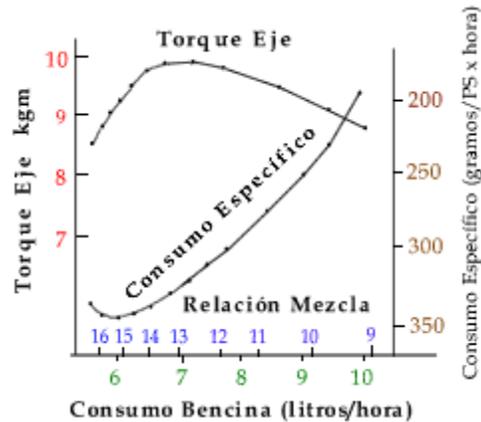
Relación de Máxima Potencia

Esta se obtiene con una mezcla que presenta 20% menos de aire que la proporción económica, es decir, 1 gramo de gasolina por cada 12,5 gramos de aire.

⁴² Ibid., p.60

Rendimiento de Motor

El desempeño de un motor varía de acuerdo a la relación de mezcla que utiliza. Si un motor funciona a velocidad constante y variamos la proporción de aire combustible que lo alimenta su potencia varía de acuerdo al gráfico siguiente:



A medida que se mejora el rendimiento volumétrico de un motor, mayor cantidad de mezcla alcanza los cilindros y por consiguiente su potencia aumenta. Otras mejoras se obtienen si se ajusta apropiadamente lo siguiente:

- Atomización de la gasolina.
- Uniformidad de alimentación a cada cilindro.
- Aumento de relación de compresión.
- Punto de encendido eléctrico.

Si el armado o los ajustes de un motor no son realizados correctamente su potencia máxima es imposible de conseguir y su consumo de combustible disminuye. Como resultado de la combustión de la gasolina se obtiene calor, dióxido de carbono y agua. Por cada litro de bencina que se quema el motor arroja a través de su sistema de escape 1 litro de agua.⁴³

2.1.6 Introducción sistemas de control

Los sistemas de control son parte integrante de la sociedad moderna y sus numerosas aplicaciones están alrededor de nosotros: en los cohetes que se disparan y en los transbordadores espaciales que se lanzan para ponerlos en órbita terrestre; en el agua de enfriamiento que salpica. Una parte metálica se maquina de manera automática; en el vehículo que se guía a sí mismo y que entrega material en estaciones de trabajo en una planta de ensamble aeroespacial,

⁴³ TodoMotores. Combustión Bencina. Mezclas para motor [En Línea]. Chile, Formato html, Disponible en Internet: http://www.todomotores.cl/competicion/mezcla_combustible.htm

conforme se desplaza por el piso buscando su destino. Éstos son sólo unos de los pocos ejemplos de sistemas controlados automáticamente que podemos crear.

No somos los únicos creadores de los Sistemas controlados automáticamente; estos sistemas también existen en la naturaleza. Dentro de nuestros propios cuerpos hay numerosos sistemas de control, como el páncreas, que regula la cantidad de azúcar en la sangre; en situaciones de “vida o muerte”. Nuestra adrenalina aumenta junto con nuestro ritmo cardiaco, llevando más oxígeno a nuestras células; nuestros ojos siguen un objeto en movimiento para mantenerlo a la vista; nuestras manos toman un objeto y lo colocan de manera precisa en un lugar determinado. Incluso, el mundo no físico parece estar regulado automáticamente.⁴⁴

Si quisiéramos incluir en un conjunto todos los sistemas existentes en el universo es claro que dada la generalidad del concepto de sistema este conjunto sea inmenso y el estudio de sus propiedades resultara inabordable. La teoría de sistemas trata de dividir este conjunto en subconjuntos o clases, abstraer las propiedades más destacadas del mayor número posible de miembros de cada clase y obtener resultados aplicables a todos sus miembros.⁴⁵

2.1.6.1 Historia

Los sistemas de control realimentados son más viejos que la humanidad. Se construyeron numerosos sistemas biológicos de control en los primeros seres vivos de nuestro planeta. Veamos ahora una breve historia de los sistemas de control.

- **Control de nivel de líquido:** Los griegos empezaron a construir sistemas realimentados hacia el año 300 a. de C. Un reloj de agua, inventado por Tesibio, funcionaba mediante un sistema donde goteaba agua en un recipiente a una razón constante.
- **Control de presión de vapor y temperatura:** La regulación de presión de vapor se inició hacia 1681 con el invento de una válvula de seguridad que construyó Denis Papin. El concepto se mejoró al aumentar el peso de la parte superior de la válvula. Si la presión ascendente en la caldera era mayor que el peso, se escapaba vapor y la presión se reducía; si la presión no era mayor que el peso, la válvula no se abría y la presión dentro de la caldera aumentaba.

⁴⁴NISE, Norman. Sistemas de control para Ingeniería. Ed. Patria cultural, tercera edición. 2002. p 4-9

⁴⁵GONZALES, Jose Mari. Regulación Automática I. Titulación Ingeniero técnico Industrial. Curso 2º. Especialidad Electronica. 2001. p.4

También en el siglo XVII, Cornelia Drebbel en Holanda inventó un Sistema de control de temperatura puramente mecánico para incubar huevos. El aparato estaba formado por un frasco de alcohol y mercurio con un flotador insertado en su interior.

- **Control de velocidad:** En 1745, Edmund Lee aplicó un control de velocidad a un molino de viento. Los vientos crecientes movían las paletas más hacia atrás, con lo que tenían menos área; cuando la velocidad del viento se reducía, había más área en las paletas.
- **Estabilidad, estabilización y dirección:** La teoría de los sistemas de control, como la conocemos hoy, empezó a cristalizar en la última mitad del siglo XIX. En 1868, James Clerk Maxwell publicó el criterio de estabilidad para un sistema de tercer orden basado en los coeficientes de la ecuación diferencial.
- **Desarrollos en el siglo XX:** No fue sino hasta principios del siglo XX que se construyó un mecanismo automático para dirigir barcos. En 1922, la compañía Sperry Gyroscope instaló un sistema automático de dirección que utilizaba los elementos de compensación y control adaptable para mejorar la operación. No obstante lo anterior, una buena parte de la teoría general que se emplea en la actualidad para mejorar la operación de sistemas automáticos de control se atribuye a Nicholas Minorsky, ruso nacido en 1885. Fue su desarrollo teórico aplicado a la dirección automática de barcos lo que llevó a lo que ahora llamamos proporcional más integral más derivado (PID. siglas en inglés de proporcional plus integral plus derivative).
- **Aplicaciones contemporáneas:** En la actualidad, los sistemas de control tienen uso general en la guía, navegación y control de proyectiles y naves espaciales, así como en aviones y barcos. Por ejemplo, los buques modernos emplean una combinación de componentes eléctricos, mecánicos e hidráulicos para crear comandos de timón en respuesta a comandos deseados de rumbo.
- Encontramos sistemas de control en toda la industria de control de procesos que regula niveles de líquidos en tanques, concentración de productos químicos en tinas y espesores de material fabricado. Por ejemplo, considere un sistema de control del espesor para una planta de acabados de placas de acero. El acero entra al tren de acabado y pasa por unos rodillos. En el tren de acabado, un haz de rayos X mide el espesor real y lo compara con el espesor deseado. Cualquier diferencia se ajusta por medio de un control de posición de tornillo que cambia la separación entre los cilindros por los que pasa el acero. Este cambio en la separación de los cilindros regula el espesor.

- Los perfeccionamientos modernos han visto el uso generalizado de la computadora digital como parte de los sistemas de control. Por ejemplo, las computadoras son parte de sistemas de control empleados en robots industriales, naves espaciales y la industria de control de procesos. Es difícil visualizar un moderno sistema de control que no utilice una computadora digital.⁴⁶

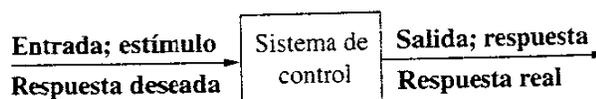
2.1.7 Definición de un sistema de control

Un sistema de control está formado por subsistemas y procesos (o plantas) unidos con el fin de controlar las salidas de los procesos. Por ejemplo, un humo produce calor como resultado del flujo de combustible. En este proceso, los subsistemas, llamados válvulas de combustible y actuadores de válvulas de combustible, se usan para regular la temperatura de una habitación al controlar la salida de calor del horno. Otros subsistemas, por ejemplo los termostatos que funcionan como sistemas detectores, miden la temperatura de la habitación. En su forma más sencilla, un sistema de control produce una salida o respuesta para una entrada o estímulo dado, como se ilustra en la Figura 2.23.

Construimos sistemas de control por cuatro razones básicas:

- Amplificación de potencia
- Control remoto
- Comodidad de forma de entrada
- Compensación por perturbaciones

Figura 2. 23. Descripción simplificada de un sistema de control.



Fuente: Introducción.⁴⁷

Los sistemas de control son dinámicos; responden a una entrada al experimentar una respuesta transitoria antes de llegar a una respuesta en estado estable que, por lo general, se asemeja a la entrada. Los tres objetivos principales del análisis y diseño de sistemas son: producir la respuesta transitoria deseada, reducir el error en estado estable y alcanzar la estabilidad.

⁴⁶ NISE. Op. cit., p. 4-9

⁴⁷NISE. Op. cit., p. 2

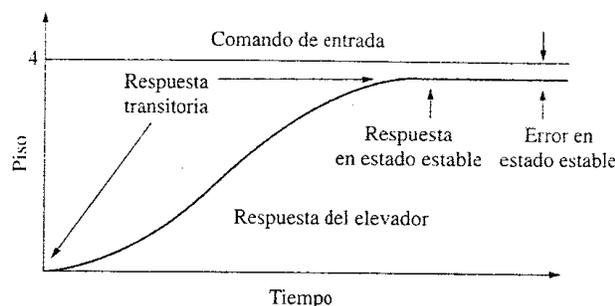
2.1.8 Características de un sistema de control⁴⁸

2.1.8.1 Entrada y salida

Como ya dijimos, un sistema de control produce una salida o respuesta para una entrada o estímulo dado. La entrada representa una respuesta deseada; la salida es la respuesta real.

Dos factores hacen que la salida sea diferente de la entrada. Primero, compárese el cambio instantáneo de la entrada contra el cambio gradual de la salida, como se muestra en la figura 2.24. Las entidades físicas no pueden cambiar su estado (por ejemplo, su erosión e velocidad) de manera instantánea. El estado cambia en una forma que esté relacionada con el dispositivo físico y con la manera en que adquiere o disipa energía.

Figura 2. 24. Entrada y salida de un sistema, relación.



Fuente: Entrada y Salida.⁴⁹

2.1.8.2 Tipos de sistemas

Sistemas en lazo abierto

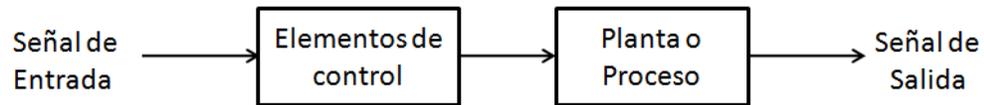
La característica distintiva de un sistema en lazo abierto es que no puede compensar ninguna perturbación que se suma a la señal de actuación del controlador. Por ejemplo, si el controlador es un amplificador electrónico y una perturbación es ruido, entonces cualquier medida del amplificador sumador en el primer punto suma también excitará el proceso, corrompiendo la salida con el efecto del ruido. La salida de un sistema en lazo abierto se ve corrompida no sólo por señales que se suman a las señales de comando, sino también por perturbaciones de la salida. El sistema tampoco puede corregir estas

⁴⁸ Ibid., p.10-13

⁴⁹ Ibid., p. 4-9

perturbaciones. Los sistemas en lazo abierto, entonces, no corrigen perturbaciones y simplemente se comandan por la entrada.

Figura 2. 25. Sistema en lazo abierto

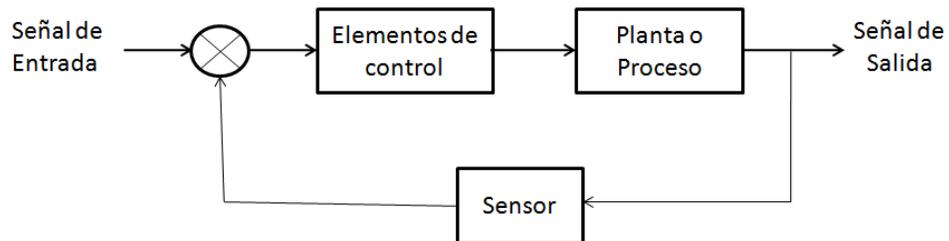


Sistemas en lazo cerrado <control realimentado>

Las desventajas de los sistemas en lazo abierto, por ejemplo La sensibilidad a perturbaciones e incapacidad para corregirlas, pueden ser superadas en los sistemas en lazo cerrado.

Los sistemas en lazo cerrado, entonces, tienen la obvia ventaja de una mayor precisión que los sistemas en lazo abierto, aun cuando son menos sensibles al ruido, a perturbaciones y a cambios en el entorno. La respuesta transitoria y error en estado estable se pueden controlar en forma más cómoda y con mayor flexibilidad en los sistemas en lazo cerrado, con frecuencia mediante un sencillo ajuste de la ganancia (amplificación) en el lazo, y a veces con un rediseño del controlador. Al rediseño se le llama compensación del Sistema y al hardware resultante, compensador. Por otra parte, los sistemas en lazo cerrado son más complejos y costosos que aquellos en lazo abierto.

Figura 2. 26. Sistema en lazo cerrado.



2.1.8.3 Parámetros y variables

En los modelos matemáticos las magnitudes que evolucionan en el tiempo se llaman variables del sistema o, a veces, señales. Estas variables son funciones de la variable independiente t , que representa el tiempo. Las magnitudes que no evolucionan (o cuya evolución no se tiene en cuenta) se llaman parámetros del sistema. En cada uno de los sistemas físicos que vamos a estudiar (mecánicos, eléctricos, térmicos, de fluidos, y mixtos) existe un conjunto de variables y parámetros que lo caracterizan.

Tabla 2. 1. Parámetros y variables.⁵⁰

Clase de Sistema	Variables	Parámetros
Sistemas Mecánicos (tras.)	f, x, v, a	m, k, b
Sistemas Mecánicos (rot.)	$T, \theta, \omega, \alpha$	m, k, b
Sistemas Eléctricos	v, i, ϕ	R, L, C
Sistemas Térmicos	θ, q	R_t, C_t
Sistemas de Fluidos	p, f	R_f, C_f

A pesar de las diferencias que existen entre las variables que caracterizan a las distintas clases de sistemas físicos, existen ciertas semejanzas fundamentales que pueden y deben ser aprovechadas de manera que la modelización resulte sencilla y a ser posible unificada para todos los sistemas.⁵¹

2.1.9 Elementos básicos de un sistema de control⁵²

Los sistemas de control se pueden realizar con diversas tecnologías (mecánica, neumática, electrónica, etc.) pero sus elementos esenciales, indicados a continuación, son siempre los mismos. Advertimos, no obstante, que la terminología puede ser algo engañosa en ciertos contextos, quizás por utilización inadecuada, por traducción defectuosa del inglés o por uso generalizado de algunos términos.

Entradas: son los terminales que tiene el sistema de control por los que puede recibir estímulos que influyen en su evolución. Pueden ser:

- Entradas de mando o de control: sirven para introducir órdenes.
- Entradas de referencias o consigna: son entradas de mando que imponen los valores deseados a sus correspondientes salidas.
- Entradas perturbadoras: son entradas que reciben estímulos indeseados.

Salidas: son los terminales que tiene el sistema de control para emitir la respuesta, es decir, para que la respuesta pueda ser observada por el hombre o medida por una máquina.

Planta: es el objeto que se desea controlar. Es un conjunto de componentes y piezas ensamblados entre sí y que cumplen una determinada función.

Proceso: es una serie de operaciones que se realizan sobre uno o varios objetos con un fin determinado.

⁵⁰GONZALES. Op. cit., p.7

⁵¹ Ibid., p.7

⁵² Ibid., p 9-10

Perturbaciones: Son alteraciones que se pueden producir en los componentes de una planta o proceso.

Controlador: Es un dispositivo que procesa la señal $\epsilon(t)$, es decir la diferencia entre la entrada de referencia $u(t)$ y la medida de la salida $y_m(t)$, y produce una señal de salida $v(t)$ adecuada para controlar la planta.

Actuador: Es el dispositivo que convierte la señal de salida del controlador $v_c(t)$ en otra señal $v(t)$, posiblemente de distinta naturaleza y generalmente de mayor potencia, y la aplica a la planta o proceso.

Captador: Es el dispositivo de medida. Convierte la señal de salida $y(t)$ en otra magnitud (generalmente eléctrica) $y_m(t)$, apta para ser restada del valor de la entrada $u(t)$.

2.1.10 Clasificación de los sistemas de control⁵³

2.1.10.1 *Relación causa efecto y sistemas causales*

Los estímulos aplicados a las entradas así como la respuesta emitida por las salidas del sistema son funciones de tiempo ya que se trata de un sistema dinámico. Los sistemas dinámicos se clasifican atendiendo a diferentes propiedades. Se dice que un sistema es causal si existe una relación de causalidad entre entradas y salidas tal que los estímulos aplicados a las entradas son la causa de la evolución dinámica del sistema y que la respuesta emitida por las salidas es su efecto. Puesto que el principio de causalidad establece que la causa es anterior al efecto, si un estímulo se aplica a la entrada en un instante determinado t_0 , la respuesta debida a tal estímulo debe ser posterior a ese instante t_0 .

