



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ

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

**TEMA: “MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE LOS INYECTORES
HEUI DE UN MOTOR CAT C7”**

**AUTORES: CHAMORRO YANDÚN ESTEBAN RAMIRO
LARA GUDIÑO OMAR SANTIAGO**

DIRECTOR: ING. CARLOS MAFLA Msc.

IBARRA – ECUADOR

2018



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

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

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	040145106-7 y 100372564-3		
APELLIDOS Y NOMBRES:	CHAMORO YANDÚN ESTEBAN RAMIRO – LARA GUDIÑO OMAR SANTIAGO		
DIRECCIÓN:	(TULCAN CDLA SAN CARLOS CALLE ERNESTO NOBOA) – PRIORATO		
EMAIL:	erchamorro@utn.edu.ec - oslarag@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	062980-511	TELÉFONO MÓVIL:	0958874228 0990373122

DATOS DE LA OBRA

TÍTULO: “MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE LOPS INYECTORES HEUI DE UN MOTOR CAT C7”
AUTOR: CHAMORRO YANDÚN ESTEBAN RAMIRO – LARA GUDIÑO OMAR SANTIAGO
FECHA: AAAAMMDD 2017/03/22

SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO

PROGRAMA:

PREGRADO

POSGRADO

TÍTULO POR EL QUE OPTA:

INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ

ASESOR /DIRECTOR:

ING. CARLOS MAFLA MSC.

2. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Nosotros, **ESTEBAN RAMIRO CHAMORRO YANDÚN y OMAR SANTIAGO LARA GUDIÑO**, con cédula de identidad Nro. **0401451067 y 100372564-3**, en calidad de autores y titulares de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hacemos entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

3. CONSTANCIAS

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

Ibarra, a los 22 días del mes de marzo del 2017.

AUTORES:



Firma:

Nombre: Esteban Ramiro Chamorro Yandún

Cédula: 040145106-7



Firma:

Nombre: Omar Santiago Lara Gudiño

Cédula: 100372564-3



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Nosotros, **ESTEBAN RAMIRO CHAMORRO YANDÚN Y OMAR SANTIAGO LARA GUDIÑO**, con cédula de identidad Nro. **0401451067** y **100372564-3**, manifestamos la voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor de la obra o trabajo de grado denominado: **“MODELACIÓN Y SIMLUACIÓN DE LOS INYECTORES HEUI DE UN MOTOR CAT C7”**, que ha sido desarrollado para optar por el título de: **INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ** en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Ibarra, a los 22 días del mes de octubre del 2017.

Firma: 

Nombre: Esteban Ramiro Chamorro Yandún

Cédula: 040145106-7

Firma: 

Nombre: Omar Santiago Lara Gudiño

Cédula: 100372564-3

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente proyecto fue realizado en su totalidad por los señores: Esteban Ramiro Chamorro Yandún y Omar Santiago Lara Gudiño, como requerimiento para la obtención del título de Ingeniería en Mantenimiento Automotriz.

Atentamente,



Ing. Carlos Mafla Msc.
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Agradezco a DIOS por permitirme dar este paso tan importante en mi vida profesional y por bendecirme día a día.

A mis padres, Darwin Ramiro Chamorro y María del Carmen Yandún por ser mi soporte, fortaleza y mi apoyo incondicional, por demostrarme que con dedicación y paciencia se puede cumplir todo lo anhelado.

A mis familiares por brindarme sus sabios consejos, y guiarme en toda mi vida estudiantil.

A mi director de Trabajo de Grado Ing. Carlos Mafla Msc. y a mis asesores Ing. Ignacio Benavidez Msc. e Ing. Paúl Hernández Msc. quienes con su tiempo y conocimientos me guiaron para la realización de mi proyecto para cumplir una meta más en mi vida.

A mi Universidad Técnica del Norte y quien me abrió las puertas para adquirir todos los conocimientos durante mi vida de estudiante.

Esteban Ramiro

AGRADECIMIENTO

Dejo constancia del más sincero agradecimiento a DIOS, por permitirme cumplir una etapa más en mi vida como un profesional al servicio de la sociedad.

A la UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE, a la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas por haberme acogido durante los años de estudio, a todos y cada uno de sus catedráticos que con sus enseñanzas han forjado mi desarrollo y formación profesional.

Al Ing. Carlos Mafla Msc. DIRECTOR DE TESIS, por su ayuda desinteresada brindando grandes consejos y confianza a lo largo de todo este trabajo investigativo, quien con su conocimiento ha colaborado en la ejecución satisfactoria del presente proyecto.

A todas y cada una de las personas que de una o de otra forma ayudaron y apoyaron en la culminación de este trabajo de grado.

Omar Santiago

DEDICATORIA

A Dios por darme la oportunidad de vivir con una familia que siempre me estuvo acompañando y brindándome su apoyo incondicional.

El presente trabajo se lo dedico a mis padres María del Carmen Yandún y Darwin Chamorro, quienes día a día fueron mi ejemplo a seguir para llegar a formarme como profesional.

A mi hijo Leonel Francisco por ser mi pilar fundamental para no rendirme y poder alcanzar mí meta.

A ellos dedico este trabajo fruto de sacrificio y constante dedicación.

Esteban Ramiro

DEDICATORIA

El presente trabajo va dedicado a mis padres: Carlos Lara Villegas y María Gudiño Calderón, por haberme sabido guiar por el camino correcto con sus sabios consejos y palabras de aliento, por su esfuerzo, sacrificio, dedicación y apoyo incondicional para cumplir mis sueños anhelados

A mis hermanos por ser un apoyo emocional y moral para alcanzar a culminar mi carrera universitaria a lo largo de los años de estudio.

Omar Santiago

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESÚMEN	xiii
INTRODUCCIÓN	xv
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Formulación del problema	2
1.4 Delimitación	3
1.4.1 Temporal	3
1.4.2 Espacial	3
1.5 Objetivos	3
1.5.1 Objetivo General	3
1.5.2 Objetivos Específicos	3
1.6 Justificación	4
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1 Fundamentación tecnológica	6
2.2 Motores de encendido por compresión	6
2.2.1 Historia del motor Diésel	9
2.2.2 Funcionamiento	10
2.3 Sistemas de inyección de motores diésel	11
2.3.1 Sistema de inyección lineal	11
2.3.2 Sistema de inyección de bomba rotativa	12
2.3.3 Inyector bomba	12
2.3.4 Sistema Common Rail (CRDi)	13
2.4. Sistema de inyección Caterpillar HEUI	14
2.4.1 Historia del sistema de inyección HEUI	15
2.4.2 Componentes del sistema de inyección HEUI	15
2.4.3 Inyector HEUI	16
2.4.3.1 Etapa de llenado	18
2.4.3.2 Etapa de inyección	19
2.4.3.3 Fin de la inyección	20
2.4.4 Bomba hidráulica	19
2.4.4.1 Presión de accionamiento deseada	36
2.4.4.2 Presión real de accionamiento	37
2.4.5 Válvula de control de presión de actuación de inyección	21
2.4.5.1 Funcionamiento	22
2.4.6 Bomba de transferencia de combustible	23
2.4.7 Módulo de control electrónico (ECM)	24
2.4.8 Sensores del sistema HEUI	24
2.4.8.1 Sensor de presión de sobrealimentación	25
2.4.8.2 Sensor de presión atmosférica	25
2.4.8.3 Sensor IAP	26
2.4.8.4 Sensor de temperatura del refrigerante del motor	26
2.4.8.5 Sensor de temperatura del aire de admisión	27
2.4.8.6 Sensor de posición del pedal del acelerador	27

2.4.8.7	Sensor de velocidad	28
2.4.9	Actuadores	28
2.5	Sistema de inyección unitaria Caterpillar (EUI)	30
2.5.1	Inyector EUI	31
2.5.1.1	Accionamiento del inyector EUI	32
2.5.1.2	Componentes del inyector EUI	33
2.5.1.3	Generación de alta presión	34
2.5.1.4	Electroválvula o solenoide de alta presión	34
2.5.1.5	Conjunto inyector	35
2.5.2	Funcionamiento de un inyector EUI	35
2.5.2.1	Fase de llenado	51
2.5.2.2	Fase de derrame	52
2.5.2.3	Fase de inyección	52
2.5.2.4	Fase de reducción de la presión	52
2.5.3	Bomba de Transferencia de Combustible	37
2.5.4	Módulo de Control Electrónico (ECM)	38
2.5.5	Sensores del sistema EUI	39
2.5.5.1	Sensor de posición del acelerador	40
2.5.5.2	Sensor de velocidad/sincronización	40
2.5.5.3	Sensor de presión de salida del turbocompresor	41
2.5.5.4	Sensor de presión atmosférica	41
2.5.5.5	Sensor de presión de aceite	41
2.5.5.6	Sensor de temperatura del aire de entrada	42
2.5.5.7	Sensor de temperatura del refrigerante	42
2.5.6	Actuadores	42
2.6	Técnicas de recolección de información	43
2.7	Modelación	43
2.7.1	Tipos de Modelación	44
2.7.1.1	Modelación multidimensional	44
2.7.1.2	Modelación cero-dimensional	44
2.7.1.3	Modelación cuasi-dimensional	45
2.8	Simulación	45
2.9	Software a utilizar	45
2.10	Contaminación Ambiental	46
3.	DESARROLLO DE LA PROPUESTA	47
3.1	Diagnóstico del motor Caterpillar C7	47
3.1.1	Bloque Motor	47
3.1.2	Culata o Cabezote	48
3.1.3	Pistón	48
3.1.4	Biela	49
3.1.5	Cojinetes de Biela	49
3.1.6	Bulón o Pasador	50
3.1.7	Cigüeñal	50
3.1.8	Cojinetes de Bancada	51
3.1.9	Árbol de levas	51
3.1.10	Bomba de Alta Presión	52
3.1.11	Cañerías de paso de combustible	52
3.2.	Montaje del Motor Caterpillar C7	53

3.2.1	Limpeza de las partes del Motor Caterpillar C7	53
3.2.2	Lubricación del Bloque motor	53
3.2.3	Montaje de los Pistones en el Bloque Motor	54
3.2.4	Montaje del cigüeñal en el bloque motor	55
3.2.5	Colocación de la bomba de aceite	55
3.2.6	Montaje del cárter	56
3.2.7	Montaje del cabezote o culata	56
3.2.8	Montaje del colector de admisión	56
3.2.9	Montaje del múltiple de escape	57
3.2.10	Montaje del turbocompresor y del tubo de escape	57
3.2.11	Instalación del sistema de refrigeración	58
3.2.12	Instalación del sistema de inyección de combustible	58
3.2.13	Instalación del sistema eléctrico	58
3.3	Modelado del inyector HEUI	59
3.3.1	El solenoide	59
3.3.2	Componentes hidráulicos	60
3.4	Implementación del modelo en simulink	68
3.4.1	Simulación de la señal de control del solenoide	70
3.4.2	Simulación del movimiento del émbolo del solenoide	71
3.4.3	Simulación de la apertura de la válvula HDV	72
3.4.4	Simulación del movimiento del intensificador	73
3.4.5	Simulación del movimiento de la aguja	74
3.4.6	Simulación de la cantidad de inyección	76
3.5	Lectura de los parámetros del motor en ralentí, 1000 rpm y 2000 rpm.	77
3.5.1	Prueba del motor en ralentí.	77
3.5.2	Prueba del motor a 1000 rpm	78
3.5.3	Prueba del motor a 2000 rpm	78
3.6.	Lectura del voltaje de accionamiento con uso del osciloscopio OTC	79
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	81
4.1	Análisis de sensibilidad del modelo	81
4.2	Análisis comparativo del voltaje de accionamiento del solenoide	82
4.2.1	Análisis entre las señales de accionamiento del solenoide	82
4.2.2	Análisis entre parámetros de las señales del solenoide.	84
4.3	Señal de activación del solenoide HEUI	84
4.4	Señal de la apertura de la válvula HDV	85
4.5	Señal del movimiento del intensificador	86
4.6	Señal del movimiento de la aguja	86
4.7	Señal de la cantidad de inyección	87
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	88
5.1	Conclusiones	88
5.2	Recomendaciones	89
	BIBLIOGRAFÍA	90
	ANEXOS	94

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA NÚM.	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
2.1	Clasificación de los motores de combustión interna	7
2.2	Componentes principales del MCI	8
2.3	Motor Diésel de 3 cilindros creado por Franco Tosi en 1920	10
2.4	Bomba lineal	11
2.5	Bomba Rotativa	12
2.6	Inyector Bomba	13
2.7	Sistema Common Rail	13
2.8	Mejor atomización del combustible	14
2.9	Tipos de inyectores	15
2.10	Componentes del sistema de inyección HEUI	16
2.11	Inyector HEUI	17
2.12	Componentes del Inyector HEUI	17
2.13	Fases de funcionamiento del inyector HEUI	18
2.14	Bomba Hidráulica	20
2.15	Válvula de control de presión de actuación de inyección	21
2.16	Componentes de la válvula IAP	22
2.17	Partes en funcionamiento	23
2.18	Bomba de transferencia de combustible	23
2.19	Módulo de control electrónico	24
2.20	Sensores del sistema HEUI	25
2.21	Sensor de presión	26
2.22	Sensor de temperatura	26
2.23	Circuito del sensor IAT	27
2.24	Sensor de posición del acelerador	28
2.25	Sensor de velocidad	28
2.26	Actuadores	29
2.27	Leva y balancín de accionamiento del inyector EUI	30
2.28	Sistema de inyección EUI	31
2.29	Inyector EUI	32
2.30	Accionamiento del inyector EUI	32
2.31	Componentes de un inyector EUI	33
2.32	Componentes que generan la alta presión	34
2.33	Componentes de la electroválvula	34
2.34	Componentes del conjunto inyector	35
2.35	Fases de funcionamiento de un inyector EUI	37
2.36	Bomba de tranferencia de combustible	38

2.37	Módulo de control electrónico	39
2.38	Sensores del sistema EUI	39
2.39	Sensor de posición del acelerador	40
2.40	Sensor de velocidad/sincronización	40
2.41	Sensor de presión	41
2.42	Sensor de temperatura	42
2.43	Actuadores del sistema EUI	43
3.1	Bloque motor	48
3.2	Culata o Cabezote	48
3.3	Pistón	49
3.4	Biela	49
3.5	Cojinetes de biela	50
3.6	Bulón o pasador	50
3.7	Cigüeñal	51
3.8	Cojinetes de bancada	51
3.9	Árbol de levas	52
3.10	Bomba de alta presión	52
3.11	Aceite amalie 15W40	53
3.12	Montaje del pistón en el bloque motor	54
3.13	Medición con plastigage la holgura entre cigüeñal y bancada	55
3.14	Esquema solenoide HEUI	59
3.15	Esquema simplificado HEUI	61
3.16	Válvula de asiento HEUI	63
3.17	Diagrama de bloques del modelo HEUI	70
3.18	Señal de control del solenoide	71
3.19	Señal de accionamiento del émbolo del solenoide	72
3.20	Señal de apertura de la válvula HDV	73
3.21	Señal del movimiento del intensificador	74
3.22	Simulación de la señal del movimiento de la aguja	75
3.23	Simulación de la cantidad de inyección	76
3.24	Prueba del motor en ralentí	77
3.25	Prueba de parámetros del motor a 1000 rpm	78
3.26	Parámetros del motor a 2000 rpm	79
3.27	Voltaje de accionamiento del solenoide en ralentí	79
4.1	Señal de accionamiento tomada con el osciloscopio	83
4.2	Señal de accionamiento simulada mediante simulink	84
4.3	Señal de activación del solenoide	86
4.4	Señal de apertura de la válvula HDV	86
4.5	Señal del movimiento del intensificador	87
4.6	Señal del movimiento de la aguja	88

4.7	Señal de la cantidad de inyección	88
4.8	Parámetros del motor en ralentí	89
AI.1	Prueba de presión y activación de inyectores a 1000 y 2000 rpm	95
AI.2	Prueba de corte de cilindros	96
AI.3	Prueba de corte de cilindros en 1 y 2	97
AI.4	Prueba de estado 2 en ralentí	98
AI.5	Prueba de estado 2 a 1000 rpm	99
AI.6	Prueba de estado 2 a 2000 rpm	100
AI.7	Prueba de estado 3 en ralentí	101
AI.8	Prueba de estado 3 a 1000 rpm	102
AI.9	Prueba de estado 3 a 2000 rpm	103
AI.10	Prueba de estado 4 en ralentí	104
AI.11	Prueba de estado 4 a 1000 rpm	105
AI.12	Prueba de estado 4 a 2000 rpm	106
AII.1	Modelling HEUI injector in Matlab Simulink	107
AII.2	HEUI injector	108
AII.3	Mathematical Model	109
AII.4	Model Validation	110
AII.5	Conclusions	111
AIII.1	Subsistema solenoide	112
AIII.2	Subsistema HDV	113
AIII.3	Subsistema intensificador	114
AIII.4	Subsistema de la aguja	115
AIV.1	Funciones generales del sistema HEUI	116
AIV.2	Funciones de los componentes del inyector HEUI	117
AIV.3	Funciones de los parámetros del inyector HEUI	118
AIV.4	Funciones de los parámetros del inyector HEUI	119

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA NÚM.	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
2.1	Elementos básicos del MEC	7
2.2	Voltajes de alimentación de los componentes electrónicos	29
3.1	Parámetros de la señal de control del solenoide	72
3.2	Parámetros de accionamiento del émbolo del solenoide	74
3.3	Parámetros de apertura de la válvula HDV	75
3.4	Parámetros de la señal del movimiento del intensificador	76
3.5	Parámetros de la señal del movimiento de la aguja	77
3.6	Parámetros de la cantidad de inyección	78
3.7	Parámetros de la señal emitida por el OTC	82
4.1	Análisis de sensibilidad del modelo	83
4.2	Datos obtenidos a partir de la figura 4.1	86
4.3	Datos obtenidos a partir de la figura 4.2	86

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO NÚM.	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
I	Parámetros de funcionamiento del motor	97
II	Documento de la Conferencia IEEE	109
III	Modelo HEUI	114
IV	Funciones en Matlab 2014	118

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN NÚM.	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
3.1	Equilibrio de fuerzas del modelo HEUI solenoide	62
3.2	Área del orificio de la válvula de resorte (abierta)	64
3.3	Fuerza del flujo	65
3.4	Flujo a través de la válvula de disco	65
3.5	Fuerzas que actúan sobre la válvula de disco	65
3.6	Movimiento para el intensificador	66
3.7	Flujo que ingresa en la válvula de trabajo	67
3.8	Movimiento de la aguja mediante el equilibrio de fuerzas	68
3.9	Conservación de la masa para la cámara de la aguja	68
3.10	Tasa de flujo de inyección causada por el combustible comprimido	69
3.11	Área efectiva de las boquillas	69
3.12	Cantidad de inyección	70