Si un sistema no cumple la relación de causalidad que acabamos de expresar se denomina no causal. En función de la relación de causalidad los sistemas se clasifican en:

- Sistemas causales
- Sistemas no causales

Los sistemas físicos existentes en la Naturaleza son siempre causales. No obstante pueden existir componentes (teóricos) no causales formando parte de un sistema causal, dependiendo del tipo de modelización que se realice.

⁵³ Ibid., p12-15

2.1.10.2 *Numero de Variables*

Atendiendo al número de variables los sistemas se clasifican en:

- Sistemas monovariantes.
- Sistemas multivariantes.

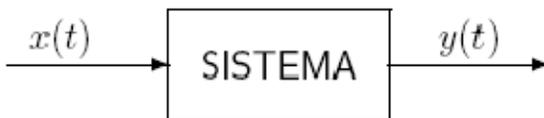
Un sistema se denomina monovariante cuando tiene una única variable de entrada y una única variable de salida. En los demás casos se llama multivariante.

2.1.10.3 *Linealidad*

Un sistema dinámico S puede verse como una aplicación

$$S: X \rightarrow Y$$
$$x(t) \mapsto y(t)$$

En donde X e Y son espacios de funciones, que hace corresponder a cada señal de entrada $x(t)$, una señal de salida $y(t)$.



Se dice que un sistema dinámico S es lineal si para cualesquiera $a \in \mathbb{R}$; $x_1(t)$; $x_2(t) \in X$ cumple las siguientes condiciones:

- $S(ax(t)) = aS(x(t))$.
- $S(x_1(t) + x_2(t)) = S(x_1(t)) + S(x_2(t))$.

La linealidad es una propiedad que caracteriza a una clase muy importante de sistemas. Según la tengan o no esta propiedad podemos clasificar los sistemas en:

- Sistemas lineales.
- Sistemas no lineales.

Si el sistema es multivariante, el modelo matemático es un sistema de ecuaciones diferenciales. Si el sistema es de parámetros concentrados la ecuación diferencial (o sistema) es de tipo ordinario, mientras que si los parámetros están distribuidos

es una ecuación en derivadas parciales. Si los parámetros del sistema son constantes (sistema estacionario) la ecuación diferencial es de coeficientes constantes.

2.1.10.4 Continuidad

Dependiendo de cómo sea o la evolución de sus variables en el tiempo los sistemas pueden clasificarse en:

- Sistemas de tiempo continuo.
- Sistemas de tiempo discreto.
- Sistemas de eventos discretos.

Los sistemas de tiempo continuo son aquellos en que las magnitudes son funciones continuas del variable tiempo, también continuas. En los sistemas de tiempo discreto las magnitudes sólo pueden tomar un número infinito de valores y son funciones de la variable discreta tiempo.

En los sistemas de eventos discretos existen variables cuya evolución temporal no sigue ni una ley continua ni tampoco discreta en el sentido habitual. Esto es, no existe un periodo que marque las transiciones de las variables sino que éstas (que frecuentemente suelen ser booleanas) evolucionan únicamente cuando en el sistema suceden ciertos sucesos o eventos con ellas relacionados.

2.1.10.5 Invariancia del tiempo

La propiedad de invariancia en el tiempo trata de expresar la constancia o permanencia temporal de los componentes del sistema. En función de esta propiedad los sistemas se clasifican en:

- Sistemas estacionarios.
- Sistemas no estacionarios.

Un sistema invariante en el tiempo o sistema estacionario es aquel cuyos parámetros no varían con el tiempo. La respuesta de un sistema estacionario es independiente del instante de tiempo en el que se aplique la entrada y los coeficientes de la ecuación diferencial que rige el funcionamiento del sistema son constantes.

Un sistema no estacionario o variante en el tiempo es el que tiene uno o más parámetros que varían con el tiempo. El instante de tiempo en que se aplica la entrada al sistema debe conocerse y los coeficientes de su ecuación diferencial dependen del tiempo.

2.1.10.6 *Predicción en el tiempo*

Según que la evolución del sistema pueda o no ser determinada con antelación, los sistemas pueden clasificarse en:

- Sistemas estocásticos.
- Sistemas deterministas.

Cuando se conocen exactamente las magnitudes que se aplican a las entradas y leyes que rigen la evolución del sistema, su comportamiento futuro es predecible. Un sistema se denomina determinista cuando, dentro de ciertos límites, su comportamiento futuro es predecible y repetible. De otro modo el sistema se denomina estocástico, por contener variables aleatorias.

2.1.10.7 *Localización de parámetros*

Los parámetros de un sistema están asociados generalmente a componentes, piezas o partes del sistema. Según cómo estén localizados los parámetros podemos clasificar los sistemas en:

- Sistemas de parámetros concentrados.
- Sistemas de parámetros distribuidos.

En los primeros los parámetros se suponen concentrados en puntos concretos del sistema mientras que en los segundos están distribuidos espacialmente.

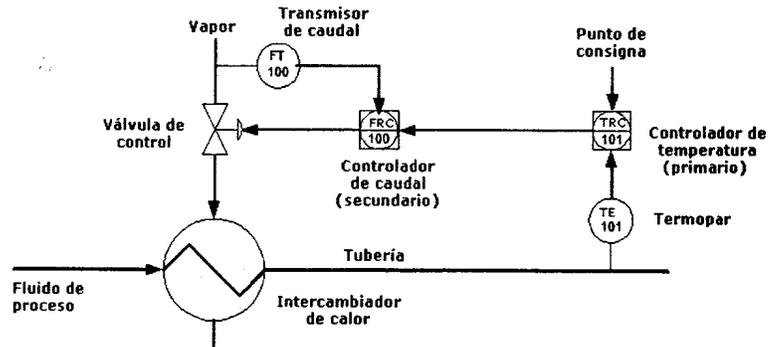
2.1.10.8 *Otros tipos de control*

Control en cascada⁵⁴

Cuando se producen perturbaciones en la carga que alteran la estabilidad de la variable controlada del proceso, es útil introducir un lazo de control adicional que compense dichas alteraciones. Idealmente, este segundo lazo de control debe eliminar inmediatamente estas perturbaciones antes de que entren dentro del proceso y lo descompensen.

⁵⁴ CREVS, Antonio. Simulación y control de procesos por ordenador. Colonia del Valle, México D.F. Ed. Alfaomega, Segunda Edición. 2007. p. 247

Figura 2. 27. Control en cascada.

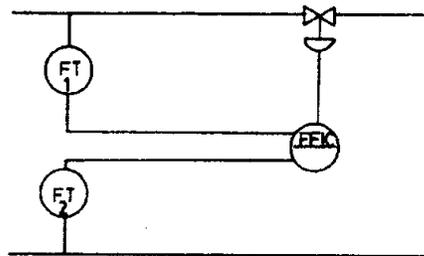


Fuente: Otros tipos de control.⁵⁵

Control de relación⁵⁶

El control de relación regula la relación entre dos variables, las que suelen ser dos caudales de fluidos. En la figura 2.28 puede verse un esquema de control de relación con su diagrama de flujo.

Figura 2. 28. Control de relación.



Fuente: Otros tipos de control.⁵⁷

Control de gama partida⁵⁸

El instrumento controlador actúa sobre dos o más válvulas de control en forma secuencial o solapada, gracias a que las válvulas efectúan una carrera completa con sólo una parte (de aquí el nombre de gama partida) de la señal de control de 3-15 psi, mediante resortes especiales o montando posicionadores adosados a las válvulas (figura 2.29).

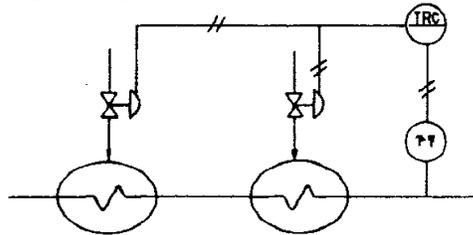
⁵⁵ Ibid., p. 247

⁵⁶ Ibid., p.255

⁵⁷ Ibid., p.255

⁵⁸ Ibid., p. 256

Figura 2. 29. Control de gama partida.



Fuente: Otros tipos de control

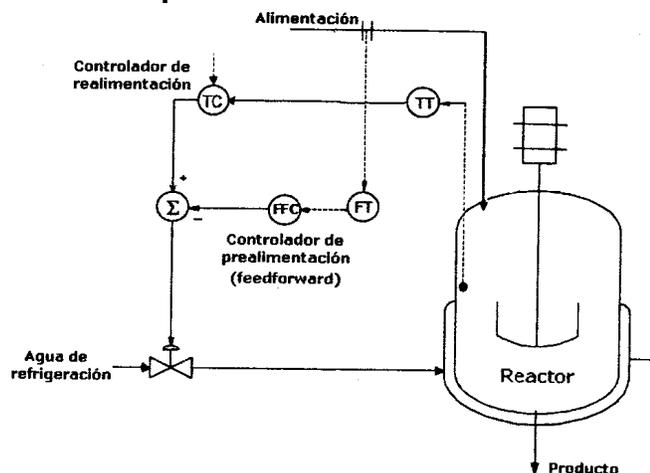
Control selectivo

Se emplea para limitar el valor de la variable de proceso. El instrumento es ajustable y puede ser selector de señal máxima o mínima. La simulación de este tipo de control equivale a la ejecución de la sentencia <IF ... THEN...> que transfiere la acción del ordenador a una u otra variable.

Control Anticipativo

El control anticipativo (feedforward), denominado también control de prealimentación y control en adelanto, al contrario que el control de realimentación, no espera a tener una señal de error para actuar sino que responde directamente a las perturbaciones en la variable o las variables de entrada sin permitir que su variación afecte a la variable controlada en la salida del proceso.

Figura 2. 30. Control Anticipativo.



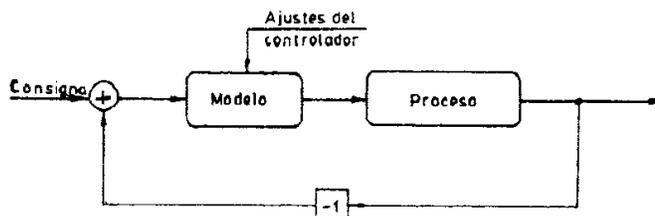
Fuente: Otros tipos de control.⁵⁹

⁵⁹ Ibid., p. 257

Control Adaptativo⁶⁰

El control adaptativo se basa en utilizar como controlador un modelo del proceso que adapta sus parámetros a los valores actuales medidos de las variables del proceso. De este modo, es el propio modelo que internamente informa al controlador, y es en él propio modelo donde pueden introducirse los ajustes de control deseados.

Figura 2. 31. Diagrama a bloques del control adaptativo.

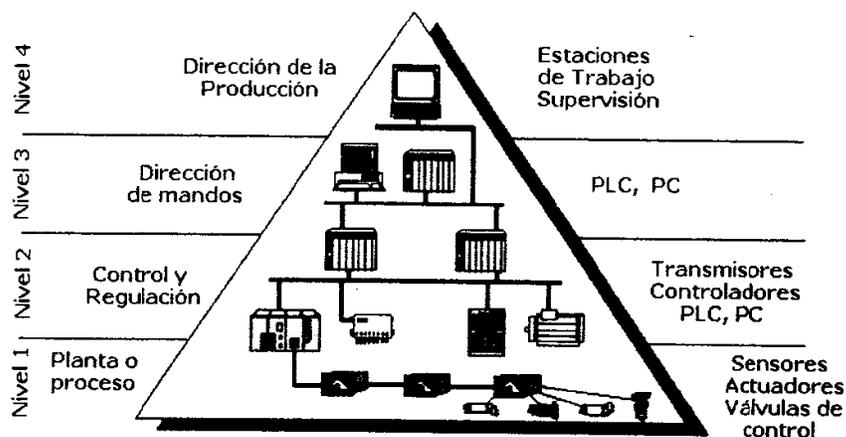


Fuente: Otros tipos de control.

Control distribuido⁶¹

Esta forma de control digital responde a una filosofía particular del control global de la planta. Su objeto es, por un lado, la distribución del control de las variables en varias unidades inteligentes de control y, por otro, que estas unidades estén distribuidas a lo largo de la planta, conectadas a un cable de tráfico de las señales.

Figura 2. 32. Esquema control distribuido.



Fuente: Otros tipos de control.⁶²

⁶⁰ Ibid., p. 265

⁶¹ Ibid., p. 266-267

⁶² Ibid., p267

2.1.11 Proceso de diseño⁶³

En esta sección establecemos una secuencia ordenada para el diseño de sistemas de control realimentado. La figura muestra el proceso descrito.

Figura 2. 33. Proceso de diseño de un sistema de control.

Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 4	Paso 5	Paso 6
Determinar un sistema físico y especificaciones a partir de requerimientos	Dibujar un diagrama de bloques funcional	Transformar el sistema físico en diagrama	Usar el diagrama para obtener un diagrama de bloques, diagrama de flujo de señal, o representación en el espacio de estados	Si hay bloques múltiples, reducir el diagrama de bloques a un solo bloque o sistema en lazo cerrado	Analizar, diseñar y probar para ver que se satisfagan los requisitos y las especificaciones

Fuente: Proceso de Diseño.⁶⁴

Paso 1. Transformar los requerimientos en un sistema físico

Comencemos por transformar los requerimientos en un sistema físico. Por ejemplo, en el sistema de control de posición acimutal de la antena, los requerimientos expresarían el deseo de colocar la antena en su posición desde un lugar remoto y describir características como el peso y dimensiones físicas. Con el uso de los requerimientos, se determinan las especificaciones de diseño como la respuesta transitoria deseada y la precisión en estado estable.

Paso 2. Trazar un diagrama de bloques funcional

El diseñador ahora traduce una descripción cualitativa del sistema en un diagrama de bloques funcional que describe los componentes del sistema (es decir, función o hardware) y muestra sus interconexiones. En este punto, el diseñador puede elaborar una distribución detallada del sistema.

Paso 3. Crear un diagrama esquemático

Una vez elaborada la descripción de un sistema, el diseñador puede empezar con la descripción física contenida y deducir un diagrama esquemático. El ingeniero debe hacer aproximaciones acerca del sistema y despreciar ciertos fenómenos, porque de otro modo el diagrama esquemático no se puede manejar y es difícil que obtenga un modelo matemático útil durante la siguiente fase de la secuencia de análisis y diseño.

⁶³ NISE. Op. cit., p.21-26

⁶⁴ Ibid., p.21

Las decisiones tomadas al crear el diagrama esquemático surgen del conocimiento del sistema físico, de las leyes físicas que gobiernan el comportamiento del sistema y de la experiencia práctica. Estas decisiones no son fáciles; a medida que el ingeniero adquiera más experiencia en el diseño, irá ganando el conocimiento necesario para esta difícil tarea.

Paso 4. Crear un modelo matemático (diagrama de bloques)

Una vez trazado el diagrama esquemático, el diseñador utiliza leyes físicas (por ejemplo, las leyes de Kirchhoff para redes eléctricas y la ley de Newton para sistemas mecánicos), junto con suposiciones de simplificación, para hacer un modelo matemático del sistema. Estas leyes son las siguientes:

- Ley de voltajes de Kirchhoff: La suma de voltajes DC alrededor de una trayectoria cerrada es igual a cero.
- Ley de corrientes de Kirchhoff: La suma de corrientes que fluyen desde un nodo es igual a cero.
- Leyes de Newton: La suma de fuerzas que actúan sobre un cuerpo es igual a cero; la suma de momentos sobre un cuerpo es cero.

Paso 5. Reducir el diagrama de bloques

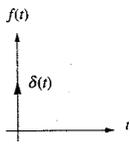
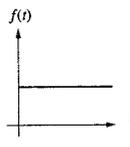
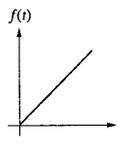
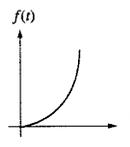
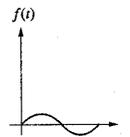
Los modelos de un subsistema están interconectados para formar diagramas de bloques de los sistemas más grandes, donde cada uno tiene una descripción matemática. También hay dos señales, la entrada angular y la salida angular, que son externas al sistema. Para evaluar la respuesta del sistema en este ejemplo, necesitamos reducir este gran diagrama de bloques a un solo bloque con una descripción matemática que represente su entrada hasta su salida. Una vez reducido el diagrama de bloques, estamos listos para analizar y diseñar el sistema.

Paso 6, Analizar y diseñar

En esta fase, el ingeniero analiza el sistema para ver si las especificaciones de respuesta y requerimientos de desempeño pueden ser satisfechos por simples ajustes de los parámetros del mismo. Si no se pueden satisfacer las especificaciones, el diseñador tendrá entonces que diseñar más hardware para tener el desempeño deseado.

Se utilizan señales de entrada, analíticamente y durante la prueba, para verificar el diseño. No es necesariamente práctico o ilustrativo escoger señales de entrada complicadas para analizar la operación de un sistema. Por lo tanto, el ingeniero suele seleccionar entradas de prueba estándar. Estas entradas son pulsos, escalones, rampas, parábolas y sinusoides.

Tabla 2. 2. Ondas de prueba empleadas en los sistemas de control.

Entrada	Función	Descripción	Dibujo	Uso
Impulso	$\delta(t)$	$\delta(t) = \infty$ para $0^- < t < 0^+$ $= 0$ en otras partes $\int_{0^-}^{0^+} \delta(t) dt = 1$		Respuesta transitoria Modelos
Escalón	$u(t)$	$u(t) = 1$ para $t > 0$ $= 0$ para $t < 0$		Respuesta transitoria Error en estado estable
Rampa	$tu(t)$	$tu(t) = t$ para $t \geq 0$ $= 0$ en otras partes		Error en estado estable
Parábola	$\frac{1}{2}t^2u(t)$	$\frac{1}{2}t^2u(t) = \frac{1}{2}t^2$ para $t \geq 0$ $= 0$ en otras partes		Error en estado estable
Senoide	$\sin \omega t$			Respuesta transitoria Modelos Error en estado estable

Fuente: Analizar y Diseñar.⁶⁵

Un impulso es infinito en t y cero en otros tiempos. El área bajo el impulso unitario es 1. Se emplea una aproximación de este tipo de onda para poner energía inicial en un sistema, de modo que la respuesta debido a esa energía inicial sea sólo la respuesta transitoria de un sistema. A partir de esta respuesta, el diseñador puede deducir un modelo matemático del sistema.

Una entrada de escalón representa una señal de comando constante; por ejemplo, posición, velocidad o aceleración. Por lo general, un comando de entrada de escalón es de la misma forma que la salida. El diseñador emplea entradas de escalón porque la respuesta transitoria y la respuesta en estado estable son claramente visibles y se pueden evaluar.

La entrada de rampa representa una señal de comando linealmente creciente. La respuesta a una señal de entrada de rampa produce más información acerca del error en estado estable. El análisis anterior se puede extender a entradas parabólicas, que también se usan para evaluar el error en estado estable de un sistema.

⁶⁵ Ibid., p.26

3 METODOLOGÍA

3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

Una vez analizado a fondo el proyecto, se observa que el enfoque más apropiado es empírico-analítico, ya que a través del trabajo investigativo en equipo se pretende dejar bases para la continuación de temas dentro del área tratada, así como el aporte de nuevas ideas a los sectores que les concierne el tema del proyecto.

3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE USB / SUB-LÍNEA DE LA FACULTAD / CAMPO TEMÁTICO DEL PROGRAMA

Dentro de los documentos relacionados en la universidad de San Buenaventura sobre investigación se ve que se plantean unos campos, sub-líneas y líneas que clasifican los proyectos.

Para el caso del proyecto propio a desarrollar se encuentra enmarcado en el campo de **control** dentro de la sub-línea de **instrumentación y control** y la línea de **tecnologías y sociedad**.

La sociedad se encuentra inmersa en unas características que hacen que sea muy importante el campo de control, toda la tecnología que es susceptible a ser desarrollada en nuestro país requiere control, como el campo del sector automotriz.

La instrumentación y control de procesos está presente en el quehacer cotidiano de los diferentes programas de la facultad de ingeniería como parte integral de su ejercicio de investigación, como lo pone de manifiesto la naturaleza de los proyectos que los núcleos temáticos de los programas definen.

La sociedad requiere de conocimientos técnicos y científicos de vanguardia que ayuden a la solución de problemas o faciliten los procesos de mejoramiento de la calidad de vida de las personas que pertenecen a un grupo social determinado. Por ello, se hace necesaria la actualización constante de los conocimientos tecnológicos en el área automotriz con el fin de poder efectuar las aplicaciones y adaptaciones requeridas en la solución de los problemas y en la satisfacción de las necesidades de la sociedad.

3.3 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Ya que el proyecto se presentara a través de un entorno simulado, fue necesario para la recopilación y análisis de datos el uso de programas simuladores como MATLAB.

Por parte del sector automotriz, se consiguió la información a través de personas expertas en el tema de inyección electrónica sobre el funcionamiento del sistema, características, partes principales, etc.

A fin de obtener información técnica fue necesario recurrir a revistas provenientes del mercado, universidades, institutos y organizaciones, que disponen de referencias para el correcto desarrollo del trabajo. También es importante resaltar que fue de gran utilidad la información suministrada por los fabricantes de productos automotrices como hojas técnicas y manuales.

Además de lo anterior, fue necesario realizar cursos relacionados con el tema, con el fin de lograr una orientación clara que permitiera una correcta evolución de la idea planteada.

3.4 POBLACIÓN Y MUESTRA

Las características más importantes que se requirieron a la hora de escoger y/o utilizar los medios de recolección de datos, fue proporcionada de forma clara y precisa de los temas que se desarrollan en el transcurso del proyecto, así como, las personas que trabajan dentro de las empresas, concesionarios, centros de investigación, y todos aquellos que tengan relación con los temas que se tratan en el marco del proyecto.

En cuanto al software de simulación es necesario que tengan versatilidad en analizar el comportamiento del diseño planteado para el proyecto, así como útil para la programación de algunos dispositivos que se vayan a implementar en el proceso.

3.5 HIPÓTESIS

¿Cuál es el control más adecuado para generar combustión en un motor a gasolina?

El control más adecuado para el problema planteado es por medio de un PID, el cuál se realizará a través de un software de simulación como MATLAB, proporcionando una manipulación de los inyectores dentro del motor según unos

parámetros definidos, tal como la mezcla de aire-combustible y el residuo producto de la combustión.

3.6 VARIABLES

3.6.1 Variables independientes

Cantidad de combustible

Cantidad de aire

3.6.2 Variables dependientes

La concentración de vapor de agua (H_2O) y dióxido de carbono (CO_2) en los gases de salida depende de la calidad de la combustión.

4 DESARROLLO INGENIERIL

4.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

A continuación se describe de manera general cómo está conformado el sistema de control de los inyectores. Posteriormente se explicará el proceso de diseño de cada uno de sus bloques por separado, seguido del análisis de las partes que conforman cada bloque como su funcionamiento, aplicación en el sistema, ventajas y desventajas.

Figura 4. 1. Diagrama a bloques general del sistema.

En la figura 4.1 se muestra el diagrama en bloques del sistema que se va a diseñar. La señal de referencia proporciona el valor ideal de la mezcla aire-combustible por medio de la cual se supone, el sistema debe funcionar con la mayor eficiencia posible. A continuación se encuentra un restador, este toma la señal medida por el sensor y la resta de la señal de referencia, el resultado de la operación será la señal de mando para el inyector.

Después está el controlador, este corregirá la señal proveniente de los inyectores para ser aplicada en la cámara del pistón y así generar la combustión en el sistema. A la salida de la cámara, se encuentra el sensor que medirá el estado de la planta una vez se realice la combustión, el dato medido será el que seguidamente se reste con la señal de referencia.

4.2 ANÁLISIS EN EL MOTOR

En Colombia existen varias marcas de automóviles, cada una ofrece un diseño, ventajas y aplicaciones distintas tales como confort, sistemas de luces inteligentes, entre otros. Por lo tanto se decidió tomar, a partir de un análisis, un sistema ideal con datos reales para el diseño del control.

Como primer paso es necesario fijar los parámetros del motor, y lo más importante, las condiciones que caracterizarán las cámaras de los pistones, lo cual después de todo, es el subsistema que se va a modelar y controlar.

Las características a las cuales se les hará el análisis son:

- Datos del motor de combustión interna
- Disposición de los cilindros

4.2.1 Datos del motor de combustión interna

Dado que la mayoría de automóviles que se usan en Colombia coinciden en ciertas características, es posible escoger a través de estadísticas reales, cuáles serán las del motor en el diseño a proponer.

Teniendo en cuenta que la propuesta debe ser lo más real posible, es necesario relacionarlo con datos que se presentan en el entorno más cercano. Entre los carros que más se compran y usan en Colombia se tienen los incluidos en la tabla 4.1.

Tabla 4. 1 Carros más comprados y usados en Colombia.

Los más vendidos	Unidades en uso	Motor
Chevrolet Aveo	27.468	1.5 de 83 HP, 1.6 de 103 HP
Chevrolet Spark	13.360	1.0 de 62 HP
Chevrolet Optra	8.327	1.6 y 1.8 de 122 HP
Renault logan	7.842	1.4 de 75 HP y 1.6 de 90 HP
Chevrolet Grand Vitara	6.569	1.6 de 94 HP, 2.0 y 2.7
Renault Twingo	5.700	1.1 de 75 HP
Renault Clio	4.753	1.6 de 110 HP
Mazda 3	4.280	1.6 de 110 HP y 2.0 de 145 HP
Mazda 2	4.226	1.5 de 103 HP
VW Jetta	3.340	1.8 de 180 HP y 2.0 de 115 HP

Fuente: Los 10 carros más vendidos en Colombia⁶⁶

⁶⁶ Los 10 carros más vendidos en Colombia. Autos cosmos. [En línea]. Formato HTML. Disponible en Internet: <http://www.co.autocosmos.com/noticias/18988/los-10-carros-mas-vendidos-en-colombia.aspx>

Los motores de combustión interna a gasolina por años son y siguen siendo de alto uso en nuestro país. Tomando los anteriores datos vemos que el motor que más se ajusta a nuestro diseño es el del Chevrolet Spark, puesto que cumple con las limitaciones propuestas en el capítulo número uno, motor de 1L de 62HP, y además, de ser uno de los más comprados y usados en el país. Podemos observar en la figura 4.2 la imagen física del motor de un Chevrolet spark.

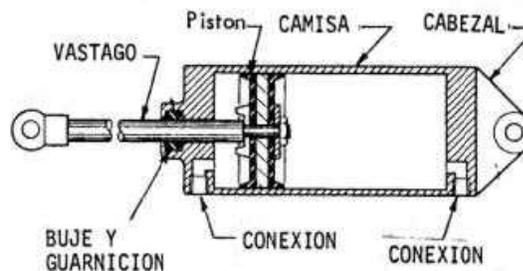
Figura 4. 2. Motor de combustión interna para Chevrolet Spark.



Fuente: Prueba Chevrolet Spark⁶⁷

Teniendo los caballos de fuerza del motor, se calculan las características físicas del pistón como su superficie, variables que intervienen en el proceso de cálculo de la función de transferencia de la planta.

Figura 4. 3. Imagen del pistón dentro de la camisa.



Fuente: Actuadores.⁶⁸

⁶⁷ Prueba Chevrolet Spark. Auto Noticias. [En línea]. Formato HTML Disponible en Internet: <http://autonoticiasuy.blogspot.com/2009/03/prueba-chevrolet-spark.html>

⁶⁸ Cilindros Hidráulicos y Neumáticos. Actuadores. Fundamentos de control automático. [En línea]. Formato HTML, Disponible en Internet: http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica_hidraulica22.htm

Con la fuerza del motor y la presión en la cámara para unas condiciones normales, es posible conocer la superficie del pistón:

Motor 60HP
 $2\text{bar} = 2\text{kg}/\text{cm}^2$
 $1\text{PS} = 0.9858\text{HP}$

$$60\text{HP} \times \frac{1\text{Ps}}{0.9858} = 60,8642\text{PS}$$

A partir de la ecuación de la fuerza para pistones en sistemas neumáticos, se despejará el área:

$$F(\text{Kg}) = P \left(\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \right) \times A(\text{cm}^2)$$

$$A = \frac{60,8642\text{PS}}{\frac{2\text{Kg}}{\text{cm}^2}}$$

$A = 30,4321\text{cm}^2$; Área del pistón

$r = 3,1124\text{cm}$; Radio del pistón

4.2.2 Disposición de los cilindros

Años de desarrollo permitieron llegar a lo que hoy en día conocemos como automóvil. Dentro de ello, uno de los grandes avances fue la disposición de los cilindros en los motores, buscando siempre como resultado un mejor rendimiento del motor.

A continuación, se mencionará las diferentes formas de ubicar los cilindros en un motor de gasolina, cada una con sus ventajas y desventajas. Basados en un análisis, se escogerá cual usar en el diseño.

Tabla 4. 2. Comparación diferentes tipos de distribución de pistones en los motores.

Distribución	Ventajas	Desventajas
En línea	Los cilindros se colocan en fila y paralelos entre sí a lo largo del cigüeñal.	Normalmente se usa en motores de hasta ocho cilindros.
En V	Los cilindros se agrupan en dos bancadas o filas de cilindros formando una letra V que convergen en el mismo cigüeñal. El aire de admisión es succionado por dentro de la V y los gases de escape expulsados por los laterales. L y R	Se usa en motores a partir de seis cilindros, sobre todo en automóviles de tracción delantera, ya que acorta la longitud del motor a la mitad.

Tabla 4.2. Continuación

Boxer	Tienen por lo general entre 4 y 6 cilindros. Tienen una altura menor y el centro de gravedad más bajo. Sus elementos al ser de menor longitud garantizan mayor estabilidad.	Se ha montado en toda la saga de motocicletas BMW tanto de tren, carretera, y deportivas La principal desventaja de los motores Boxer es su mayor costo de desarrollo y fabricación porque necesita mayor cantidad de piezas.
V de 180°	No usan un muñón largo como en el Boxer, sino que las bielas comparten la misma posición en el cigüeñal, haciendo que mientras un pistón se acerca al cigüeñal el otro se aleje. Tienen una altura menor y el centro de gravedad más bajo. Sus elementos al ser de menor longitud garantizan mayor estabilidad.	La V de 180° se usa en motores de más de 8 cilindros donde ha resultado más efectiva. Se han usado desde finales de los años treinta en miles de aeronaves pequeñas. Son motores que presentan una configuración de válvulas en la culata (OHV) y una relativa baja compresión
Cilindros opuestos	Dando prioridad a la continuidad de movimiento a través de todas las bancadas en caso de que un cilindro falle. Tienen una altura menor y el centro de gravedad más bajo. Sus elementos al ser de menor longitud garantizan mayor estabilidad.	Usado por lo general en motores de aviación, de generalmente 4 y 6 cilindros.

El caso que más se ajusta al diseño a proponer, son los motores con distribución de cilindros en línea, puesto que se acomodan más a las características del carro, del cual se tomaron las referencias del motor, como su estabilidad. Además de ser el más apto en caso de querer aumentar el número de pistones.

A pesar de que la distribución en V se adecua a las características del motor, no a las del diseño, puesto que su uso beneficia más a vehículos de alto cilindraje y caballos de fuerza. Además, ocupan menos espacio, útil en carros de alta gama como los de carreras y deportivos; vehículos que no se contemplan dentro del diseño.

Las otras disposiciones presentan ventajas para otros medios de transporte, como aviones y carros de carreras (fórmula 1), que no son útiles y aplicables al diseño propuesto.

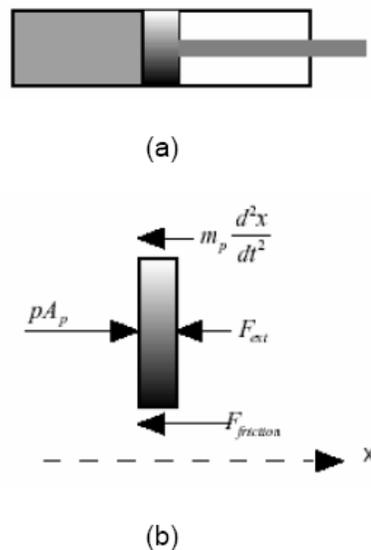
4.3 PLANTA O PROCESO

Para poder diseñar un sistema controlado, es necesario caracterizar y modelar la planta o sistema, la cual nos proporcionará los datos necesarios para así construir, a partir de la información recolectada, el controlador.

Como nuestro sistema se enfoca en controlar los inyectores, estos serían los actuadores de nuestro diseño y la planta o proceso es donde éstos trabajan, que para el caso a tratar es la cámara del pistón.

La figura 4.4 muestra el comportamiento dinámico del pistón. Al aplicar una fuerza F sobre la superficie del pistón, producto de la combustión en la cámara, esta se transmite a través del pistón logrando un desplazamiento traslacional, generando el movimiento en el cigüeñal, y por lo tanto, del motor.

Figura 4. 4. Diagrama de fuerzas de un pistón.



(a) Diagrama del pistón. (b) Fuerzas que actúan en el pistón

Fuente: Esquema mecánico y modelo circuital.⁶⁹

Este efecto se modela por medio de un muelle, cuya constante es K_p . La dinámica de la parte superior del cilindro se modela a través de amortiguadores de constante B , que se encargan de relacionar la fuerza contraria que se ejerce dentro del cilindro cuando se produce la combustión.

⁶⁹ GÓMEZ, Miguel y GÓMEZ, Miller. Modelamiento geométrico de un motor de combustión interna, simulación del ciclo dinámico y representación gráfica de la transferencia de calor del sistema biela, pistón, cigüeñal. Proyecto de Grado Universidad de La Salle. Facultad de ingeniería de diseño y automatización. 2006. p. 108

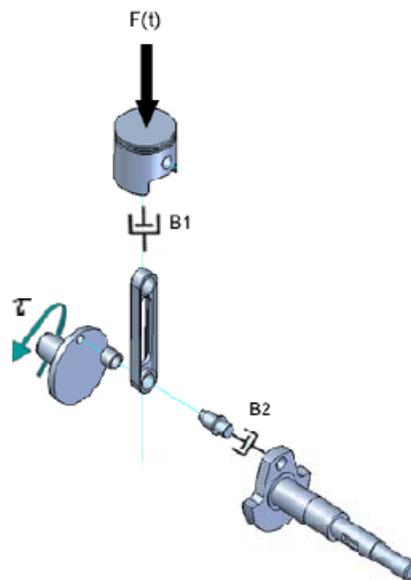
$$PA_p = F_{ext} + m_p \frac{d^2x}{dt} + F_{fricción}$$

$$PA_p = F(t)$$

De la ecuación anterior, se infiere que: m_p es la masa del pistón, P es la presión que se ejerce sobre la superficie del mismo, A_p su área y F la fuerza resultante de la combustión dentro de la cámara. Otra característica que debe tener en cuenta, es la fuerza proporcionada por el fluido que se le inyecta al pistón, F_{ext} . La fuerza de fricción es la resultante del rozamiento entre el pistón y la camisa.