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

HEUI	Inyector unitario controlado electrónicamente
PM	Material Particulado
EUI	Inyección unitaria electrónica
GDI	Inyección directa de gasolina
HCCI	Ignición por compresión de carga homogénea
MCI	Motores de combustión interna
MEP.	Motor de encendido provocado
MEC.	Motor de encendido por compresión
CRDi	Riel común de inyección directa
ECM	Módulo de control electrónico
IAP	Presión de accionamiento de la inyección
ESL	Sistemas electrónicos
HDLS	Lenguaje de descripción de hardware
CFD	Dinámica de fluidos computacionales
NOx	Óxidos de nitrógeno
CO2	Dióxido de carbono
GEI	Gases de efecto invernadero
HDV	Válvula diferencial hidráulica
VCO	Orificio cubierto por la válvula

NOMENCLATURA

A	Área de la sección transversal efectiva del solenoide;
d	Diámetro
e	Tensión de control del solenoide;
e_b	Tensión de fuerza contra electromotriz;
F	La fuerza;
f	Función (sin sufijo);
f	Coefficiente de fricción (con diversos sufijos);
g	La aceleración de la gravedad;
i	Corriente por la bobina;
K_j	Coefficiente de flujo de la línea de entrada de cámara de trabajo;
K_o	Coefficiente de flujo de HDV para regresar línea;
K_z	Coefficiente de flujo del flujo de inyección
K_b	Coefficiente de fuerza electromotriz del solenoide
K_f	Fuerza constante del solenoide
k	Rigidez de los muelles (con diversos sufijos)
L	Inductancia de la bobina de solenoide;
l	Longitud;
m	Masa de los componentes (con varios sufijos);
N	Número de vueltas de la bobina del solenoide;
P_L	La presión (con varios sufijos);
q_u	Caudal de inyección;
Q_u	La cantidad de inyección de una inyección;
R	Resistencia de bobina;
S	Área de sección transversal (con varios sufijos);
S_4	Área efectiva de la aguja;
S_5	Área efectiva de las boquillas;
S_I	Área equivalente del orificio de entrada a la cámara de trabajo;
S_O	Área equivalente del orificio de salida de la cámara de trabajo;
T	Temperatura

t	Tiempo
U_{max}	Desplazamiento máximo de la aguja
u	Desplazamiento de la aguja
U_0	Precarga del muelle de la aguja.
V	Volumen (con varios sufijos)
X_{max}	Desplazamiento máximo del émbolo del solenoide
x	Desplazamiento del émbolo del solenoide
X_0	La precarga del resorte de solenoide
Y	Desplazamiento del intensificador
y_0	La precarga del muelle intensificador
Z_{max}	Desplazamiento máximo de la HDV
z	Desplazamiento de la HDV
z_0	Precarga del muelle HDV
α	Ángulo
β	Módulo volumétrico del combustible diésel
δ	Coefficiente de presión del módulo de compresibilidad
μ_0	Permeabilidad del espacio libre
μ_r	Permeabilidad relativa

RESÚMEN

El presente trabajo se basa en el desarrollo de una modelación y simulación para identificar el funcionamiento de cada uno de los componentes internos que conforman un inyector HEUI de un motor Caterpillar C7, a través de señales que serán representadas en un software gráfico como Matlab/Simulink en la versión 2014. Las señales representadas en simulink, explican cada una de las funciones que tienen cada uno de los componentes del inyector al momento de que se encuentre en la inyección de combustible. Con la ayuda de los dispositivos electrónicos se puede llegar a obtener los valores de voltaje que llega al solenoide y la cantidad de inyección. La utilización del scanner para verificar los parámetros de funcionamiento del motor, se realiza a diferentes revoluciones del motor como lo es en ralentí, 1000 rpm y 2000rpm. Esto permite identificar la cantidad de inyección de 10 mm^3 , la cual, se procede a introducir en simulink para observar la curva que este valor procede a graficar. El osciloscopio permite obtener el voltaje que ingresa al solenoide y el tipo de curva que este tiene a diferentes revoluciones del motor. En estado de ralentí el osciloscopio marca un voltaje de 40 V y a una revolución de 2000 rpm indica un voltaje de 70V. Las señales con respecto al movimiento del émbolo, de la válvula HDV del intensificador y de la aguja, se realiza un breve análisis de su señal por motivo de que no hay con que realizar una comparación y tampoco existe una toma de datos donde permita introducir algún dato donde cambie esta señal, por lo que se concluye que el movimiento de estas partes es igual para todos los inyectores HEUI.

ABSTRACT

The present work is based on the development of a modeling and simulation to identify the operation of each of the internal components that make up a HEUI injector of a Caterpillar C7 engine, through signals that will be represented in graphic software such as Matlab / Simulink in the 2014 version. The signals represented in simulink, explain each of the functions that each of the components of the injector have when it is in the fuel injection. With the help of electronic devices, it is possible to obtain the voltage values that reach the solenoid and the injection quantity. The use of the scanner to verify the operating parameters of the engine is performed at different revolutions of the engine as it is at idle, 1000 rpm and 2000 rpm. This allows to identify the injection quantity of 10 mm^3 , which, we proceed to introduce in simulink to observe the curve that this value proceeds to graph. The oscilloscope allows you to obtain the voltage that enters the solenoid and the type of curve it has at different revolutions of the motor. In idle state the oscilloscope marks a voltage of 40 V and at a revolution of 2000 rpm it indicates a voltage of 70V. The signals with respect to the movement of the plunger, of the HDV valve of the intensifier and of the needle, a brief analysis of its signal is performed because there is no need to make a comparison and there is not a data collection where it allows to introduce any data where this signal changes, so it is concluded that the movement of these parts is the same for all HEUI injectors.

INTRODUCCIÓN

Ecuador es un país en el que existe gran demanda de movilidad de vehículos pesados y de transporte público, lo cual, causa una gran contaminación de PM al medio ambiente; con el trabajo realizado se apoyara en parte a cuidar el medio ambiente. Y así promover el uso de la tecnología para dar soluciones futuras con menor costo en su estudio e implementación para lograr una disminución de la contaminación ambiental.

Por otra parte los motores Caterpillar cumplen con altos estándares de emisión más exigentes y entregan el rendimiento y la eficiencia que se espera. Estos motores cuentan con el apoyo de la red de respaldo mundial más rápida para ofrecer un rendimiento y confiabilidad sobresalientes.

El sistema HEUI representa gran innovación para marcas como Caterpillar, Ford e International, que ofertan sus motores con este sistema de inyección.

El sistema de inyector unitario controlado electrónicamente y accionado hidráulicamente, es un sistema de los más grandes con tecnología implementada en los motores Diésel. Este sistema tiene muchas ventajas con referente a los sistemas de inyección mecánicos y al de inyectores electrónicos comúnmente utilizados, presenta nuevos patrones en control de emisiones contaminantes y en eficiencia de combustible.

Es por este motivo que se implementa un motor Caterpillar CT equipado un sistema de inyección HEUI para desarrollar conocimientos e identificar su funcionamiento y principalmente como actúan los componentes internos de los inyectores. Para posteriormente desarrollar un modelo de flujo unidimensional, compresible y momentáneo de un primer modelo informático del inyector HEUI en un entorno gráfico de Matlab 2014 en el cual, se podrá simular la curva que toma cada componente del inyector partiendo desde el punto en que la ECM envía el voltaje conveniente al solenoide de acuerdo a las revoluciones del motor, el movimiento que toma el émbolo al estar energizado, el movimiento de la válvula HDV al instante de ser atraída por el émbolo del solenoide, el movimiento del intensificador, desciende por acción de la alta presión acumulada en la parte superior, el movimiento de la aguja en las fases de inyección que el inyector posee y finalmente simular la cantidad de combustible que se inyecta en la

cámara de combustión. De igual manera realizar una comparación entre valores de voltaje y la curva correspondiente que se obtiene mediante el uso del osciloscopio y los parámetros que se obtiene mediante el scanner.

Finalmente esto permite llegar a identificar el comportamiento de cada componente del inyector desde un método de software gráfico para analizar cada parte de la señal y en qué tiempo se realiza.

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Antecedentes

En épocas recientes a nivel mundial se trata de combatir el calentamiento global que esta dado debido a los gases contaminantes que producen los motores de combustión interna, a causa que los motores no trabajan en condiciones óptimas, lo que da resultado que se produzcan gases como monóxidos de carbono, dióxidos de carbono, hidrocarburos, monóxidos de nitrógeno, óxidos de nitrógeno entre otros, siendo estos los que afectan a los seres vivos (Royston, 2008, p. 26) Es por esto, que con el pasar del tiempo la tecnología ha evolucionado en lo referente a los sistemas de inyección Diésel, con el fin de reducir las emisiones contaminantes. Los sistemas de inyección tienen su trayectoria desde que se conformaban con bomba lineal, luego paso a los de bomba rotativa, y finalmente a los CRDi, los cuales son sistemas de inyección electrónica igual que el sistema de inyección HEUI y EUI.

El sistema HEUI (inyector unitario controlado electrónicamente y accionado hidráulicamente), es un sistema de las más grandes innovaciones en los últimos tiempos en tecnología implementada en los motores diésel. El sistema HEUI tiene muchas ventajas con referente a los sistemas de inyección mecánicos y al de inyectores electrónicos comúnmente utilizados, presenta nuevos patrones en control de emisiones contaminantes y en eficiencia de combustible (Bennett, 2011, p. 36)

El sistema HEUI llega a representar una gran innovación para marcas como Caterpillar, Ford e International, que ofertan sus motores con este sistema de inyección. El correcto funcionamiento de este sistema y la revisión constante de estos inyectores, evita que se produzca humo negro y fallos en el motor por lo que llega a producir contaminación hacia el medio ambiente.