La figura 4.5 muestra como es el sistema a modelar, desde su perspectiva mecánica, ahí mismo se relacionan las fuerzas, torques y constantes de amortiguamiento necesarias para el cálculo de la función de transferencia.

Figura 4. 5. Planta o sistema a modelar.



Fuente: Esquema mecánico y modelo circuital.⁷⁰

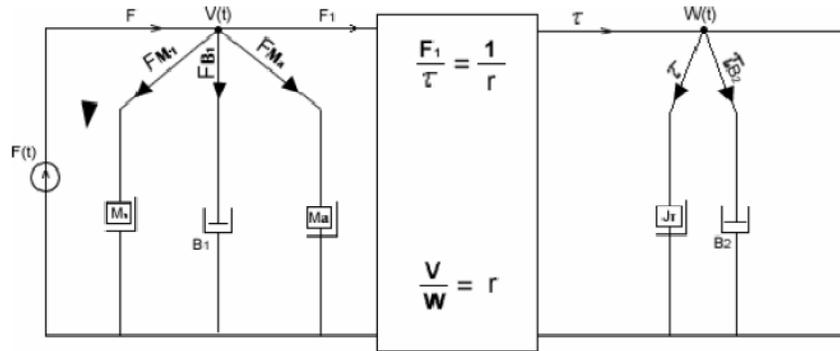
Las variables que se muestran en la figura 4.5 son:

- $F(t)$, Fuerza resultante de la combustión.
- B_1 , Constante de amortiguamiento del pistón.
- B_2 , Constante de amortiguamiento del cigüeñal.
- τ , Torque del cigüeñal.

⁷⁰ Ibid., p. 109

Para obtener el conjunto de ecuaciones algebro-diferenciales del sistema, se emplea una analogía entre los sistemas mecánicos de traslación y los sistemas eléctricos, cuya representación se observa en la figura 4.6, a partir de ese diagrama se consiguen las ecuaciones del sistema.

Figura 4. 6. Circuito equivalente mecánico.



Fuente: Esquema mecánico y modelo circuital.⁷¹

Respecto al circuito mecánico, se determinan las siguientes ecuaciones de cada nodo $V(t)$ y $W(t)$:

- Para el nodo 1:

$$F(t) = F_{B_1} + F_M + F_{B_2} + F_{B_3} + F_1$$

Donde, $F(t)$ es la sumatoria de las fuerzas traslacionales que actúan sobre el sistema, de ahí se empieza a calcular las ecuaciones algebro diferenciales, como la que se observa a continuación;

$$-F(t) + M_1 \frac{dV(t)}{dt} + B_1 V(t) + M_a \frac{dV(t)}{dt} + F_1 = 0$$

- Para el nodo 2:

$$\tau = \tau_{J_T} + \tau_{B_2}$$

Donde, τ es la sumatoria de las fuerzas rotacionales que actúan sobre el sistema, de ahí se empieza a calcular las ecuaciones algebro diferenciales, como la que se observa a continuación;

⁷¹ *Ibid.*, p. 110.

$$-\tau + J_T \frac{d\omega_1}{dt} + B_2\omega_1 = 0$$

$$V = \omega r$$

$$\tau = F1r$$

Por último se tiene que la función de transferencia del sistema para el nodo 1:

$$M_1 \frac{dV(t)}{dt} + B_1V(t) + M_a \frac{dV(t)}{dt} = F(t)$$

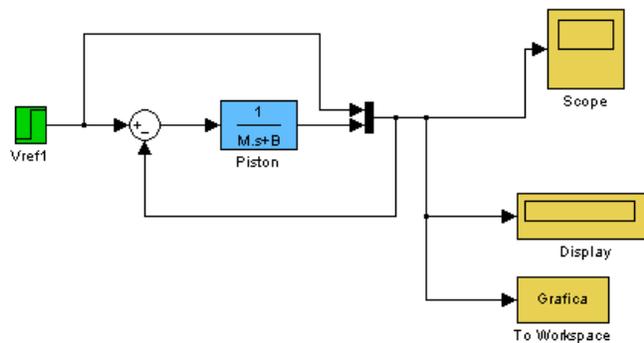
$$M_1S + B_1 + M_aS = F(s)$$

$$(M_1 + M_a)S + B_1 = F(s)$$

$$F(s) = \frac{1}{(M_1 + M_a)S + B_1}$$

A partir de la función de transferencia de la planta, se procede a simular el sistema mirando la respuesta respecto a la función paso, véase figura 4.7, de cual se obtendrán los valores respectivos para el tiempo de elevación (cuando la curva alcanza un 70% antes de su estabilización) y el tiempo de establecimiento (cuando la curva se estabiliza).

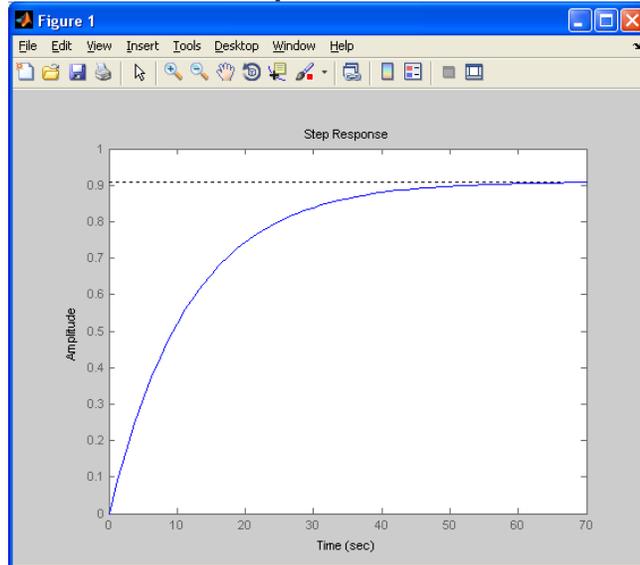
Figura 4. 7. Diagrama del modelo continuo en Simulink (MATLAB).



El diagrama de la figura 4.7 se compone del bloque correspondiente a la función paso (verde), seguido del bloque del pistón en su forma de ecuaciones de estado. A continuación, a la salida se hace una realimentación negativa, la cual será restada de la función paso. Por último están los bloques de visualización de datos como el osciloscopio y el display (amarillo).

La grafica de la figura 4.8 muestra el resultado de la simulación en simulink(véase figura 4.7).

Figura 4. 8. Respuesta a la función paso.



Por medio de la grafica de la figura 4.8, se obtuvieron los siguientes valores:

- Tiempo de elevación= 0.325s
- Tiempo de establecimiento=1.3s

Para el caso de que se desee realizar la función de transferencia de la planta en modo discreto, es decir, para un posterior diseño de controlador digital, es necesario tener la función de transferencia en modo S a modo Z.

Las constantes del sistema se relacionan en la tabla 4.3:

Tabla 4. 3. Valor constantes sistema.

CONSTANTE	VALOR
Área del pistón	30.38cm
Carrera de un pistón	4.5 cm
Masa de un pistón	$M_1=8.6625$
Fricción translacional-aluminio contra acero duro	$B=1.0990$
Masa de una biela	$M_a=4.2568$

Conocidas las constantes de la función de transferencia, es posible hacer el proceso de transformada S a Z. El sistema en su inicio tiene una función de la forma,

$$\frac{1}{(s + a)}$$

Primero se calcula el tiempo de muestreo T_s , a partir del modelo del sistema:

$$F(s) = \frac{1}{(12.9193s + 1.099)}$$

$$F(s) = \frac{1}{12.9193(s + \frac{1.099}{12.9193})}$$

$$T_s = \frac{1.099}{12.9193} = 0.085066528$$

A continuación, por medio de un sencillo algoritmo en MATLAB, se puede realizar el cálculo la función de transferencia con la transformada Z. Se utilizó la función *c2d* de MATLAB para discretizar la función junto con el tiempo de muestreo:

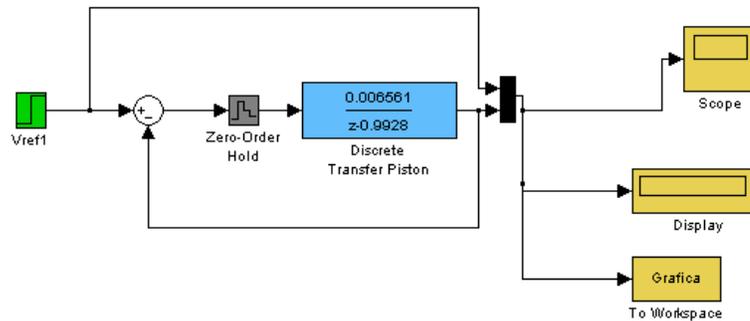
```
h = tf([1],[12.9193 1.099]);      %Escribir la función de Transferencia en modo S.
Ts=0.085066528;                 %Tiempo de muestreo.
sysd = c2d(h,Ts,zoh);            %zoh=Retenedor de orden cero. Conversor de
                                continuo a discreto.
```

El resultado del cálculo es la función de transferencia siguiente:

$$F(s) = \frac{0.006561}{z - 0.9928}$$

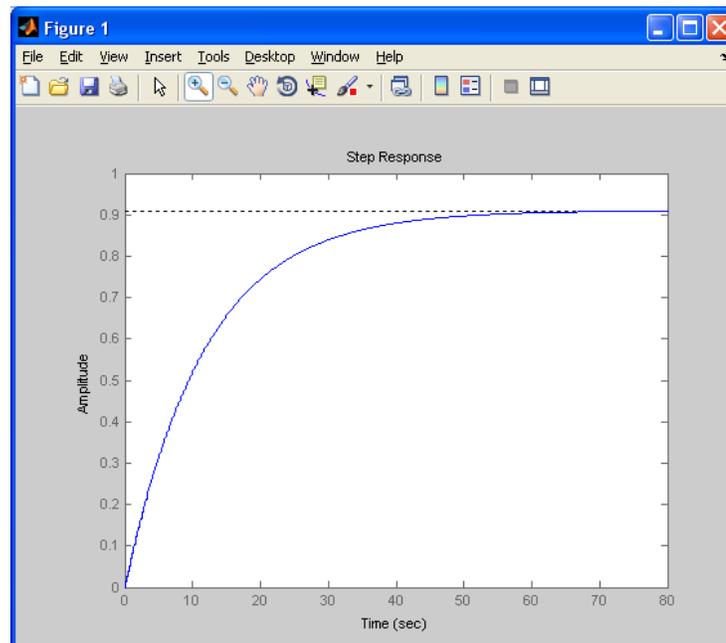
El diagrama de la figura 4.9 se compone del bloque correspondiente a la función paso (verde), un retenedor de orden cero (gris), el cual mantiene el valor del dato que ingresa constante mientras llegue uno nuevo, seguido del bloque del pistón en su forma discreta (azul). A continuación, a la salida se hace una realimentación negativa, la cual será restada de la función paso. Por último están los bloques de visualización de datos como el osciloscopio y el display (amarillo).

Figura 4. 9. Diagrama del modelo discreto en Simulink (MATLAB).



La grafica de la figura 4.10 muestra el resultado de la simulación anterior:

Figura 4. 10. Respuesta a la función paso en modo discreto.



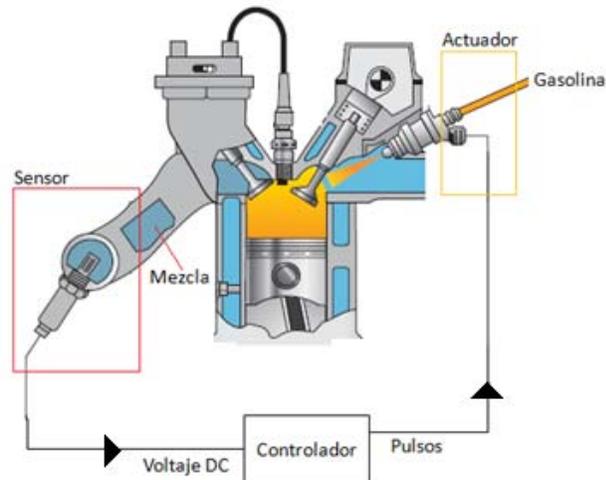
En ambas condiciones la función de la planta, tanto en modo continuo como discreto, muestran un resultado semejante a la respuesta de la función paso, esto no sólo corrobora que el proceso de discretizar la planta esta correcto, sino que la función en modo Z es apta para el cálculo de cualquier controlador digital.

4.4 SENSOR

Como las variables, tanto independientes como dependientes, deben estar relacionadas de alguna forma dentro de la planta o proceso, el único elemento en un sistema de inyección que proporciona esa condición es la sonda lambda.

La sonda Lambda se encarga de la regulación correcta del suministro de aire y combustible al motor. Detecta de forma continuada el contenido residual de oxígeno en el gas de escape dando como resultado una señal de voltaje, la cual regulará de nuevo la mezcla, en caso de que haya mayor emisión de contaminantes.

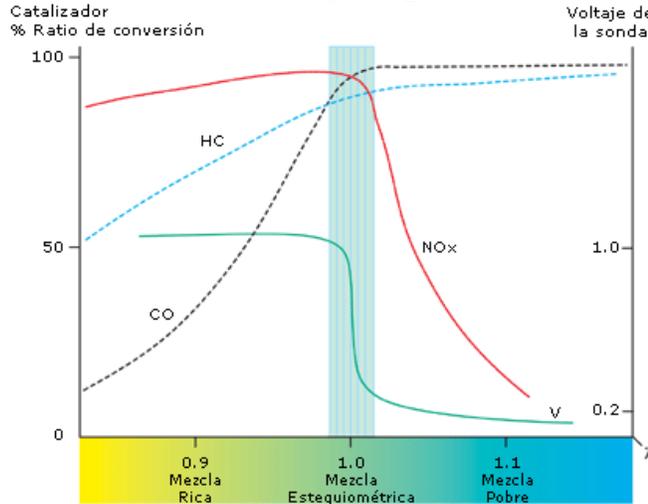
Figura 4. 11. Posición del sensor y la señal DC que arroja.



La figura 4.11 contempla el sensor dentro del sistema que se quiere diseñar junto a los bloques con los que interactúa como el inyector (actuador). El sensor mide la cantidad de gases en la salida de la cámara, los compara con el aire del medio ambiente, y da como resultado, un voltaje que representa la concentración de gases contaminantes producto de la combustión que se debe corregir.

En la figura 4.12, se muestra una gráfica donde se compara la concentración de gases a la salida de la cámara respecto a la mezcla estequiométrica de aire-combustible que ingresa a la misma antes de la combustión.

Figura 4. 12. Comportamiento del voltaje según la concentración.



Fuente: NGK. La Sonda Lambda.⁷²

A partir de la grafica de la figura 4.12, se puede conocer como es la transducción de concentración de la mezcla (λ) a voltaje (mV). Los valores se relacionan a continuación en la tabla 4.4:

Tabla 4. 4. Concentración VS Voltaje.

Concentración λ	Voltaje (mV)
0.6	900
0.7	880
0.8	860
0.9	840
1.0	100
1.1	80
1.2	60
1.3	40

4.5 ACTUADOR (INYECTOR)

El actuador del sistema es el que a partir de la información procesada por el controlador, corrige el error en la planta. Como el diseño está propuesto para cuatro actuadores, según las limitaciones del numeral 1.5, se realizará la explicación del funcionamiento sólo para uno, ya que para el resto de inyectores aplican las mismas características.

⁷² NGK. La sonda Lambda. España. [En Línea]. Disponible en Internet: http://www.ngk.es/Sondas_Lambda.1063.0.html

Antes de hablar del inyector, es necesario hacer un análisis previo para saber qué tipo de inyección se va a utilizar, dado que ésta nos dará información necesaria para la simulación completa del sistema.

4.5.1 Tipo de inyección

En el estudio teórico de los tipos de inyección, existen cuatro grandes grupos para clasificarlos, donde cada uno ofrece diferentes ventajas y mejoras respecto al rendimiento del motor y uso de la gasolina. La tabla 4.5 mostrará el análisis para cada tipo, y cual de cada grupo se escogió.

Tabla 4. 5. Comparación tipos de inyección.

Grupo	Tipo	Características	Ventajas	Desventajas
Por numero de inyectores	Monopunto	Se utiliza un solo inyector para todo el bloque. Está ubicado donde antes lo era el carburador	Sólo se controla un pistón. Es usada en vehículos de bajo cilindraje.	No usa riel para la distribución uniforme de la presión. Desigualdad en el llenado de combustible.
	Multipunto	Se utiliza un inyector para cada cámara de combustión.	Se usa un riel que regula la presión de la gasolina antes de ingresar a la cámara de combustión. Usada en motores de mayor cilindraje.	El inyector está expuesto a condiciones de altas temperaturas y presiones
Por ubicación de los inyectores	Directa	El combustible se introduce directamente en la cámara de combustión formada por la culata y la cabeza del pistón	Intervalos de alimentación precisamente definidos. La fuerza de explosión es notablemente mejor.	Exposición a turbulencias debidas a los gases. Materiales más resistentes en los inyectores.
	Indirecta	Los inyectores están situados en el colector de admisión.	La mezcla de aire-combustible es más completa y precisa.	Si la relación estequiometrica aire-combustible no es perfecta, no hay perfecta explosión
Por sincronismo	Simultanea	Inyecta combustible simultáneamente en todos los inyectores a cierta frecuencia	El combustible se almacena en el colector en caso de que la válvula no está abierta.	La ubicación de los inyectores sólo debe ser indirecta.
	Semi-secuencial	Los inyectores abren y cierran de dos en dos.	Abre solo dos inyectores por cada vuelta del cigüeñal	-

	Secuencial	Inyección en el momento de apertura la válvula de admisión.	Mayor sincronismo en el proceso	El orden se sincroniza con el encendido del motor.
Accionamiento de los inyectores	Mecánica	Control y accionamiento mecánico de los inyectores	-	Accionamiento mecánico
	Mecánica electrónica	Control electrónico de accionamiento mecánico de los inyectores	El control es electrónico, por medio de la ECU.	Accionamiento mecánico
	Electrónica	Control y accionamiento electrónico de los inyectores	Control electrónico total.	-

Una vez conocidas las ventajas de cada tipo de inyección, se tomó la decisión de reunir el conjunto de cada clase y escoger el que más se ajusta al diseño a realizar.

El tipo de inyección que se manejará es:

- Multipunto: hay un inyector por cada cámara. Además, hay riel o galería de inyectores que permite mejor regulación de combustible.
- Indirecta: hay mayor precisión en la mezcla; condición necesaria a la hora de calcular los controladores del sistema.
- Simultanea: es la única que sólo funciona con la posición indirecta del inyector, además, el combustible que no se use se mantiene con la válvula de admisión cerrada, a pesar de que no esté en tiempo de expansión.
- Electrónica: Los sistemas actuales han migrado a ser totalmente electrónicos, debido que ofrece un mejor rendimiento y control.

4.5.2 Inyectores

Para poder caracterizar o modelar, es necesario conocer perfectamente que partes intervienen en el proceso. Una de estas partes es el inyector, el cual proporciona la cantidad de combustible necesaria, de acuerdo a la relación estequiométrica, para generar combustión dentro de la cámara del pistón. La tabla 4.6 contiene la información de clasificación de los diferentes tipos de inyectores.

Tabla 4. 6. Comparación entre los tipos de inyectores.⁷³

Inyector		Ventajas	Desventajas
Clasificación por impedancia	Baja impedancia	Tiempo de accionamiento más corto. Con ellos se consigue un mejor ralenti debido a su velocidad de respuesta.	Mayor calor en los transistores de potencia. Mayores potencias.
	Alta impedancia	Se genera menos calor en los transistores de potencia que los comandan y la no necesidad de utilizar ningún resistor externo para limitar la corriente que circula por ellos.	-
Clasificación por forma de pulverizar	Tipo perno	Energiza la bobina del inyector, se retira la aguja permitiendo que el combustible pulverice.	-
	Tipo disco	Substituye el perno por un disco plano y una placa con pequeñas perforaciones.	Son más propensos a que se tapen los agujeros por depósitos.
	Tipo bolilla	Utilizan una bolilla y un alojamiento hembra como válvula y pulverizador. Éstos tienen una atomización excelente y un cono de pulverización ancho	Son propensos a taparse con depósitos del barniz provenientes de la nafta.
Clasificación por conector eléctrico	Interno	El enchufe se inserta internamente en el inyector	-
	Externo	Se usa en la mayoría de sistemas	Necesita un sello impermeable

Una vez conocidas las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de inyector, se tomó la decisión de escoger de cada clase, el que más se ajusta al diseño a realizar.

El inyector que se manejará es:

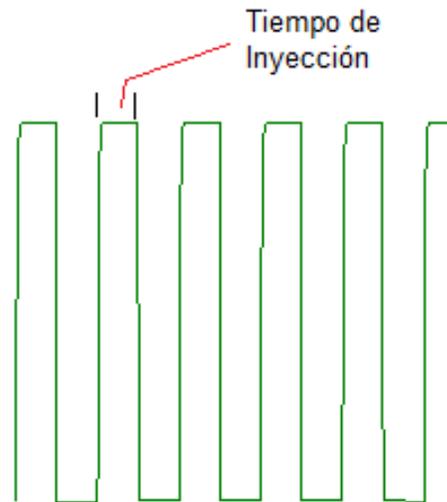
- Alta impedancia: debido a que es menos sensible al calor.
- Pulverización perno: No tienden a taparse los agujeros con el barniz.
- Conector externo: Por ser el más comercial y usado.

4.5.3 Simulación del inyector

Como la señal que activa el inyector es de tecnología TTL, la apertura/cierre depende del tiempo en cada pulso (véase figura 4.13), entonces para poder aplicarlo al diseño es necesario simular el inyector mediante un PWM, donde el ancho del pulso varía de acuerdo con el voltaje DC que el sensor entrega.

⁷³ Test engine Argentina. Diferentes tipos de inyectores. [En línea]. Formato html. Dponible en Internet: <http://testengineargentina.blogspot.com/2007/04/inyectores-diferentes-tipos.html>

Figura 4. 13. Tiempo de inyección pistón.



En la figura 4.14 se pueden apreciar los bloques utilizados en Simulink para simular el inyector. El valor de la señal de saturación va a depender de la resta entre la señal de referencia y el valor medido por el sensor, a continuación la función rampa y señal de saturación se suman. El resultado de la suma se compara mediante un comparador de ventana. El resultado de todo el proceso anterior es el PWM.

Figura 4. 14. Generador de PWM.

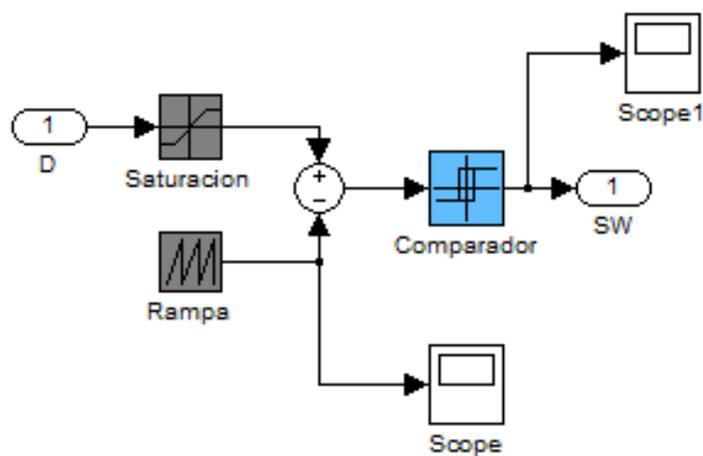
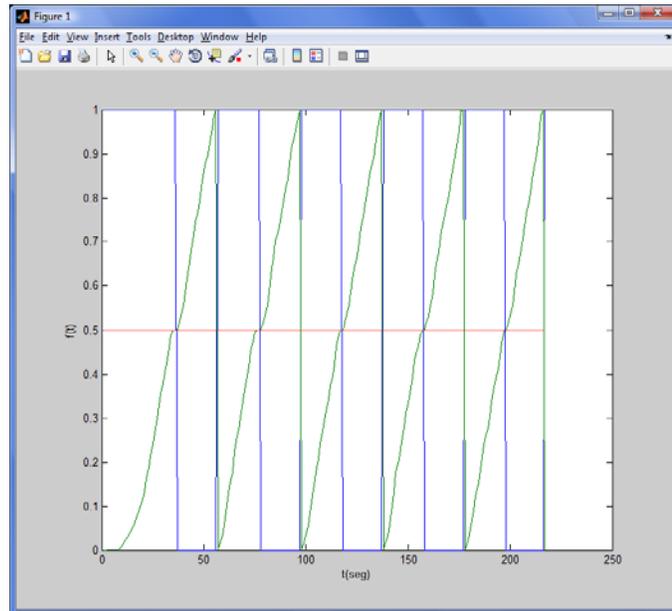


Figura 4. 15. PWM, función rampa y voltaje DC.



En la figura 4.15, se puede observar las tres señales usadas para la generación de PWM en el simulador; la señal verde representa la función rampa, la señal roja representa el voltaje DC que recibe y la azul el PWM resultante.

4.6 DISEÑO DEL CONTROLADOR

Existen muchísimos tipos de control, ya sea en su forma básica de utilización y diseño o combinación de los diferentes tipos, por ejemplo, lógica fuzzy con PID. Por tal motivo para diseño del mismo se tomaran los más relevantes y usados, los cuales son:

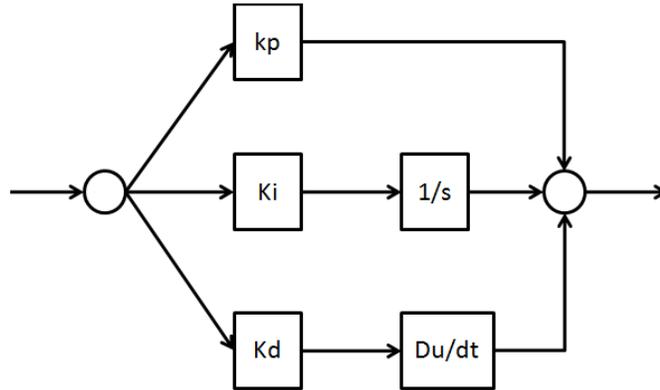
- Control Continuo
- Control Discreto
- Logica Fuzzy

De cada uno de los anteriores grupos se escogerá el que cumpla con los criterios de estabilidad y mejore el rendimiento de la planta. Es necesario hacer la salvedad de que es necesario hacer un diseño para cada uno, ver los resultados y justificar cual diseño es el mejor.

4.6.1 Controlador PID

En cuanto a los controladores continuos el más usado y práctico de calcular es el controlador PID, siendo éste la combinación de tres tipos pequeños de controladores; proporcional, integral y derivativo.

Figura 4. 16. Diagrama a bloques de un PID.



Para el diseño del controlador es necesario calcular las constantes, que se ilustran en la figura 4.16, concernientes a la parte proporcional (K_p), integral (K_i) y derivativa (K_d). Luego se toman las 3 expresiones y se combinan para dar resultado al controlador PID.

$$G_c(s) = K_p E(s) + K_p * \frac{E(s)}{K_i s} + K_p * K_d * s * E(s)$$

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{K_i s} + K_d * s \right) E(s)$$

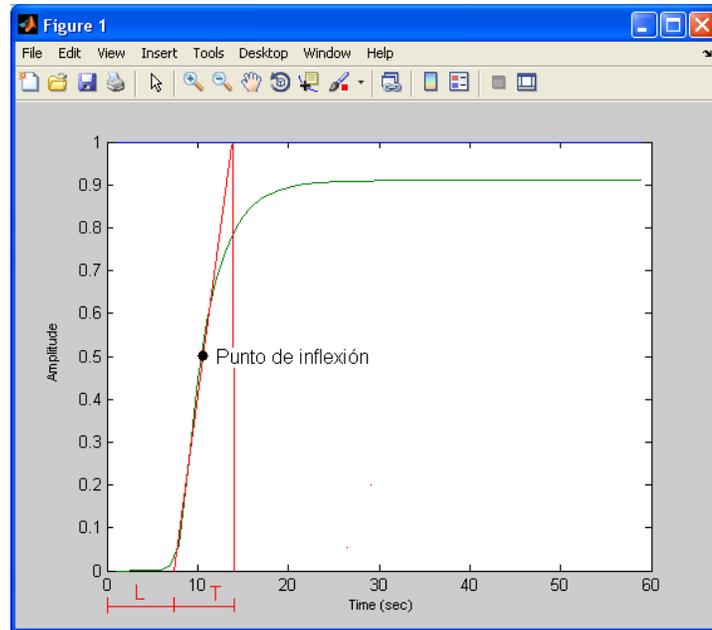
Con las constantes K_p, K_i , y K_d calculadas, se corrige el error y se ajustan según él controlador que se va a diseñar. $G_c(s)$ representa la función del controlador en modo S.

A partir del método de Ziegler-Nichols que nos permite sincronizar las constantes de un sistema en lazo abierto, de acuerdo a una función de salida que se necesite, el proceso de desarrollo del método se describe a continuación.

En primer lugar es necesario ajustar las ganancias integral y derivativa a cero, es decir $K_i = 0$ y $K_d = 0$. Luego, se supone un valor de 1 a la ganancia del proporcional, K_p .

Basado en las anteriores condiciones, se aplica una función escalón a la entrada de la planta, obteniéndose el resultado de la figura:

Figura 4. 17. Respuesta recomendada según el método Ziegler-Nichols.



Con los valores de L y T tomados de la grafica anterior, se mira en la tabla 4.7 para calcular constantes que, según el método de Ziegler-Nichols, se calcula los parámetros para el controlador PID:

Tabla 4. 7. Valores para calcular las constantes restantes.

Tipo de Controlador	K_p	T_i	T_D
P	T/L	∞	0
P + I	0,9. T/L	L/0,3	0
P + I +D	1,2. T/L	2L	0,5L

Como base en la Tabla 4.8, se tiene que las constantes del controlador PID son:

$$K_p = 1$$

$$K_i = 0.08$$

$$K_d = 0.1$$

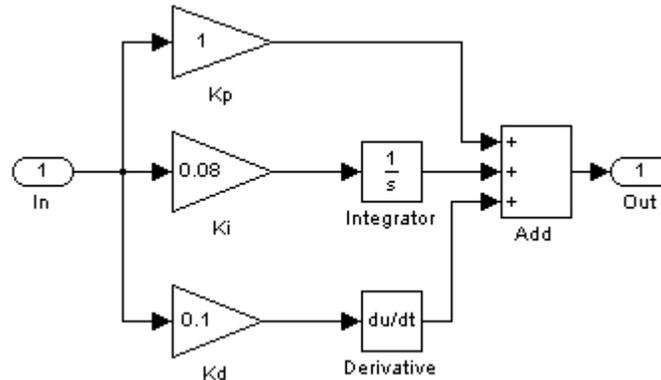
Por concierne la función de transferencia del controlador es

$$G_c = K_p \left(1 + \frac{6}{K_i s} + K_D s \right)$$

$$G_c = 1 * \left(1 + \frac{1}{0.08s} + 0.1s \right)$$

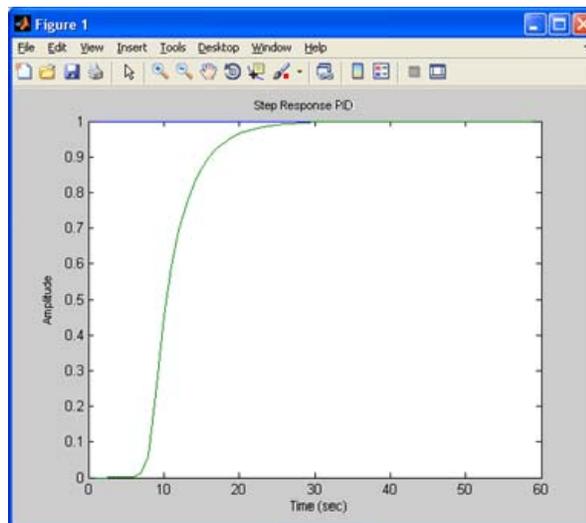
Una vez obtenidas las constantes, a través de simulink, se probó el sistema junto con el controlador, como se observa en la figura 4.18, y así conocer si éste es o no estable.

Figura 4. 18. Controlador PID diseñado.



Para evaluar la estabilidad de la función G_c , se observa la respuesta del controlador ante varios criterios, entre los que se tiene; respuesta a la función paso, lugar geométrico de las raíces y diagramas de Bode.

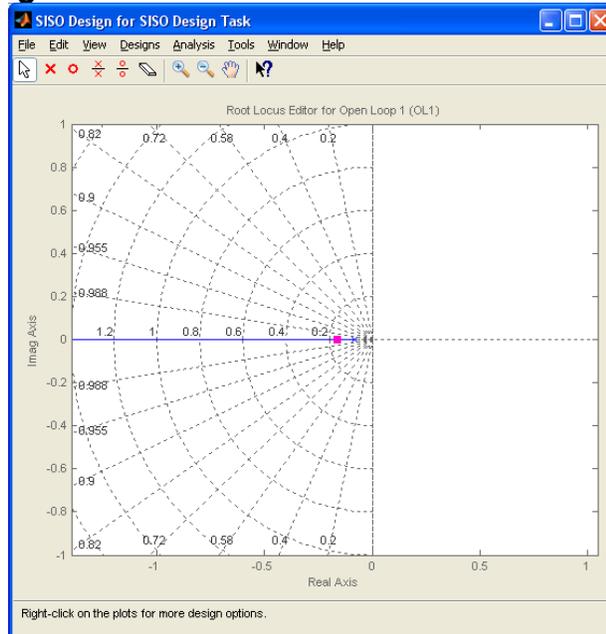
Figura 4. 19. Respuesta a la función paso controlador PID.



Dado que es un controlador PID, la salida a la función paso se presenta de la forma de un sistema de primer orden, donde el error se corrige en un tiempo determinado y se hace cero cuando la curva se estabiliza, véase grafica de la figura 4.19.

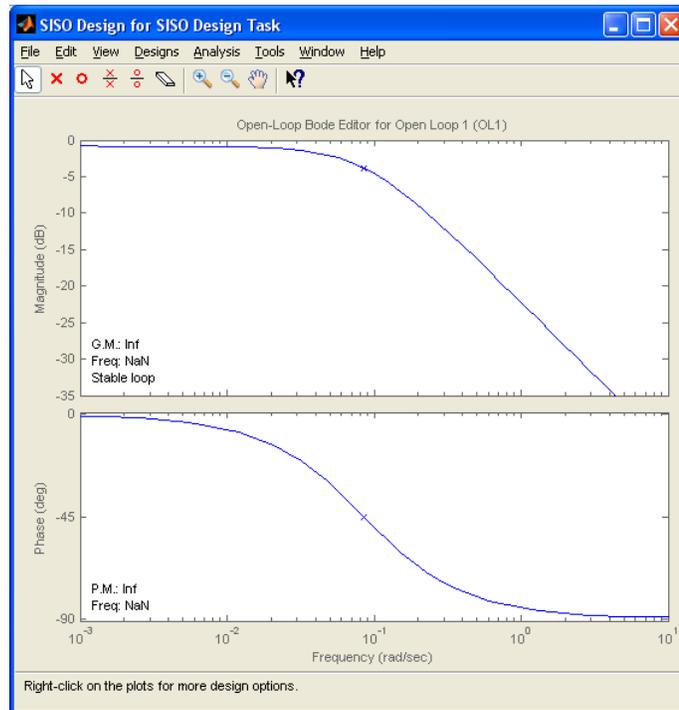
Por medio de la grafica de Root-locus, figura 4.20, es posible conocer el lugar geométrico de las raíces, la cual se muestra la posición de los polos y ceros de la función de transferencia del controlador.