En la Universidad de Gales en el año 2003 realizó un estudio que consistió en realizar un modelo matemático e incluso una simulación de inyectores CRDi y

HEUI, para determinar el comportamiento que tienen los gases del motor con el medio ambiente al utilizar una mezcla gas/diesel. Este estudio logró tener puntos favorables en lo que concierne a contaminación y de igual manera al estudio del funcionamiento interno de los inyectores (Tran, 2003, p. 4)

1.2 Planteamiento del problema

De todos los componentes que conforman el sistema de inyección, el inyector es el que presenta más fallas en su trabajo. En su funcionamiento, el inyector está sometido a duras condiciones de operación, debido a la composición química del combustible, y a las altas temperaturas y presiones.

Esto, con lleva a que se presenten fallas en el inyector debido al escaso mantenimiento y de igual manera a todo el sistema de inyección, también se encuentra expuesto a contaminación debido a la mala circulación del combustible y a su inadecuado almacenamiento.

El inyector genera, sustancias contaminantes como resinas y carbón, las cuales, obstruyen los conductos internos, boquilla y filtro del inyector, lo que ocasiona dificultad del paso de combustible, y esto ocasiona reducción de la dosificación en el motor, de esta manera disminuye la eficiencia del sistema lo que permite que no se produzca una correcta mezcla de aire-combustible.

1.3 Formulación del problema

Al tomar constancia del gran esfuerzo que existe para investigar los sistemas de inyección de combustible su comportamiento y funcionamiento de los componentes internos, se ha desarrollado modelos en computadora capaces de simular el movimiento de cada componente del inyector ya sea CRDi y HEUI. Los modelos computacionales ya existentes del sistema CRDi, en su mayoría, representan la parte hidráulica del inyector y no se enfocan en todos los componentes internos. Referente al sistema HEUI, y debido a su existencia corta

en el país se desconoce que se haya implementado un modelo informático donde se explique el funcionamiento de los componentes internos.

1.4 Delimitación

1.4.1 Temporal

Este proyecto se lleva a cabo desde el mes de Febrero del 2017 hasta el mes de Enero del 2018.

1.4.2 Espacial

Este proyecto se lleva a cabo en los talleres de la Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Automotriz de la Universidad Técnica del Norte de la ciudad de Ibarra.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Modelar y simular el funcionamiento de inyectores HEUI de un motor CAT C7.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Investigar los sistemas de inyección en motores Caterpillar.
- Analizar los parámetros de funcionamiento de inyectores HEUI.
- Diseñar el sistema programable mediante procesamiento de señales según los números de respuesta de operación del inyector.

1.6 Justificación

Ecuador es un país en el cual existe gran demanda de movilidad de vehículos pesados y de transporte público, el cual, causa una gran contaminación de PM al medio ambiente. El trabajo realizado se apoya en parte a cuidar el medio ambiente como lo estipula la ley en el Plan Nacional del Ben Vivir (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2013-2017). El cual hace referencia a: “Garantizar los derechos de la naturaleza y proveer la sostenibilidad ambiental, territorial y global”. Y así promover el uso de la tecnología para dar soluciones futuras con menor costo en su estudio e implementación como objetivo principal la disminución de la contaminación ambiental mediante.

El estudio de este sistema de inyección, con el transcurso del tiempo ha tomado fuerza en instituciones de educación superior que ofertan carreras de ingeniería automotriz en todo el país, lo que permite que se desarrollen estudios para conocer el funcionamiento de todo el sistema y principalmente de los inyectores HEUI.

La Escuela Politécnica del Ejército extensión Latacunga (ESPEL) realizó el estudio del sistema de inyección de combustible mediante control electrónico y accionamiento hidráulico, con la elaboración de un banco de pruebas para determinar alguna falla que pueda ocasionar el mal funcionamiento del inyector y así mismo tiempo del motor.

La Universidad de Nueva Gales realiza la modelación y simulación de inyectores CRDi y HEUI en función de la combinación de gas/diesel, para de esta manera identificar las emisiones que pueden obtener en comparación con las de un motor convencional en función de diesel, y verificar los grados de contaminación hacia el medio ambiente.

La modelación y simulación explicara claramente e identificara el funcionamiento del inyector y de cada uno de los componentes internos. Hechas las consideraciones anteriores, se ve la necesidad de implementar un motor Caterpillar C7 con sistema de inyección HEUI para desarrollar un modelo de flujo unidimensional, compresible y momentáneo de un primer modelo informático del inyector HEUI.

Los modelados son procesos desarrollados que se incluyen subsistemas eléctricos, mecánicos e hidráulicos encontrados en los inyectores. Lo cual proporciona una mejor comprensión de los problemas y limitaciones de los inyectores. Los modelos serán implementados en el entorno grafico de MATLAB, el mismo que permite lograr un alto grado de flexibilidad y la debida simulación de elementos lineales y no lineales.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Fundamentación tecnológica

Los motores Caterpillar, tienen un gran avance en lo que respecta a tecnología ACERT, la cual, consiste en un sistema que reduce las emisiones contaminantes de la combustión; este tipo de tecnología esta implementada en cuatro sistemas básicos del motor los cuales son: combustible, electrónica, aire y pos tratamiento (Olermann, 2006, p. 17).

El objetivo de este avance tecnológico, es cumplir con los requerimientos de regulación sobre emisiones, rendimiento, fiabilidad, durabilidad, economía en consumo, costos de propiedad y operación. El sistema de inyección, es uno de los principales sistemas que está encargado del funcionamiento y rendimiento del motor Diésel. Todos los componentes de este sistema deben estar conectados correctamente y estar en perfectas condiciones. Entre los sistemas de inyección más utilizados en la marca Caterpillar podemos encontrar el sistema de inyección HEUI y el sistema EUI.

El estudio del proceso de combustión en motores diésel ha sido, durante años, un tema de gran interés debido principalmente a la creciente necesidad de mejorar el rendimiento de los motores, reducir el consumo de combustible como de igual forma de las emisiones contaminantes. Los estudios experimentales presentan la desventaja de requerir grandes recursos económicos y tiempo en su realización, razón por la cual se utilizan modelos computacionales que permiten estudiar el proceso de combustión de una forma más económica y práctica (Sanchez, Velasco, y Guerrero, 2013, p. 47).

2.2 Motores de encendido por compresión

El motor diésel es un motor térmico de combustión interna alternativo, en el que el funcionamiento del mismo se da por la elevada temperatura que produce mezcla

de la compresión del aire en el cilindro con la inflamación del combustible inyectado (Martí, 1996, p. 10).

En la Figura 2.1, se indica cómo están clasificados los motores de combustión interna de acuerdo al proceso de combustión, al modo de realizar el ciclo, de acuerdo al tipo de refrigeración que estos motores tienen, a la presión de admisión y de acuerdo al número y la disposición de los cilindros.

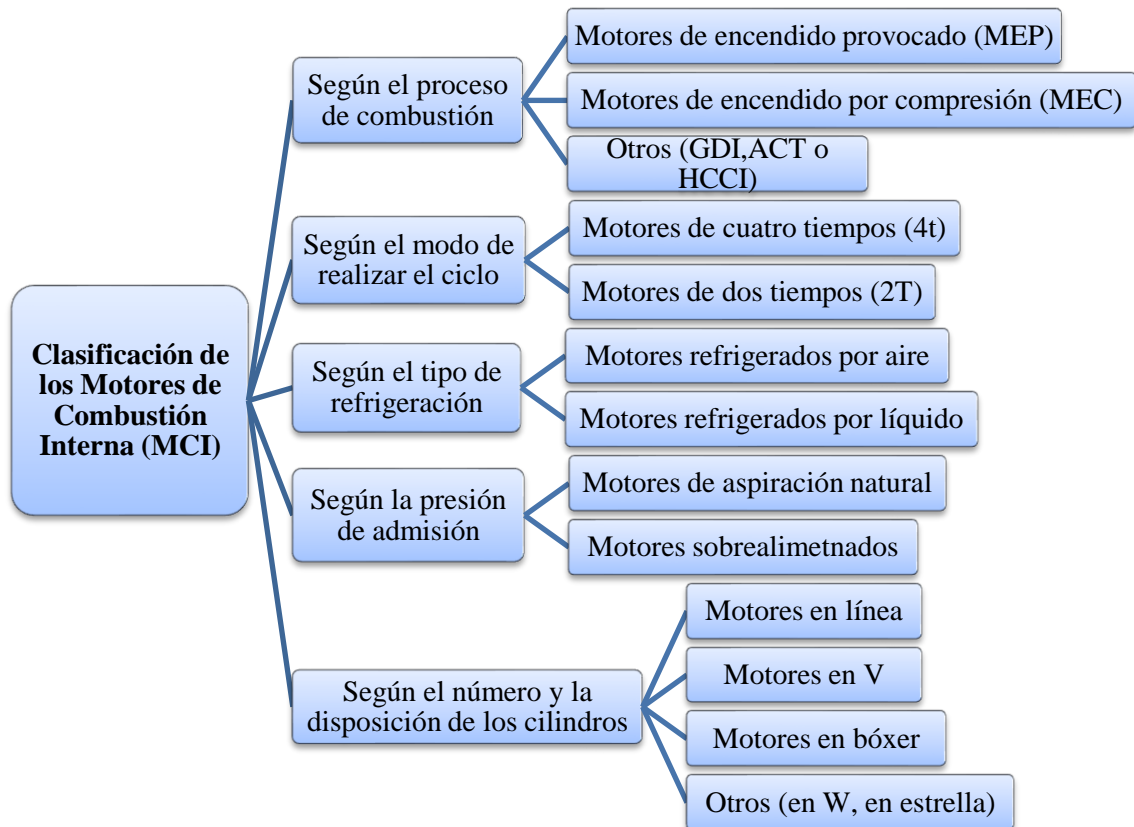


Figura 2.1 Clasificación de los motores de combustión interna (Escudero, Gonzáles, y Rivas, 2009, p. 27)

Estos motores de combustión interna tienen su nombre debido a que todo el proceso térmico se realiza en el mismo fluido que genera el motor. Los motores térmicos de desplazamiento positivo (o volumétrico), son motores en los cuales su funcionamiento se basa en transformar el movimiento circular del cigüeñal en un movimiento lineal del émbolo de un conjunto biela-manivela (Rovira y Muñoz, 2015, p. 27). En la Figura 2.2, se indica la ubicación de los componentes principales que conforman un motor diésel.