Figura 4. 20. Lugar geométrico de las raíces.



Se puede ver que la salida de la grafica de la figura 4.20 cumple con las condiciones de estabilidad, es decir, si las raíces están a la izquierda en el plano real y no hay cruce con el plano imaginario. En caso de haber algún cruce con en el plano imaginario y real positivo, es índice de inestabilidad.

Figura 4. 21. Diagramas de Bode.



Los diagramas de bode de la figura 4.21, dan una apreciación desde el punto de vista de la respuesta en frecuencia. Observando las gráficas, se tiene que la magnitud esta -120dB lejos de la posibilidad de llegar a inestabilidad, además, en el caso de la fase, la raíz del sistema no tiene cruce con -180° , dado que se tuviera el sistema sería inestable.

4.6.2 Control Discreto

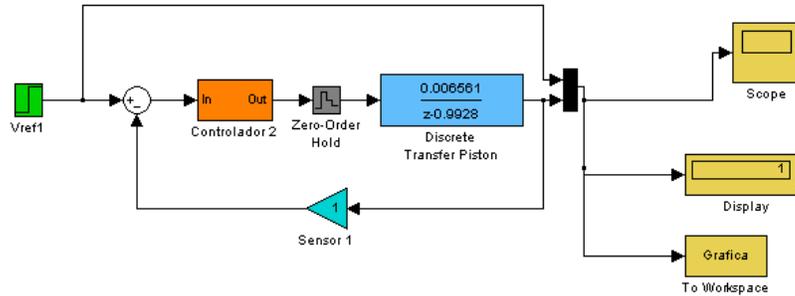
Una forma de realizar un controlador discreto, teniéndolo ya calculado de forma continua, es tomando el controlador continuo y discretizando su salida, para después ser aplicado a una función de la planta o proceso en forma de transformada Z.

Como el diseño que se hizo para un controlador continuo fue un PID, será ése mismo al que se le aplique la discretización. En el diagrama a bloques de la figura 4.22, muestra como se probó en Simulink el controlador junto con la planta.

El diagrama de bloques se compone del bloque correspondiente a la función paso (verde), seguido del bloque del controlador (fucsia), el cual está compuesto por un diseño similar al de la figura 4.18. Después, se encuentra un retenedor de orden cero (gris), el cual mantiene el valor del dato que ingresa constante mientras llegue uno nuevo.

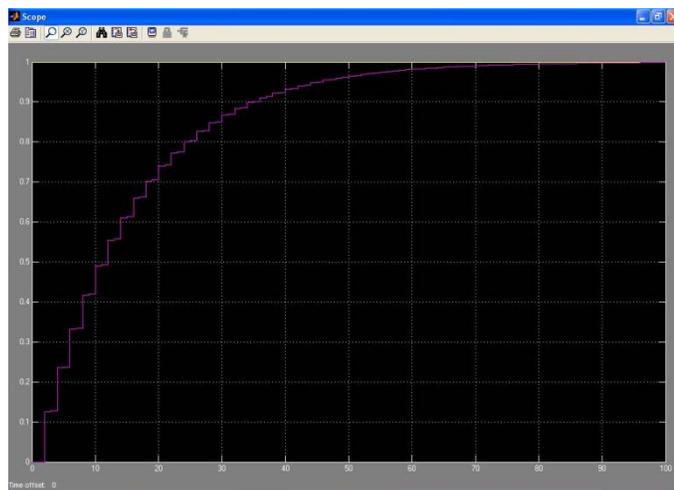
A continuación, se tiene bloque del pistón en su forma discreta (azul). A la salida se hace una realimentación negativa del sensor, la cual será restada de la función paso. Por último están los bloques de visualización de datos como el osciloscopio y el display (amarillo).

Figura 4. 22. Diagrama del controlador en el sistema.



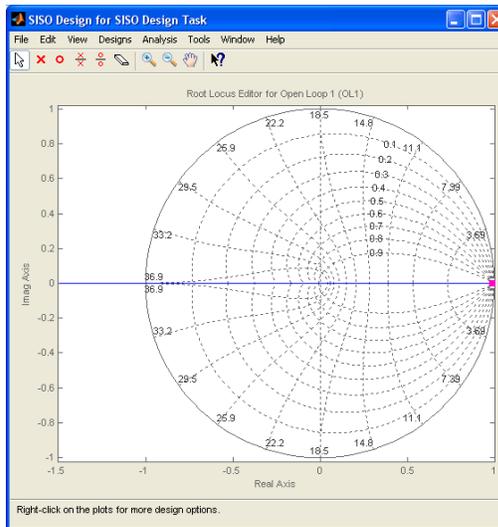
La figura 4.23 muestra el resultado para la función paso

Figura 4. 23. Respuesta a la función paso.



Para el sistema discreto, la respuesta en el tiempo, es decir, las gráficas de la respuesta a la función son similares a las obtenidas en el sistema continuo. Esto nos da como resultado que para el análisis en el tiempo, que el sistema está estable por el momento.

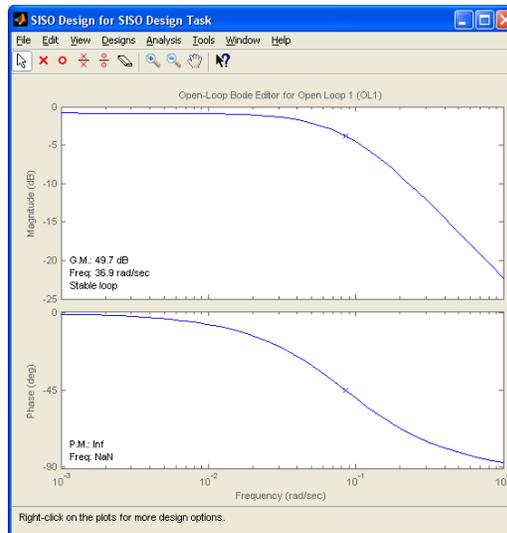
Figura 4. 24. Lugar geométrico de las raíces.



Sin embargo para el análisis con root locus, véase figura 4.24, se ve que hay una raíz en el borde del círculo de radio unitario, criterio para cuando es transformada Z. Lo que nos da a entender que el sistema es críticamente inestable.

Con la grafica de la figura 4.25, se nota aún más la condición de inestabilidad del sistema.

Figura 4. 25. Diagramas de bode.



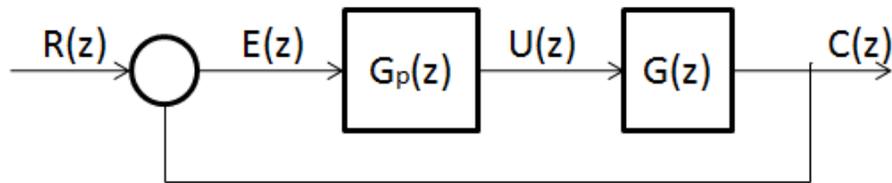
Por medio de la grafica de la figura 4.25, se nota que el margen de magnitud está muy pequeño, luego la ganancia para que el sistema se convierta en inestable es pequeña, es decir, en poco tiempo se inestabiliza.

4.6.2.1 Cálculo del controlador por método analítico

Para el diseño del controlador por medio del método analítico, se debe tener en cuenta los pasos siguientes:

1. El grado del numerador de $G(z)$ debe ser igual o menor que el grado del denominador. De no ser así, el controlador requeriría que sean datos de entrada futuros los que produzcan la salida de la corriente.
2. Si la planta $G_p(s)$ incluye un atraso de transporte e^{-ts} , entonces el sistema en lazo cerrado debe involucrar por lo menos la misma magnitud en atraso de transporte.
3. Si $G(z)$ se expande una serie en z^{-1} , el término elevado a la potencia menor de la expansión serial de $F(z)$ en z^{-1} debe ser por lo menos igual de grande que el correspondiente en $G(z)$.

Figura 4. 26. Diagrama a bloques para el diseño del controlador.



Donde $G(z)$ incluye la función de escalón

$$G(z) = Z \left[\frac{1 - e^{-t}}{s} G_p(s) \right]$$

Y la función para hallar el controlador sería

$$G_D(z) = \frac{F(z)}{G(z)[1 - F(z)]}$$

El primer paso es determinar la transformada Z de la planta que está precedido por un retenedor de orden cero.

$$G(z) = Z \left[\frac{1 - e^{-t}}{s} * \frac{68.36}{s(0.01s + 462.1184)} \right]$$

$$\begin{aligned}
&= (1 - z^{-1})Z \left[\frac{68.36}{s^2(0.01s + 462.1184)} \right] \\
&= \left[\frac{\{-0.990757 + e^{-0.009242} + (1 - e^{-0.009242} - 0.009242e^{-0.009242})z^{-1}\}z^{-1}}{(1 - z^{-1})(1 - e^{-0.009242}z^{-1})} \right] \\
&= \left[\frac{\{-0.990757 + e^{-0.009242} + (1 - e^{-0.009242} - 0.009242e^{-0.009242})z^{-1}\}z^{-1}}{(1 - z^{-1})(1 - e^{-0.009242}z^{-1})} \right] \\
&= \left[\frac{(-0.981557843 + 0.000042448z^{-1})z^{-1}}{(1 - z^{-1})(1 - e^{-0.009242}z^{-1})} \right] \\
&= \left[\frac{(-0.981557843 + 0.000042448z^{-1})z^{-1}}{(1 - z^{-1})(1 - e^{-0.009242}z^{-1})} \right] \\
&= \frac{0.000042448(0.00004325 + z^{-1})z^{-1}}{(1 - z^{-1})(1 - 0.9988z^{-1})}
\end{aligned}$$

Teniendo la función del sistema multiplicada con la función escalón, se define la función $F(z)$ en lazo cerrado como:

$$\frac{C(z)}{R(z)} = \frac{G_D(z)G(z)}{1 + G_D G(z)} = F(z)$$

Como el primer término es $0.981557843z^{-1}$, entonces la función $F(z)$, en términos de series de z , deberá empezar en z^{-1} , porque el sistema es de segundo orden ($n=2$).

$$F(z) = a_1z^{-1} + a_2z^{-2}$$

Dado que la entrada es una función escalón, se requiere combinarla junto con la serie de z de la función $F(z)$,

$$1 - F(z) = (1 - z^{-1})N(z)$$

La salida del retenedor de orden cero es

$$U(z) = b_0 + b_1z^{-1} \text{ (incluye } z^{-1} \text{ para cumplir con estabilidad)}$$

Se tiene, a partir del diagrama de bloques

$$U(z) = \frac{C(z)}{G(z)} = \frac{C(z)G(z)}{R(z)G(z)} = \frac{F(z)R(z)}{G(z)}$$

Entonces

$$U(z) = F(z) \frac{1}{(1-z^{-1})} \left[\frac{(1-z^{-1})(1-0.9908z^{-1})}{0.00004245(0.00004325+z^{-1})z^{-1}} \right]$$

$$= F(z) \frac{1-0.9908z^{-1}}{0.00004245(0.00004325+z^{-1})z^{-1}}$$

Para que $U(z)$ sea una serie de z^{-1} con sólo dos términos, $F(z)$ debe ser;

$$F(z) = (0.00004325+z^{-1})z^{-1}F_1$$

donde F_1 es una constante, entonces $U(z)$ se puede escribir como:

$$U(z) = 23557.126(1-0.9908z^{-1})F_1$$

Como ambas están en función de F_1 , se puede sustituir $N(z)$ en $F(z)$

$$1-a_1z^{-1}+a_2z^{-2} = (1-z^{-1})N(z)$$

$$N(z) = 1 + (1-a_1)z^{-1}$$

donde

$$1-a_1-a_2 = 0$$

entonces

$$F(z) = a_1z^{-1} + a_2z^{-2} = (0.00004325+z^{-1})z^{-1}F_1$$

Por tanto,

$$a_1z^{-1} + a_2z^{-2} = (0.00004325+z^{-1})z^{-1}F_1$$

La división del primer miembro de ésta última ecuación entre $0.00004325+z^{-1}$ da el cociente a_1 y el residuo cero. Al igualar F_1 y el residuo cero se tiene:

$$F_1 = a_1$$

Y

$$0.0000432592a_2 - a_1 = 0$$

Del proceso, se obtiene un sistema de dos ecuaciones

$$1 - a_1 - a_2 = 0$$

$$0.0000432592a_2 - a_1 = 0$$

Por sustitución

$$0.0000432592a_2 = a_1$$

$$1 - 0.0000432592a_2 - a_2 = 0$$

$$1 = 0.0000432592a_2$$

$$\frac{1}{0.0000432592} = a_2$$

$$0.9999568 = a_2$$

Obteniendo el valor de a_2 , se obtiene el valor de a_1

$$0.00004325(0.9999568) = a_1$$

$$a_1 = 0.00004325$$

Con los valores de a_1 y a_2 , se procede a calcular $F(z)$

$$F(z) = 0.0000432592z^{-1} + a_2z^{-2}$$

Y

$$F_1 = 0.0000432592$$

Por tanto

$$N(z) = 1 + (1 - 0.0000432592)z^{-1}$$

$$N(z) = 1 + 0.9999567z^{-1}$$

Teniendo $N(z)$ y $F(z)$, la función del controlador es:

$$G_D(z) = \frac{F(z)}{G(z)(1 - z^{-1})N(z)}$$

$$= \frac{(0.00004325 - z^{-1})0000432592}{\frac{0.000042448(0.00004325 + z^{-1})z^{-1}}{(1 - z^{-1})(1 - 0.9908z^{-1})} (1 - z^{-1})(1 + 0.9999567z^{-1})}$$

Simplificando la ecuación, se tiene

$$= \frac{(1 - 0.9908z^{-1})}{0.00004245(1 - 0.9999567z^{-1})z^{-1}}$$

Por último se multiplica por z tanto numerador como denominador:

$$= \frac{z - 0.9908}{0.00004245 - 0.00004245z}$$

4.6.3 Control Fuzzy

Considerando la descripción de la planta realizada en el numeral 4.3, se procedió a diseñar un sistema con base en lógica difusa, mediante el cual se pudiese controlar el tiempo de inyección de combustible en la cámara del pistón.

Para ello, se empleó un controlador que tiene como entrada la magnitud del error, es decir, que tanto está alejada la salida de la planta con respecto al valor de referencia y como salida, la magnitud del desplazamiento que debe haber en la planta según el error. Para implementar este controlador se utilizó el Fuzzy Logic Toolbox de MATLAB.

4.6.3.1 Reglas y funciones de pertenencia

Para el proceso de definición de los conjuntos difusos, primero se identifican y nombran las variables de entrada y de salida y se establecen sus rangos:

- Entrada: Error [3049230,203]
- Salida: Desplzamiento [334,2343]

A continuación cada variable es descompuesta en un grupo de términos difusos. Cada término representa un conjunto difuso dentro del universo de discusión de la variable, es decir, su rango. Se consideran las siguientes notaciones para los

términos difusos de las variables de entrada y salida, así como sus respectivos rangos:

Entrada:

Notación	Significado	Rango
Pe	Error pequeño	0-0.35
Me	Error mediano	0.18-0.85
Gr	Error grande	0.61-1

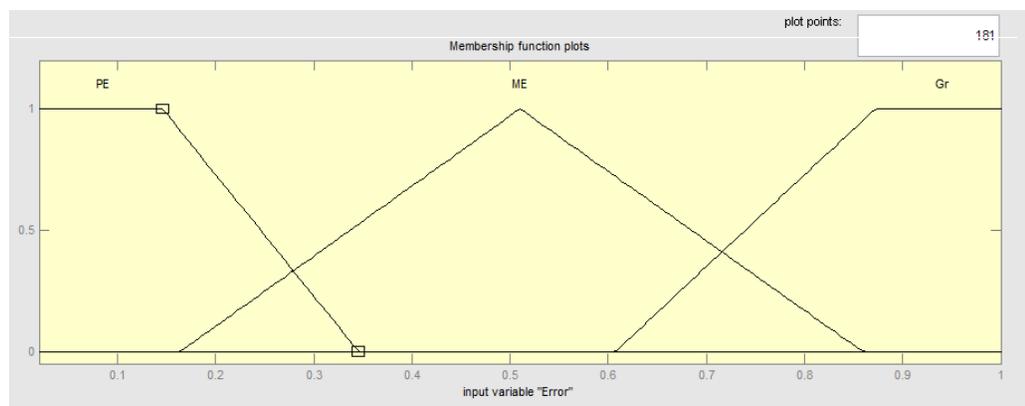
Salida:

Notación	Significado	Rango
Min	Desplazamiento mínimo	0.6-0.9
Eq	Desplazamiento normal	0.65-1.28
Max	Desplazamiento maximo	1.08-1.3

En cuanto a la variable de entrada, se decidió usar funciones de pertenencia de tipo triangular y trapezoidal dado que se pueden usar tres y cuatro parámetros. Los parámetros nos definen los ángulos en el que está comprendida cada función.