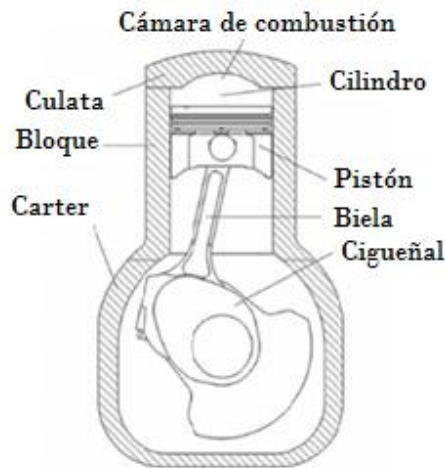


Figura 2.2 Componentes principales del MCI
(Rovira y Muñoz, 2015, p. 28)

Como se observa en la tabla 2.1 indica los elementos básicos que conforman un motor diésel. Cada uno de estos elementos cumple una función determinada en el interior del bloque motor para lograr de esta manera, que al momento de que estos elementos lleguen acoplarse, se produzca un solo movimiento en conjunto.

Tabla 2.1 Elementos básicos del MEC

Pistón	Elemento con movimiento rectilíneo alternativo. Es el émbolo del mecanismo biela-manivela y aumenta o disminuye el volumen del cilindro.
Biela	Elemento que, junto con la manivela, convierte el movimiento lineal del pistón en el rotativo del cigüeñal.
Cigüeñal	Elemento rotativo del motor. En él se integra la manivela del mecanismo.
Cilindro	Es el volumen que aloja el fluido de trabajo.
Cámara de combustión	Es el volumen que queda por encima del pistón al finalizar la compresión y donde básicamente tiene lugar la combustión de la mezcla.
Culata	Elemento que constituye el cerramiento superior de los cilindros.
Bloque	Elemento que contiene los cilindros.
Cárter	Cierre inferior del motor. Contiene el aceite para la lubricación.

(Rovira y Muñoz, 2015, p. 29)

Durante el funcionamiento del motor se realizan varios procesos que se repiten continuamente y forman un ciclo termodinámico abierto. Los procesos o etapas que realiza en el motor de combustión interna son los siguientes:

- Admisión.
- Compresión.
- Expansión.
- Escape

En las etapas de admisión y escape, se establece la renovación de la carga y junto con todo esto se produce el intercambio de masas con el exterior del motor. En las etapas de compresión, combustión y expansión se produce lo referente al ciclo termodinámico del motor (Rovira y Muñoz, 2015, p.35).

2.2.1 Historia del motor Diésel

En el año de 1892, Rudolf Diesel patentó un prototipo de un motor propulsado con un combustible económico, el cual, debía rendir más que cualquier otro motor conocido (Bartsch, 2005, p.137).

Rudolf Diesel, inventó la primera máquina a combustión por autoencendido, y fue la que tuvo mayor desempeño en el campo automotriz, sin embargo, los motores no tuvieron un buen funcionamiento en lo referente a potencia debido a que los motores eran exageradamente grandes y no fueron diseñados para ser montados en vehículos. Por otro lado, los motores fueron utilizados en la industria para inducir bombas y generadores o también para servir de centrales motrices (Saenz, 2011, p.9). En la Figura 2.3 se puede apreciar el motor de 3 cilindros creado por Franco Tosi en el año de 1920. Desde ese entonces se han realizado investigaciones para desarrollar el motor diésel y llevarlo a los grandes niveles actuales de rendimiento y seguridad en el funcionamiento.

Entre las ventajas de los motores diesel tenemos:

- Elevado rendimiento
- Bajo consumo de combustible
- Gran Fiabilidad
- Larga duración.

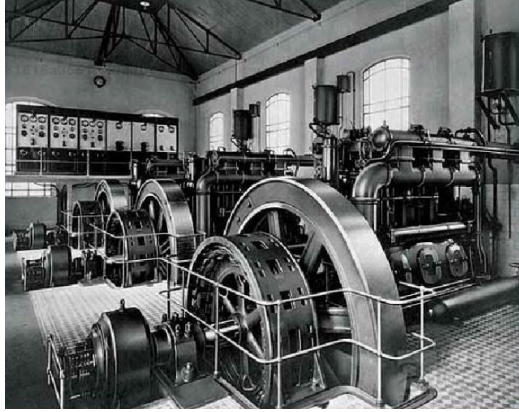


Figura 2.3 Motor Diésel de 3 cilindros creado por Franco Tosi en 1920
(Saenz, 2011, p.10)

2.2.2 Funcionamiento

El motor diésel basa su funcionamiento en aumentar la presión de un gas contenido en el interior de un cilindro, hasta que pueda alcanzar una alta presión y temperatura (500°C). Al pulverizar el combustible sobre el gas a presión caliente en el interior del cilindro, genera una determinada combustión, la cual permite que el pistón sea impulsado con una gran fuerza hacia abajo. Este principio de funcionamiento tiene su origen en el siglo XIX, en donde los motores funcionaban con combustibles fósiles como el kerosene (Bartsch, 2005, p.140).

Robert Bosch, fue quien realizó la primera modificación en estos motores y se basó en el perfeccionamiento del sistema de pulverización del combustible dentro de la cámara de combustión. De igual manera el uso de combustibles pesados económicos en aquellos años, tuvo gran impacto en el desarrollo más eficaz del motor.

En el año de 1919, un iluminado en lo referente a la mecánica Cummins, dio origen a la empresa de motores Cummins. Estos motores fueron tomados en cuenta debido a su bajo consumo y con un alto torque como el que siempre ha caracterizado a los motores a diésel, debido a esto, en el año de 1933, Kenworth fue uno de los primeros que ofreció el primer camión propulsado por un motor Diésel Cummins (Saenz, 2011, p.10).

2.3 Sistemas de inyección de motores diésel

El sistema de inyección es el responsable de la entrega de combustible en el motor. Para ello tiene que conseguir las siguientes funciones:

- Permitir el ingreso del combustible al interior de la cámara de combustión, según la ley de la tasa de inyección, define el comportamiento de las fases de combustión de acuerdo al movimiento del pistón.
- Atomiza el combustible para lograr aumentar la superficie que está en contacto con el aire caliente.
- Mezcla el combustible con el aire que se encuentra en la cámara de combustión.

Según el rango de presiones de trabajo, se distinguen dos partes de un sistema e inyección: baja presión (desde la presión atmosférica hasta una presión del orden de $0,3\text{ MPa}$) y alta presión (desde 10 hasta 200 MPa , dependiendo de punto de funcionamiento y del sistema) (García, 2012, p. 56).

2.3.1 Sistema de inyección lineal

Como su nombre lo indica, son bombas constituidas en forma lineal mediante un árbol de levas por un cilindro y un émbolo accionado directamente por el motor de acuerdo al número de cilindros. Como se indica en la Figura 2.4, los distintos elementos están ordenados de forma lineal, mediante cañerías individuales para cada cilindro.

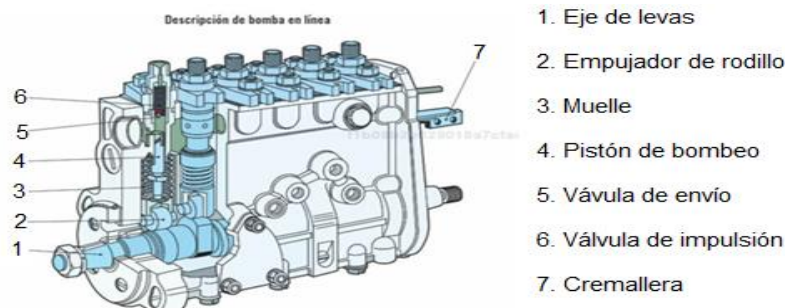


Figura 2.4 Bomba Lineal
(Ibañez, 2012, p. 17)

2.3.2 Sistema de inyección de bomba rotativa

El diseño de este tipo de bomba viene especificado por el número de las rpm, el tipo de construcción del motor y la potencia. A diferencia de las bombas lineales, las bombas rotativas presentan un solo cilindro y de un émbolo distribuidor, lo cual genera una alta presión y la reparte para todos los cilindros, el elemento de distribución es el encargado de hacer el reparto del combustible hacia las salidas que corresponde de acuerdo al número de cilindros (Escudero et al., 2009, p. 43). En la Figura 2.5 se muestra una bomba rotativa y la distribución correcta de los diferentes elementos que la constituyen.

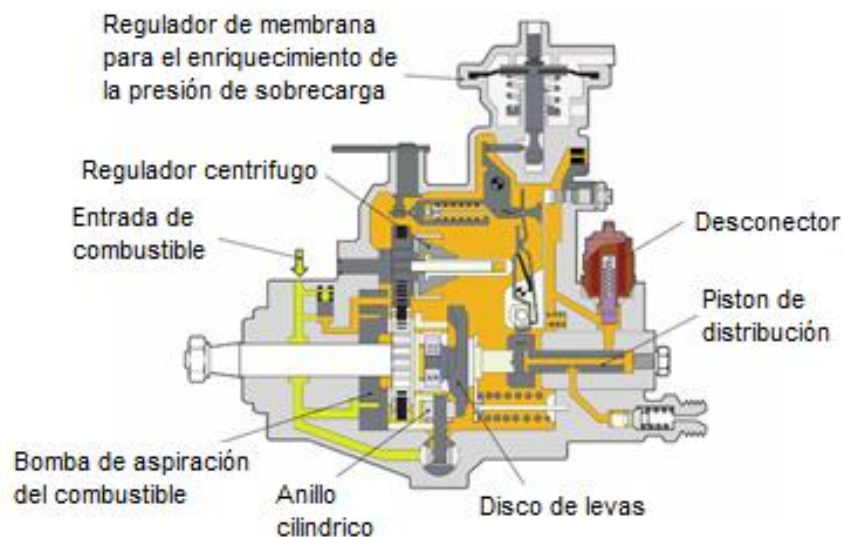


Figura 2.5 Bomba Rotativa
(Ibañez, 2012, p.19)

2.3.3 Inyector bomba

Esta unidad está formada por una bomba de inyección e inyector unificados en sí mismo. Por cada cilindro del motor hay una unidad integrada en la culata, como se muestra en la Figura 2.6 este tipo de bomba-inyector es accionado mediante el árbol de levas del motor directamente a través de un empujador o indirectamente de un balancín (Bosch, 2009, p. 34).

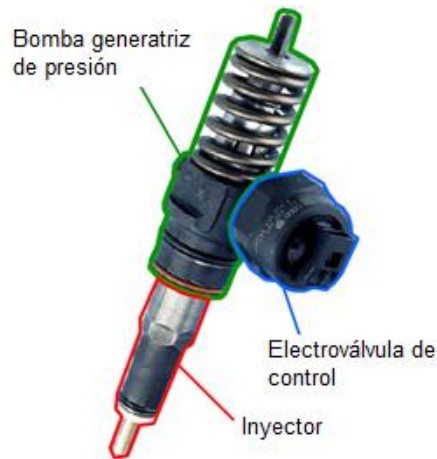


Figura 2.6 Inyector Bomba
(Torres, 2005, p.35)

2.3.4 Sistema Common Rail (CRDi)

Este tipo de sistema presenta una bomba de alta presión y un almacenamiento (common rail de alta presión). La presión de inyección la genera una bomba de alta presión independientemente del número de revoluciones del motor y del caudal de inyección. Este sistema es de los más utilizados en los motores de combustión interna a diésel.

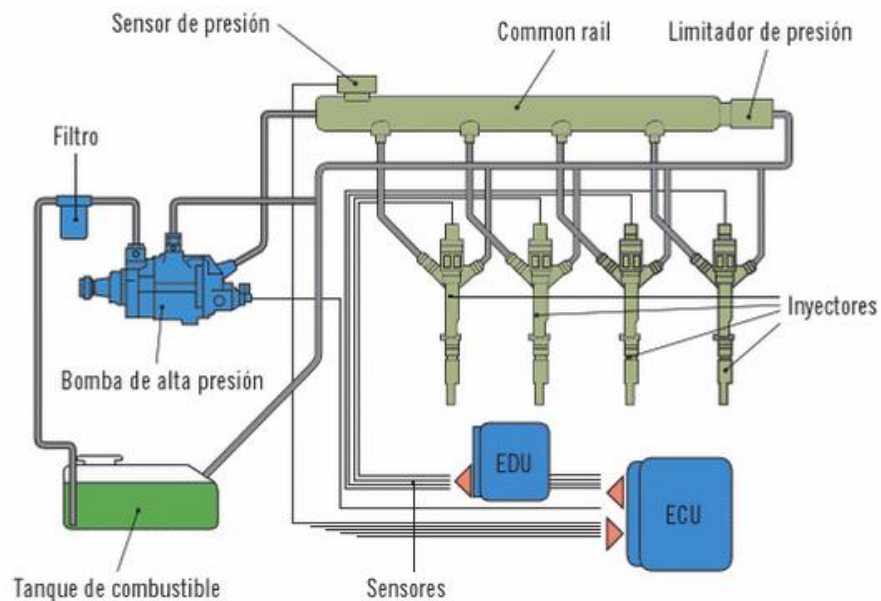


Figura 2.7 Sistema Common Rail
(Ibañez, 2012, p. 21)

2.4. Sistema de inyección Caterpillar HEUI

Es un sistema que trabaja de dos maneras, actuado hidráulicamente y controlado electrónicamente, permitiendo de esta manera suspender los elementos mecánicos tales como la bomba inyectora y líneas de combustible; también tiene la ventaja de aumentar el control de la relación de aire y combustible y de igual manera del tiempo de inyección.

El sistema HEUI, tiene la función de presurizar y suministrar el combustible desde los 65 *psi* hasta los 23500 *psi*; Atomiza el combustible mediante los agujeros del inyector TIP; Inyecta la cantidad correcta de combustible atomizado en la cámara de combustión y el combustible es dispersado igualmente por toda la cámara de combustión (Caterpillar, 2012, p. 27).

La principal desventaja que tienen los sistemas mecánicos que son impulsados por un eje de levas, es la de delimitar la presurización del combustible a bajas revoluciones, para de esta manera tener una mejor atomización y una distribución correcta del combustible en la cámara de combustión. La velocidad del embolo a bajas revoluciones es proporcionalmente más lenta. El aceite lubricante a una alta presión se lo llama presión de accionamiento del aceite que al mismo tiempo genera la presión de inyección que es concedida por el inyector unitario. La presión de accionamiento del aceite resulta ser mucho menor que la presión de inyección.

Una mejor distribución del combustible y una excelente atomización, permite tener una combustión completa lo que ocasiona una reducción de las emisiones y un mejor rendimiento del motor, todo esto gracias a tener una alta presión de accionamiento del aceite (Caterpillar, 2010, p. 28).



Figura 2.8 Mejor atomización del combustible
(Morales y Sangucholeines, 2013, p. 8)

2.4.1 Historia del sistema de inyección HEUI

En 1993 aparecieron los primeros inyectores HEUI, el primero en aparecer fue el inyector tipo A que fueron implementados por International/Ford, los cuales se diferencian de los demás por tener el solenoide de color negro. En el mismo año, Caterpillar fabricó un inyector, donde el aceite accede por la parte superior del inyector por medio de tubos de alta presión. En el año de 1997, apareció el modelo del inyector tipo B, el mismo que se distingue por tener el solenoide de color blanco y por inyectar una mínima cantidad de combustible a la cámara antes de que se produzca la inyección principal.

A esta mínima inyección de combustible toma el nombre de inyección piloto, la cual, sirve para encender un frente de llama y lograr que toda la inyección principal se quemara por completo. En el 2003 aparece la última generación de inyectores, los cuales utilizan menos energía, constan de dos bobinas electromagnéticas con lo que permite mejorar la capacidad de respuesta de los inyectores (Morales y Sangucholeines, 2013, p.11).



Figura 2.9 Tipos de inyectores
(Morales y Sangucholeines, 2013, p.11)

2.4.2 Componentes del sistema de inyección HEUI

Los componentes que forman este sistema son:

- Inyector HEUI

- Bomba hidráulica
- Válvula de control de la presión de accionamiento de la inyección
- Bomba de transferencia de combustible
- Sistema de control electrónico
- Sensores
- Actuadores