La figura 4.27 representa las funciones de pertenencia de la variable de entrada, así como los rangos relacionados anteriormente en las tablas. El universo de discusión empleado para error es 0.1 a 1

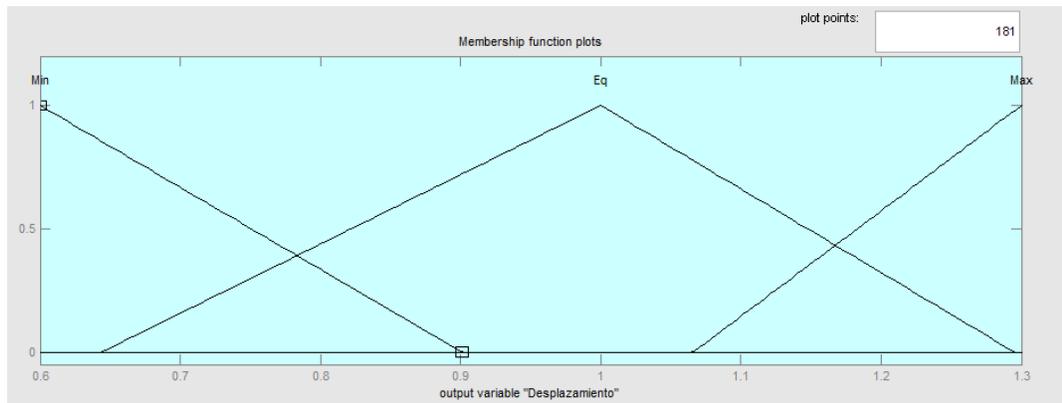
Figura 4. 27. Función de pertenencia variable de entrada.



Para la variable de salida, se decidió usar sólo funciones de pertenencia de tipo triangular ya que se pueden usar tres parámetros, es decir, 3 ángulos en los cuáles está comprendida cada función.

La figura 4.28 representa las funciones de pertenencia de la variable desalida, así como los rangos relacionados anteriormente en las tablas. El universo de discusión empleado para el desplazamiento es 0.6 a 1.3

Figura 4. 28. Función de pertenencia variable salida.

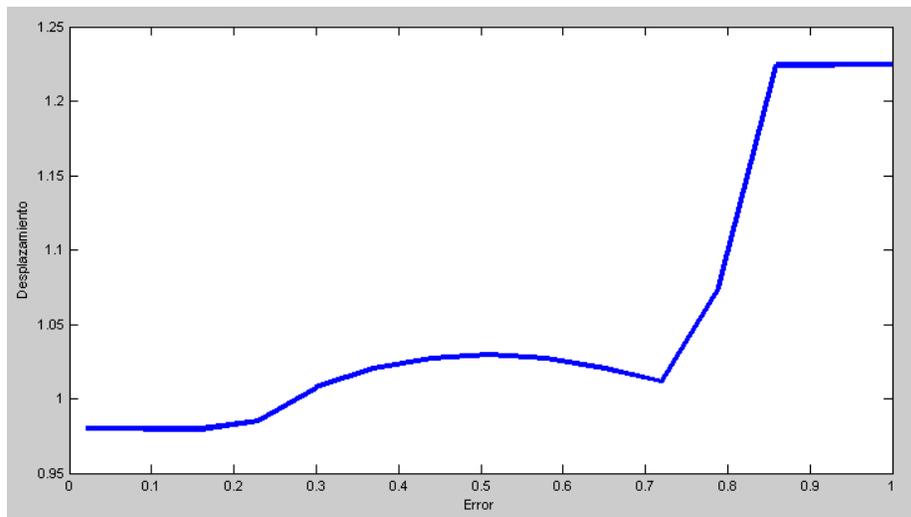


Las reglas de control engloban el conocimiento del sistema y los objetivos de control. Cada regla tiene un estado del sistema en su premisa y una acción de control sugerida en su conclusión. Para el diseño del controlador fuzzy se establecieron las siguientes reglas:

- 1. *If (Error is PE) then (Desplazamiento is Eq)*
- 2. *If (Error is ME) then (Desplazamiento is Eq)*
- 3. *If (Error is ME) then (Desplazamiento is Max)*
- 4. *If (Error is Gr) then (Desplazamiento is Max)*

La relación entre las dos variables, según la acción de cada reglas, se puede ver en la gráfica de la figura 4.29.

Figura 4. 29. Variable de entrada VS variable de Salida

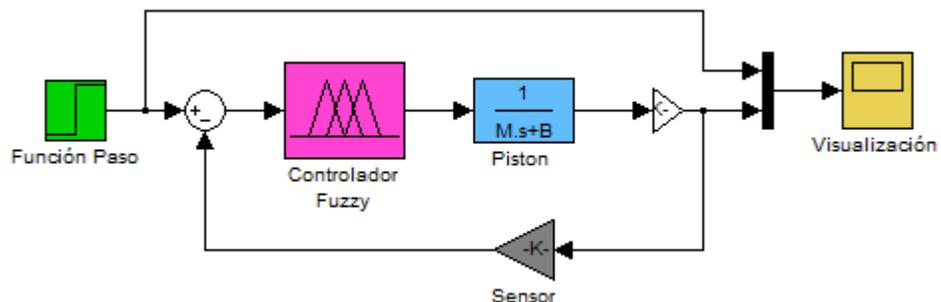


En la grafica de la figura 4.29 puede verse que a medida que el error aumenta, la cantidad de concentración (mezcla estequiométrica) aumenta, es decir, que la relación aire-combustible no es la adecuada para poder hacer combustión perfecta o ideal.

Puede observarse además que cuando la concentración es la ideal, 1 en el eje desplazamiento, se mantiene constante a menos de que el error vaya aumentando hacia una mezcla de tipo pobre, no adecuada para una correcta combustión en la cámara.

El diagrama a bloques en Simulink del sistema se ilustra en la figura 4.30, este está comprendido por el bloque de la función paso, seguido del bloque del controlador fuzzy y la función de transferencia de la planta. A continuación la salida del sistema es realimentada por el sensor.

Figura 4. 30. Controlador Fuzzy



Como para el resto de los controladores se les aplicó, los criterios básicos de estabilidad, éste no será la excepción. Para el caso de la respuesta a la función paso y rampa se tienen los resultados de las figuras 4.31 y 4.32 respectivamente.

Figura 4. 31. Respuesta a la función paso controlador fuzzy.

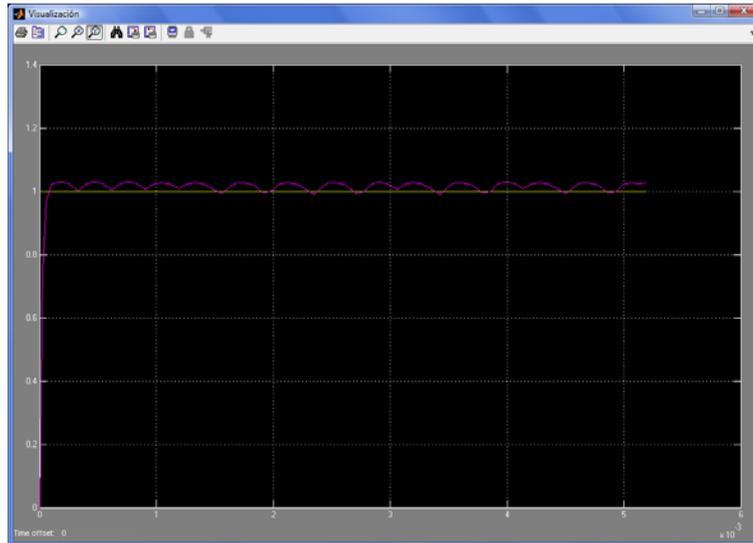
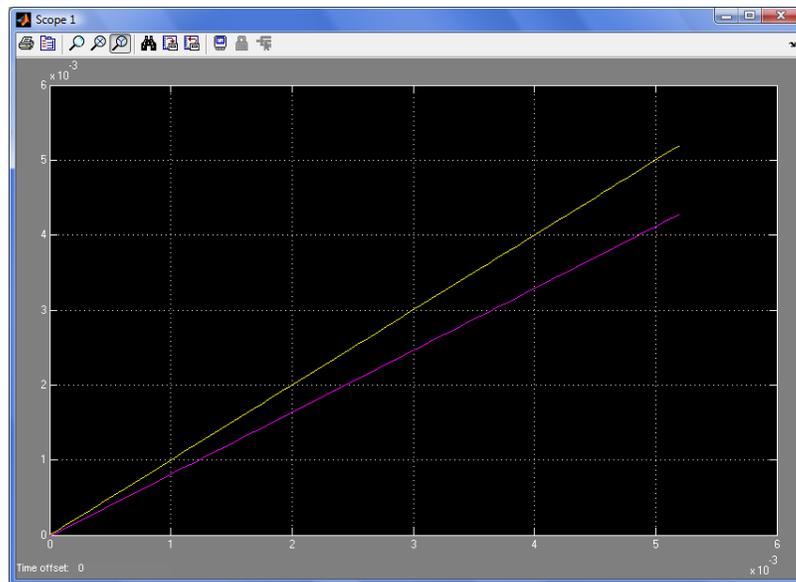


Figura 4. 32. Respuesta a la función rampa controlador fuzzy.



En las dos gráficas anteriores, el controlador fuzzy muestra que no es estable para ser aplicado a este sistema (el pistón), puesto que nunca se estabilizará, sino que seguirá oscilando según las reglas definidas. Esto se aprecia en la gráfica de la

figura 4.31, donde el controlador llega al valor estable, aumenta y vuelve al valor estable y así sucesivamente. En la grafica de la figura 4.32, el error en estado estacionario cada vez será más grande.

Se determinó que el control PID es el más adecuado para la el diseño. Ya que al realizar una realimentación negativa el comportamiento de la planta está limitado por el controlador, teniendo siempre en la salida del proceso una respuesta manipulada todo el tiempo.

Además, al utilizar el método de sintonía, se debe tomar en cuenta el ambiente en el que se desenvolverá la aplicación, para así poder estimar el valor de las constantes que se acomoden a la respuesta de la planta.

Basados en los criterios de estabilidad, el que cumplió con todos los requisitos fue el controlador PID, desde el punto de vista de la respuesta en tiempo y en la frecuencia. Respecto al controlador discreto, el análisis por medio de root-locus arrojó el resultado de que el sistema es críticamente inestable al tener una raíz cercana al borde del círculo de radio unitario.

Para el controlador fuzzy, con sólo el análisis de respuesta en el tiempo, bastó para saber que el resultado de la función paso oscilaría hasta el infinito, es decir, nunca se va a estabilizar.

4.7 SELECCIÓN DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN

Las características principales y específicas hacen que un software sea el más adecuado para la simulación de sistemas de control. A continuación se verá un análisis para escoger entre los programas seleccionados ¿cuál es el más adecuado para la simulación del sistema?

Entre los programas de simulación más populares se encuentran:

- MATLAB
- LabView
- SolidEdge

4.7.1 MATLAB⁷⁴

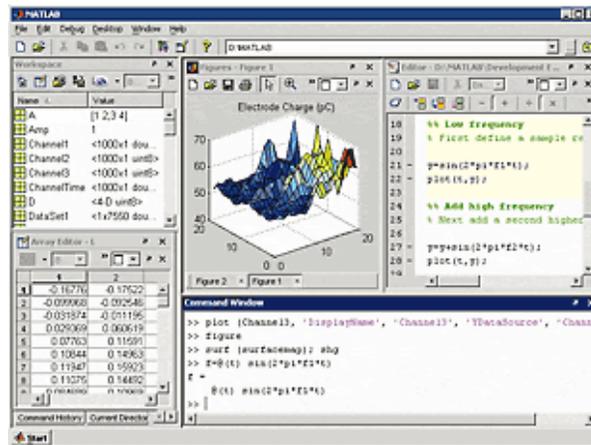
MATLAB es un lenguaje de computación técnica de alto nivel y un entorno interactivo para desarrollo de algoritmos, visualización de datos, análisis de datos

⁷⁴ The Mathworks. Accelerating the pace of engineering and science. [En Línea]. Formato html. Disponible en Internet: <http://www.mathworks.es/products/matlab/description1.html>

y cálculo numérico. Incluye procesamiento de señales e imágenes, comunicaciones, diseño de sistemas de control, sistemas de prueba y medición, modelado y análisis financiero y biología computacional.

Además, MATLAB contiene una serie de funciones para documentar y compartir el trabajo. Se puede integrar el código de MATLAB con otros lenguajes y aplicaciones, y distribuir los algoritmos y aplicaciones que se hayan desarrollado usando MATLAB.

Figura 4. 33. Entorno de trabajo.



Características principales:

- Lenguaje de alto nivel para cálculo técnico
- Entorno de desarrollo para la gestión de código, archivos y datos
- Herramientas interactivas para exploración, diseño y resolución de problemas iterativos
- Funciones matemáticas para álgebra lineal, estadística, análisis de Fourier, filtraje, optimización e integración numérica
- Funciones gráficas bidimensionales y tridimensionales para visualización de datos
- Herramientas para crear interfaces gráficas de usuario personalizadas
- Funciones para integrar los algoritmos basados en MATLAB con aplicaciones y lenguajes externos, tales como C/C++, FORTRAN, Java, COM y Microsoft Excel.

Análisis de datos

MATLAB proporciona herramientas interactivas y funciones de línea de comandos para operaciones de análisis de datos, entre las que se incluyen:

- Interpolación y diezmado
- Extracción de secciones de datos, escalado y promediación

- Correlación, análisis de Fourier y filtraje
- Búsqueda de picos unidimensionales, valles y ceros
- Estadística básica y ajuste de curvas
- Análisis matricial

Dentro del entorno de MATLAB, es posible trabajar por medio de TOOLBOXES, o en simulink BLOCKSETS. Para el área que pretendemos trabajar el software cuenta con:

Tabla 4. 8. Características de los Toolboxes relacionados con control

Toolbox	Características principales
Control System Toolbox	<ul style="list-style-type: none"> • Facilita el diseño de sistemas de control de un solo bucle o de varios bucles usando una gran variedad de técnicas clásicas y de espacio de estado. • Optimiza el rendimiento del sistema de control ajustándolo a los requisitos de tiempo y frecuencia. • Representa y manipula modelos lineales como objetos de datos de función de transferencia, espacio de estado, ganancia de polo cero y respuesta de frecuencia. • Convierte entre representaciones de modelos, discretiza modelos de tiempo continuo y calcula las aproximaciones de orden bajo de los sistemas de orden alto.
System Identification Toolbox	<ul style="list-style-type: none"> • Identifica los modelos lineales y no lineales en el dominio de tiempo y frecuencia. • Simplifica la identificación de los de primero, segundo y tercer orden de los modelos en tiempo continuo • Analiza los datos medidos y asesora sobre la calidad de los datos, requiere pre-procesamiento, y la presencia de realimentación o non-linealidades. • Proporciona herramientas para el procesamiento de datos, el filtrado, y la reconstrucción de los datos que faltan.
Fuzzy Logic Toolbox	<ul style="list-style-type: none"> • GUI's especializados para la construcción de sistemas de inferencia difusos y la visualización y el análisis de los resultados • Composición de funciones para crear sistemas de inferencia difusos • Apoyo a la AND, OR y NOT lógica en reglas definidas por el usuario • Soporta los sistemas de inferencia difusos Mamdani y Sugeno • Automatizado a través de la configuración de la función de miembro neuroadaptive agrupación borrosa y técnicas de aprendizaje • Capacidad de incluir un sistema de inferencia difusa en un modelo Simulink. • Capacidad de generar código C incrustables o ejecutable independiente de los motores de inferencia difusos.

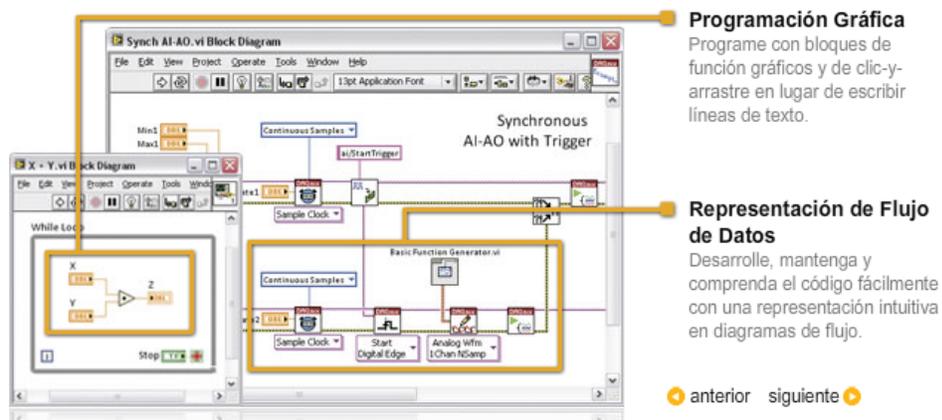
Tabla 4.10. Continuación.

Robust Control Toolbox	<ul style="list-style-type: none"> • μ-LMI-análisis y técnicas de base para el análisis de la solidez de los sistemas de control MIMO • Algoritmos de bucle en el dominio de la frecuencia para la configuración MIMO en respuestas de bucle abierto. • M-H y las técnicas de síntesis para el diseño del sistema de control robusto • Algoritmos de aproximación para el modelo de reducción de orden • Para fines generales resolver RMB
Model Predictive Control Toolbox	<ul style="list-style-type: none"> • Interfaz gráfica de usuario y comandos de MATLAB para el diseño y simulación de modelos de predicción de controladores. • Capacidad para definir un modelo lineal de planta a partir de datos experimentales o modelo Simulink linealizado. • Control no lineal de múltiples plantas que utilizan los controladores con el modelo predictivo de control de transferencia bumpless. • Capacidad para manejar variables en el tiempo y las limitaciones de pesos y la costumbre no medida en modelos de perturbación • Capacidad de generar código C.