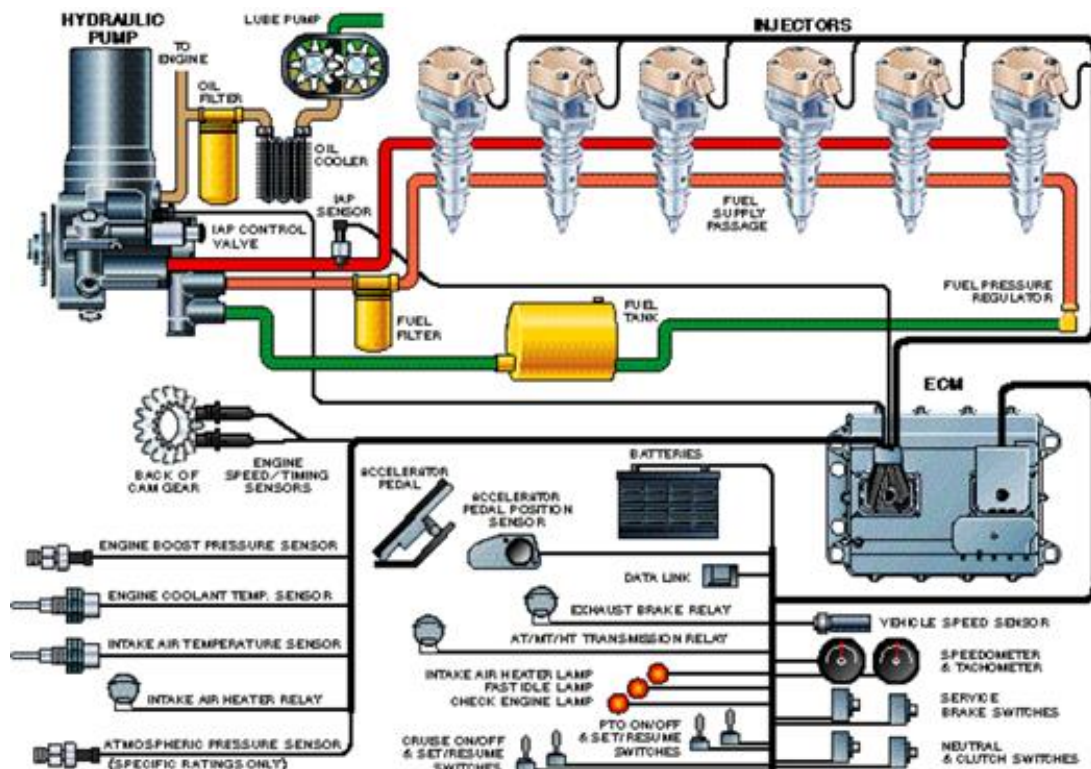


Figura 2.10 Componentes del sistema de Inyección HEUI
(Romero, 2011, p.37)

2.4.3 Inyector HEUI

Este inyector tiene la función principal de presurizar el combustible desde los 65 *Psi* hasta una presión sobre los 23 500 *Psi* (Caterpillar, 2012, p. 45). Este inyector atomiza y dispersa la cantidad correcta de combustible mediante los orificios del inyector sobre toda la cámara de combustión. En la Figura 2.11 se aprecia el inyector accionado electrónicamente y que actúa hidráulicamente.

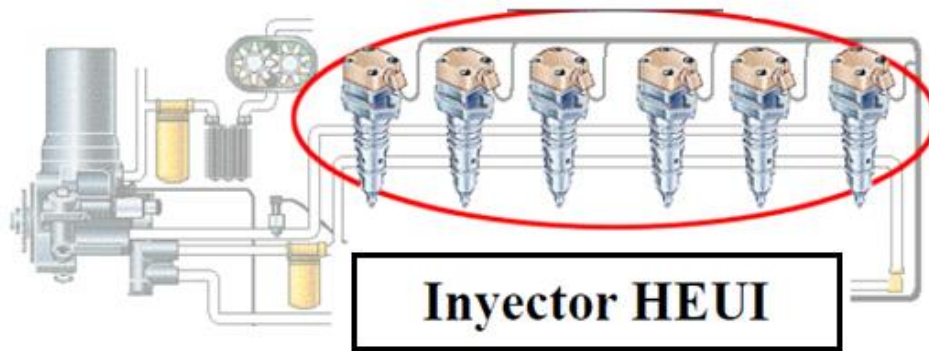


Figura 2.11 Inyector HEUI
(Romero, 2011, p.38)

En Figura 2.12, se observa la ubicación de cada uno de los elementos que componen un inyector HEUI, los cuales son:

- Solenoide
- Válvula
- Pistón intensificador
- Émbolo
- Cilindro
- Conjunto tobera

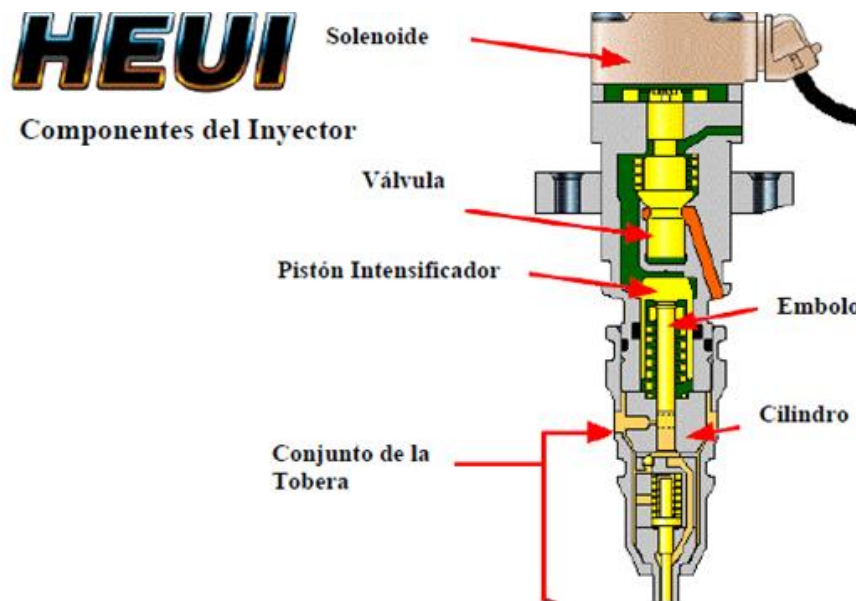


Figura 2.12 Componentes del Inyector HEUI
(Romero, 2011, p.45)

2.4.3.1 Etapa de llenado del inyector HEUI

Como se observa en la Figura 2.13 (A), la válvula de disco está cerrada al bloquear la presión hidráulica que llegue al inyector; es así, que el pistón y el embolo intensificador se encuentran en la parte superior por fuerza del resorte y la cavidad del embolo se llena de combustible a una presión de 40 *Psi* (270 *KPa*) (Merdech, 2013, p.28).

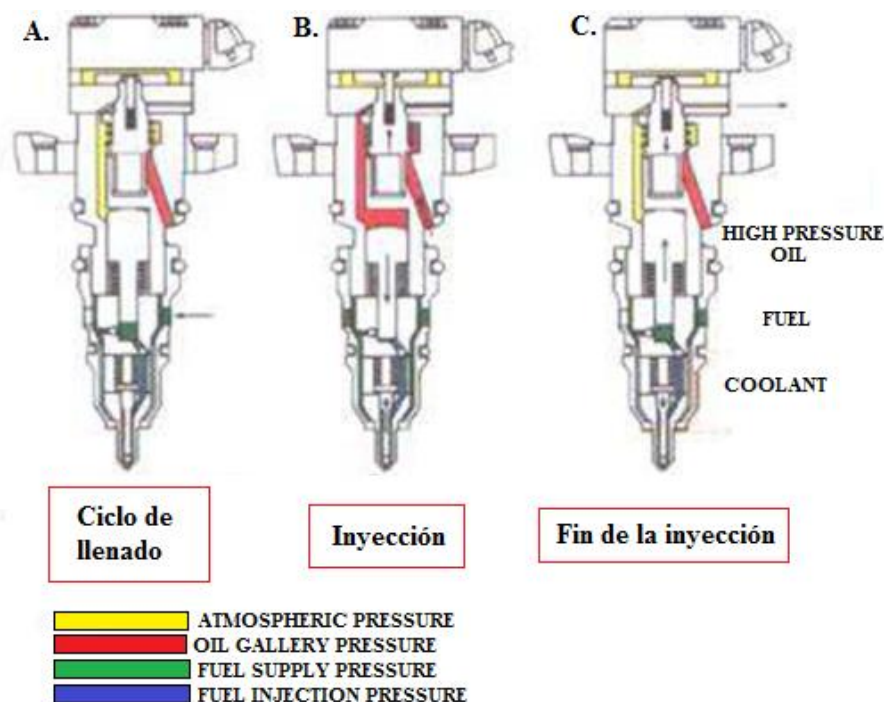


Figura 2.13 Fases de funcionamiento del inyector HEUI
(Merdech, 2013, p. 29)

2.4.3.2 Etapa de inyección de combustible

En la Figura 2.13 (B), la ECM determina que ya debe llevarse a cabo la inyección y suceden los siguientes eventos.

- La ECM envía señales al módulo impulsor de los inyectores para que logre activar el solenoide.
- El solenoide está activo, permite que la válvula de accionamiento salga de su asiento.

- El paso al drenaje es bloqueado por la parte superior de la válvula de accionamiento.
- La cámara de alta presión hidráulica es abierta por medio de la parte inferior de la válvula de accionamiento.
- La alta presión hidráulica fluye hacia la parte superior del pistón intensificador.
- La presión ejercida en la parte superior del pistón intensificador, permite que este descienda junto con el embolo.
- La alta presión ejercida, permite que la válvula de la tobera ascienda y el combustible fluya por los orificios de la tobera (ver Figura 2.13).

2.4.3.3 Fin de la inyección

La Figura 2.13 (C), indica el momento en que la señal del ECM y IDM; da por finalizada la señal eléctrica. Procedente de esto, se producen los siguientes eventos:

- La tensión del resorte permite que la válvula de asiento regrese a su posición inicial, al cerrar la cámara de presión hidráulica y abriendo el paso del drenaje.
- El aceite que se encuentra en las cámaras del intensificador fluye por los respiraderos de la válvula poppet.
- La presión del aceite que se ejerce por encima del intensificador es menor que la presión que se encuentra en el embolo, este regresa a su posición inicial permitiendo que la válvula de la tobera descienda y cierre los orificios para que finalice la inyección.