4.7.2 LabVIEW⁷⁵

LabVIEW es un entorno de programación gráfica usado para desarrollar sistemas sofisticados de medida, pruebas y control usando íconos gráficos e intuitivos y cables que semejan un diagrama de flujo. LabVIEW ofrece una integración incomparable con miles de dispositivos de hardware y brinda cientos de bibliotecas integradas para análisis avanzado y visualización de datos.

Figura 4. 34. Entorno de trabajo.



⁷⁵ National Instruments. Products And Services. NI ILabview. [En Línea].Estados Unidos. Formato html. Diponible en Internet: <http://www.ni.com/labview/esa/>

Diseño Embebido

LabVIEW se utiliza para diseñar, generar prototipos e implementar aplicaciones embebidas en una variedad de objetivos de procesamiento incluyendo sistemas comerciales en tiempo real y basado en FPGA así como microprocesadores y microcontroladores personalizados.

Módulos y Juegos de Herramientas (Toolkits) para Diseño Embebido:

- Módulo LabVIEW Real-Time
- NI Real-Time Execution Trace Toolkit
- Módulo LabVIEW FPGA
- Módulo LabVIEW Microprocessor SDK
- Módulo LabVIEW Statechart
- Módulo LabVIEW Mobile
- Módulo LabVIEW DSP
- Módulo NI LabVIEW Embedded para Procesadores ADI Blackfin
- Módulo LabVIEW Embedded para Microcontroladores ARM

Diseño de Control y Simulación

Es posible combinar el desarrollo de algoritmos, análisis y visualización en LabVIEW con herramientas para identificación de sistemas, diseño de control, simulación e implementación.

- Módulo LabVIEW Control Design and Simulation
- LabVIEW PID Control Toolkit
- Módulo LabVIEW Real-Time
- Real-Time Execution Trace Toolkit
- Módulo LabVIEW FPGA
- Módulo LabVIEW Statechart
- LabVIEW Simulation Interface Toolkit
- LabVIEW System Identification Toolkit

4.7.3 Solid Edge⁷⁶

Es un programa de parametrizado de piezas en 3D basado en un software de sistema de diseño asistido por ordenador (CAD). Permite el modelado de piezas de distintos materiales, doblado de chapas, ensamblaje de conjuntos, soldadura y funciones de dibujo en plano para ingenieros.

⁷⁶ Solid Edge- Powerful 3D CAD: Siemens Software. [En Línea]. Disponible en Internet: http://www.plm.automation.siemens.com/es_sa/products/velocity/solidedge/solidedge.shtml

Este es uno de los paquetes instalados a enterrar el uso masivo del CAD 2D dando paso al CAD 3D, con las consiguientes ventajas a todos los niveles del trabajo. A través de software de terceras partes, es compatible con otras tecnologías PLM.

4.7.4 Software seleccionado

De los tres paquetes de software presentados, el que más se ajusta a los requerimientos del presente proyecto es MATLAB, puesto que ofrece operaciones con funciones, gráficas, respuesta de sistemas de una forma más clara y concisa, de la que ofrecería LabVIEW. Además de tener dos entornos; un entorno de programación y un entorno gráfico. En el caso de LabVIEW, sólo está el entorno gráfico.

En cuanto a análisis numérico, MATLAB supera a todos, dado que hay formas de procesar matrices, que son útiles para el diseño y simulación de sistemas de control en espacio de estados.

Desde el punto de vista de automatización industrial, LabVIEW es el más indicado, dado que se pueden utilizar bloques gráficos específicos como tanques, válvulas, medidores, entre otros. Además, MATLAB posee toolboxes específicos para sistemas de control que facilitan el diseño.

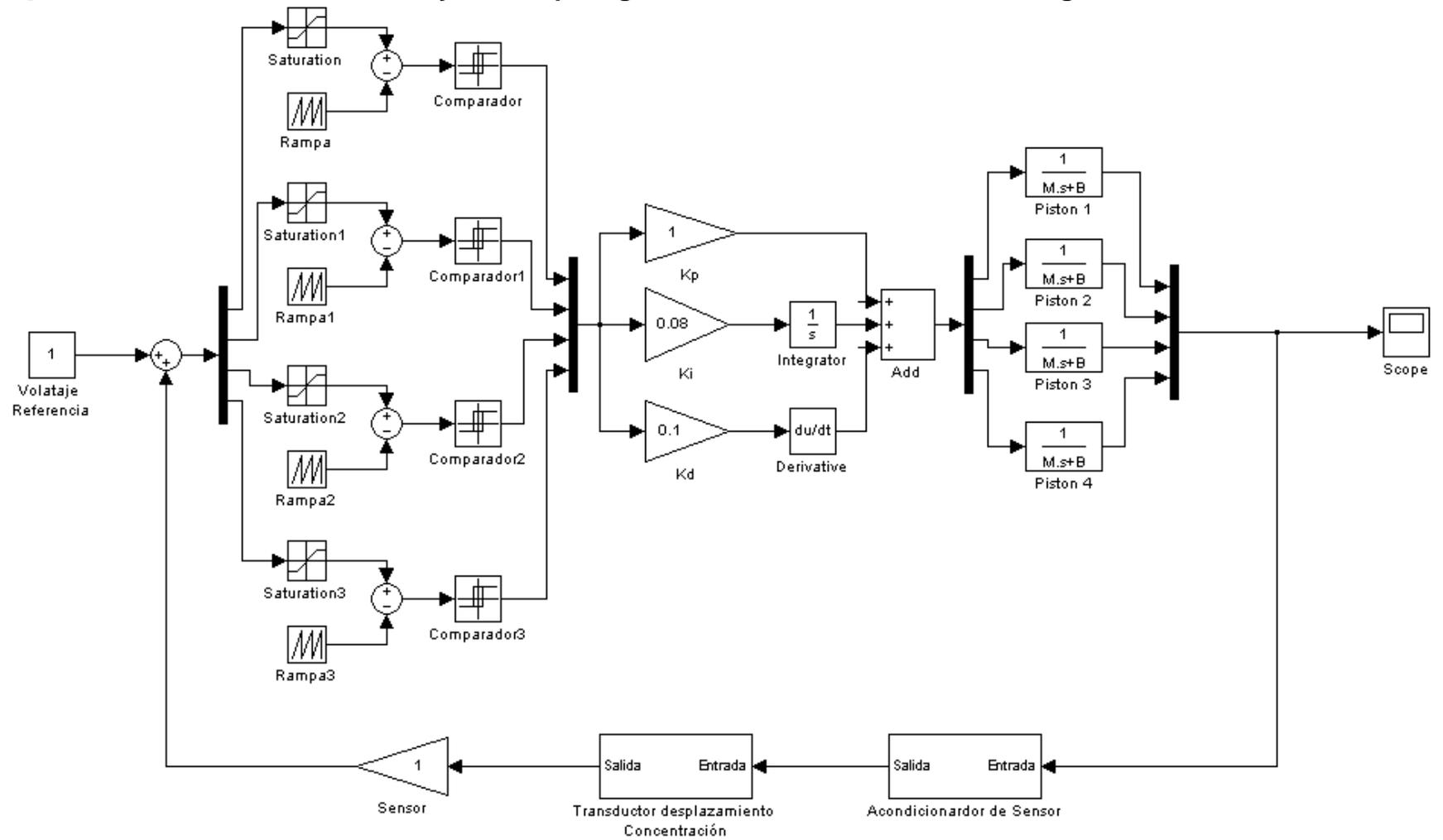
Solid Edge ofrece la opción de mostrar el sistema en 3D, pero en caso de requerirse simular el sistema de control o el proceso de funciones matemáticas, no posee dichas características.

4.8 DISEÑO GENERAL

Basados en todos los análisis anteriores, la figura 4.35 contempla el diseño completo del sistema, es decir, la simulación de los 4 inyectores con sus respectivos controladores PID.

La explicación de cada bloque de la figura 4.35, está relacionada en los numerales 4.1 a 4.6.

Figura 4. 35. Diseño del control de inyectores para generar combustión en un motor a gasolina en Simulink.



CONCLUSIONES

Para obtener el modelo de la función de transferencia de la planta, fue necesario recurrir a modelos matemáticos que involucraban única y exclusivamente sistemas mecánicos, ya que las variables que afectan el desempeño de la planta son de tipo mecánico, así como la composición del pistón y de la camisa donde este se desplaza. Los modelos más adecuados fueron los de masa y amortiguamiento.

A la hora de calcular la función de transferencia de la planta, fue necesario obtener por medio de cálculos matemáticos y tablas, valores que no estaban previstos en el diseño, tales como radio y masa del pistón.

La selección de las características del motor, se basó en el panorama general de Colombia, siendo un motor de 1000cc con 60HP y una distribución de cilindros en línea las características que más se ajustaban al diseño, ya que estas son las más óptimas para los carros de bajo cilindraje y potencia delimitados en el marco del proyecto.

Tanto el sensor como el actuador, ofrecieron datos necesarios para poder calcular el tiempo de inyección, tales como las graficas que relacionan la mezcla estequiométrica con los gases producto de la combustión y los tipos de inyección existentes. Para el caso de la clasificación del inyector se escogió el sistema de inyección indirecta-simultanea-electrónico, siendo éste altamente utilizado en la fabricación de los vehículos modernos.

La simulación del inyector, implicó conocer el funcionamiento del mismo, así como su accionamiento por medio de voltaje. El resultado de lo anterior mostró que un PWM controlado por voltaje era lo que más se ajustaba a sus características.

El término básico en el controlador PID es el proporcional **P**, que origina una actuación de control correctiva proporcional el error. El término integral **I** brinda una corrección proporcional a la integral del error. Esta acción tiene la ventaja de asegurar que en última instancia se aplicará suficiente acción de control para reducir el error de regulación a cero. Sin embargo, la acción integral también tiene un efecto desestabilizador debido al corrimiento de fase agregado. El término derivativo **D** da propiedades predictivas a la actuación.

Basados en los criterios de estabilidad, el que cumplió con todos los requisitos fue el controlador PID, desde el punto de vista de la respuesta en tiempo y en la frecuencia. Respecto al controlador discreto, el análisis por medio de root-locus arrojó el resultado de que el sistema es críticamente inestable al tener una raíz cercana al borde del círculo de radio unitario. Además, al utilizar el método de

sintonía, se debe tomar en cuenta el ambiente en el que se desenvolverá la aplicación, para así poder estimar el valor de las constantes que se acomoden a la respuesta de la planta.

Dado que las licencias de software especializados en electrónica automotriz son muy costosas, se buscaron programas que fueran utilizados dentro de la universidad y cumplieran con los parámetros necesarios para el diseño del sistema de control, tales como MATLAB. Este programa frente a los demás, ofrece programación dentro de dos entornos: con código y gráfico, además de, realizar operaciones con matrices necesarias para el cálculo de funciones de transferencia en espacio de estados.

BIBLIOGRAFIA

CREVS, Antonio. Simulación y control de procesos por ordenador. Colonia del Valle, México D.F. Ed. Alfaomega, Segunda Edición. 2007.

GÓMEZ, Miguel y GÓMEZ, Miller. Modelamiento geométrico de un motor de combustión interna, simulación del ciclo dinámico y representación gráfica de la transferencia de calor del sistema biela, pistón, cigüeñal. Proyecto de Grado Universidad de La Salle. Facultad de ingeniería de diseño y automatización. 2006.

GONZALES, Jose Mari. Regulación Automática I. Titulación Ingeniero técnico Industrial. Curso 2°. Especialidad Electronica. 2001.

NISE, Norman. Sistemas de control para Ingeniería. Ed. Patria cultural, tercera edición. 2002

OROZCO, Felipe. Inyección Electrónica en Motor a gasolina. Editor México Digital Comunicacion, 2006 ISBN 9707790687.

WATSON, Ben. Manual de full injection Bosch; Traducción: Enrique Servin Mejia; Revisión Técnica: Miguel Cachón Paz. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1992.

WEBGRAFIA

Cilindros Hidráulicos y Neumáticos. Actuadores. Fundamentos de control automático. [En línea]. Formato HTML, Disponible en Internet: http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica_hidraulica22.htm

Electrónica automotriz, Sistemas controlados electrónicamente. INTRODUCCIÓN, [En línea], Madrid, España, Formato html, Disponible en Internet: <http://www.autocity.com/manuales-reparacion/index.html?nivelAcceso=3&codigo=220&cat>

Imagen disponible en internet: <http://www.diesel-electric.co.za/Graphics/L-Jetronic%20Fuel%20Injection.gif>

La inyección cumple 40 años [en línea]. Formato html. Disponible en internet: <http://www.motorspain.com/17-10-2007/varios/mecanica/la-inyeccion-electronica-cumple-40-anos>

Los 10 carros más vendidos en Colombia. Autos cosmos. [En línea]. Formato HTML. Disponible en Internet: <http://www.co.autocosmos.com/noticias/18988/los-10-carros-mas-vendidos-en-colombia.aspx>

Mac Fuel Inyección. Sistema K- JETRONIC. [En línea], Argentina. Formato html, Disponible en internet: <http://www.macfuel.com.ar/imagenes/kjetronic.jpg>

National Instruments. Products And Services. NI I Labview. [En Línea]. Estados Unidos. Formato html. Diponible en Internet: <http://www.ni.com/labview/esa/>

NGK. La sonda Lambda. España. [En Línea]. Disponible en Internet: http://www.ngk.es/Sondas_Lambda.1063.0.html

Prueba Chevrolet Spark. Auto Noticias. [En línea]. Formato HTML Disponible en Internet: <http://autonoticiasuy.blogspot.com/2009/03/prueba-chevrolet-spark.html>

Robert Bosch Ltda. Sistemas de inyección electrónica. Catalogo [en linea]. Formato pdf. Disponible en www.todomecanica.com.

Solid Edge- Powerful 3D CAD: Siemens Software. [En Línea]. Disponible en Internet: http://www.plm.automation.siemens.com/es_sa/products/velocity/solidedge/solidedge.shtml

Test engine Argentina. Diferentes tipos de inyectores. [En línea]. Formato html. Disponible en Internet: <http://testengineargentina.blogspot.com/2007/04/inyectores-diferentes-tipos.html>

The Mathworks. Acelerating the pace of engineering and science. [En Línea]. Formato html. Disponible en Internet: <http://www.mathworks.es/products/matlab/description1.html>

TodoMotores. Combustión Bencina. Mezclas para motor [En Línea]. Chile, Formato html, Disponible en Internet: http://www.todomotores.cl/competicion/mezcla_combustible.htm

GLOSARIO

DOSIFICACIÓN: Cantidad de producto en forma líquida que debe aplicarse sobre una superficie para obtener un acabado correcto. Generalmente expresado en gramos por metro cuadrado. Tratándose de mezcla se refiere a las proporciones en que deben mezclarse los distintos componentes (gasolina, aire) para obtener una mezcla de prestaciones suficientes.

SONDA LAMBDA: La sonda lambda mide el contenido de oxígeno de los gases de escape enviando una señal eléctrica a la unidad de comando para que haga modificaciones de mezcla, esta pieza está ubicada en el múltiple de escape.

FILTRO: El filtro es el encargado de retener las impurezas presentes en la gasolina que pueden perjudicar el rendimiento de otros componentes del sistema como inyectores y regulador de presión.

ECU: La unidad de comando electrónica determina el respectivo caudal de combustible necesario y controla todos los elementos de ajuste y las válvulas de inyección. La base respectiva son las señales de los sensores para el registro de temperatura, presión y carga.

MEDIDOR DE CAUDAL DE AIRE: Es el encargado de medir a través de una aleta sonda gobernada por un resorte, la cantidad de aire que entra al motor. La inclinación de la aleta sonda es transformada en una tensión eléctrica por una resistencia variable (potenciómetro) para que la unidad de comando calcule la cantidad de combustible necesaria.

MEZCLA ESTEQUIMÉTRICA: indica la proporción en masa de combustible y comburente necesarios para lograr una combustión completa. La mezcla estequiométrica de la combustión de la gasolina es de 14,7 partes de aire (en masa) por cada parte de gasolina (en masa).

BOMBA ELÉCTRICA DE COMBUSTIBLE: La bomba eléctrica de combustible suministra en forma continua el combustible al sistema. La presión suministrada por la bomba es siempre mayor que la demanda máxima de combustible del motor para mantener siempre la presión necesaria.

SENSOR DE POSICIÓN DE MARIPOSA: El sensor de posición de mariposa es un elemento que censa la posición del acelerador y la velocidad del ángulo de los movimientos de apertura y cierre.

REGULADOR DE PRESIÓN DE COMBUSTIBLE: Los reguladores de presión son los encargados de mantener constante la presión entre el tubo de alimentación de

combustible y el tubo de aspiración. También es el encargado de devolver sin presión el combustible sobrante del sistema al depósito.

COLECTOR DE ADMISIÓN: Tubo común o independiente por el que se alimentan los cilindros con la mezcla de aire y combustible.

INYECTOR: Un inyector es un dispositivo utilizado para bombear fluidos a alta presión que sale por una boquilla a alta velocidad y baja presión convirtiendo su energía potencial en energía cinética.

INYECCIÓN: La inyección es un procedimiento mediante el cual se hace pasar un líquido o un material viscoso a través de un tubo o un conducto circular para un determinado fin.

ESTADOS DE RALENTI: Es dejar el carro después de arrancarlo sin acelerar ni nada, parado (o desembragado con alguna marcha metida).