2.4.4 Bomba hidráulica

Esta bomba de aceite de alta presión, es del tipo de pistones de caudal fijo, la cual permite presurizar el aceite lubricante a una presión máxima de 3100 *Psi* (21380 *KPa*), a esta presión se produce el funcionamiento de los inyectores. Esta

bomba tiene un flujo de 59 *L/min* (15.5gpm) (Morales Y Sangucholeines, 2013, p. 34). La bomba hidráulica cuenta con un depósito de aceite que ayuda en su arranque en frío, y previene la cavitación de la bomba durante el arranque del motor, esto sucede mientras llega todo el aceite a la bomba y pueda suministrarlo a una presión adecuada. En la Figura 2.14 se observa una bomba hidráulica, en el depósito de la bomba se localizan el sensor de presión de aceite (1) y el sensor hidráulico de temperatura (2). En algunos casos la bomba hidráulica origina demasiado flujo, que mediante la válvula IAP es descargado, logra mantener una presión de accionamiento correcta (Barone, 2014, p.7).

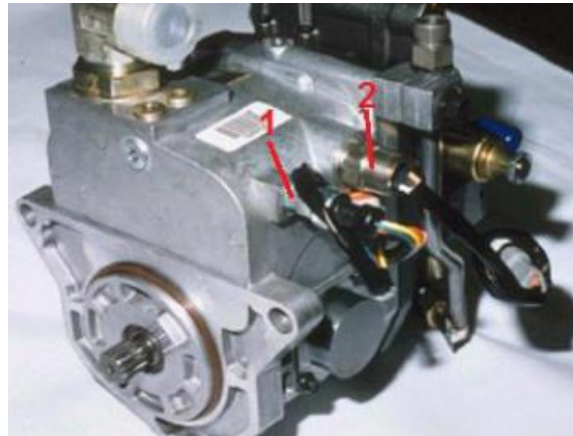


Figura 2.14 Bomba Hidráulica
(Barone, 2014, p.8)

2.4.4.1 Presión de accionamiento deseada

Es la presión que el sistema necesita para lograr que el motor tenga un rendimiento óptimo. La ECM controla la presión de acuerdo a las señales que envían algunos sensores como: sensor de la presión de refuerzo, sensor de posición del pedal del acelerador, el sensor de temperatura del refrigerante y el sensor de sincronización de velocidad. Los cambios que se realizan en esta presión dependen a las variaciones de velocidad del motor, por otro lado, al mantenerse constante los parámetros del motor. (Morales y Sangucholeines, 2013, p.35).

2.4.4.2 Presión real de accionamiento

Esta es la presión la que permite la activación de los inyectores. La válvula IAP controla la cantidad de flujo de la bomba enviándolo hacia el drenaje para equilibrar la presión de accionamiento deseada con la presión de accionamiento real (Morales y Sangucholeines, 2013, p.36). Estos tres componentes ayudan a equilibrar la presión de accionamiento de la inyección son: la ECM, la válvula IAP y el sensor IAP.

2.4.5 Válvula de control de presión de actuación de inyección

Como se indica en la figura 2.15, la válvula de control se encuentra ubicada a un lado de la bomba hidráulica, en mayoría de condiciones, la bomba produce un excesivo flujo de aceite, la válvula controla este flujo de aceite y descarga el exceso del flujo de la bomba y lo despacha hacia el drenaje, de esta manera el accionamiento de la inyección controla un nivel adecuado (Torres, 2005, p.23).

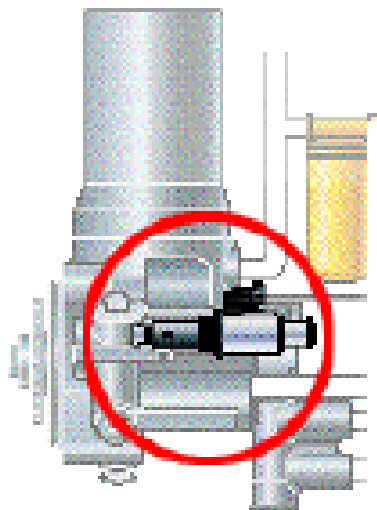
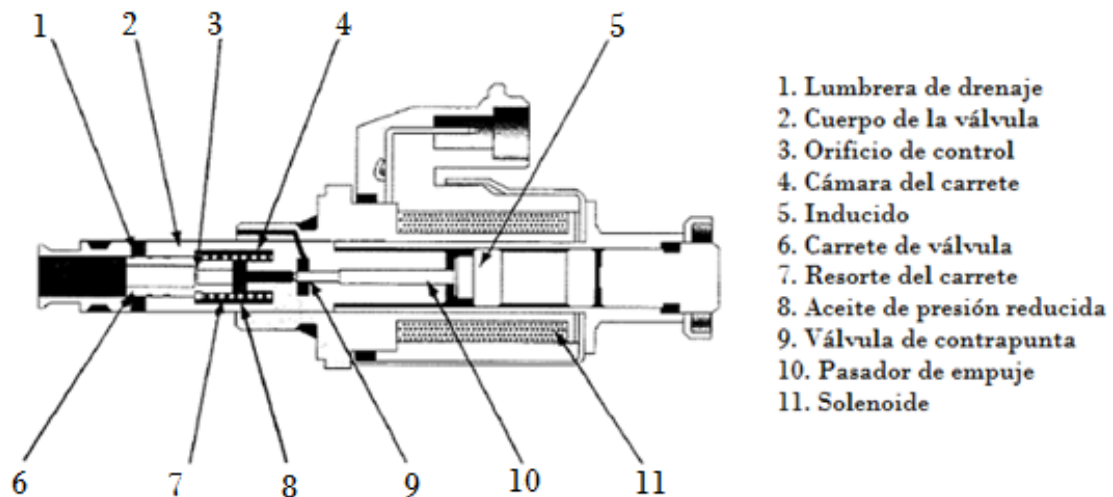


Figura 2.15 Válvula de control de presión de actuación de Inyección
(Romero, 2011, p.39)

Esta válvula controla la presión de accionamiento real, los mapas de la ECM contienen una presión de accionamiento adecuada para cada condición del motor. La ECM envía una corriente de control a la válvula, la corriente de control debe

permitir que la presión de accionamiento sea igual que la presión deseada. La presión de salida de la bomba se encuentra entre 870 Psi y 3100 Psi (Caterpillar, 2012, p. 47).



1. Lumbrera de drenaje
2. Cuerpo de la válvula
3. Orificio de control
4. Cámara del carrete
5. Inducido
6. Carrete de válvula
7. Resorte del carrete
8. Aceite de presión reducida
9. Válvula de contrapunta
10. Pasador de empuje
11. Solenoide

Figura 2.16 Componentes de la válvula IAP
(Morales y Sangucholeines, 2013, p.37)

2.4.5.1 Funcionamiento

El solenoide (11) recibe una corriente eléctrica desde la ECM para que se cree un campo magnético, y actúa en el inducido (5), genera una fuerza mecánica para moverlo hacia la izquierda. Esta fuerza mecánica se traslada por el pasador de empuje (10) hacia la válvula de contrapunta (9). La fuerza magnética conserva cerrada la válvula de contrapunta (9), la presión hidráulica comprimida en la cámara del carrete intenta abrir la válvula, hasta lograr vencer la fuerza del solenoide, con la válvula de contrapunta abierta pasa el aceite con la presión reducida al drenaje.

Todos los componentes que se mencionan anteriormente, se indican en la Figura 2.16. Para el arranque del motor se requiere una presión de accionamiento de 6 MPa para permitir activar el inyector unitario (Morales y Sangucholeines, 2013, p. 38). En la Figura 2.17, se muestra los componentes que están en funcionamiento durante el trabajo que realiza la válvula y la bomba IAP hidráulica.

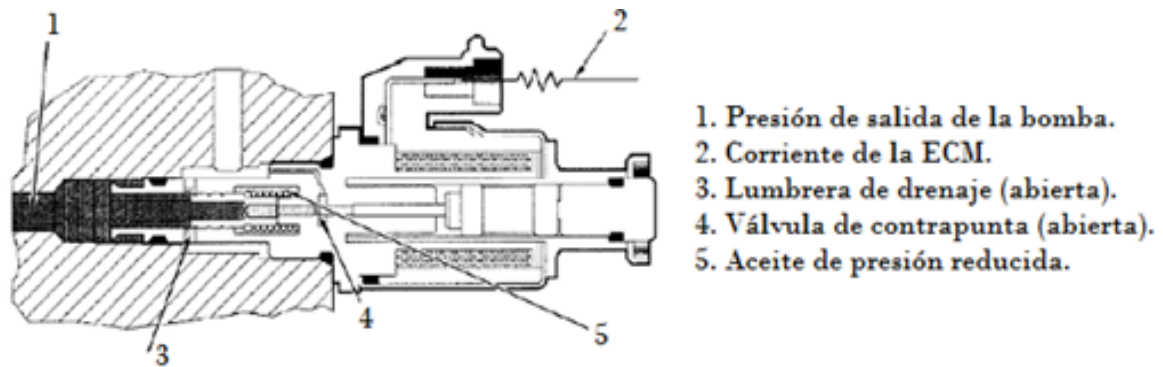


Figura 2.17 Partes en funcionamiento
 (Morales y Sangucholeines, 2013, p.38)

2.4.6 Bomba de transferencia de combustible

La bomba de transferencia representada en la Figura 2.18, permite que el combustible que se contiene en el tanque, pueda ser suministrado a los inyectores a una presión de 60 Psi (415 KPa) (Navarro, 2014, p. 4). Posee dos válvulas de retención, la una de admisión la cual se abre para permitir la entrada del combustible que viene desde el tanque y se cierra para evitar que pueda regresar, la otra válvula es de salida que suministra combustible presurizado hacia los inyectores.

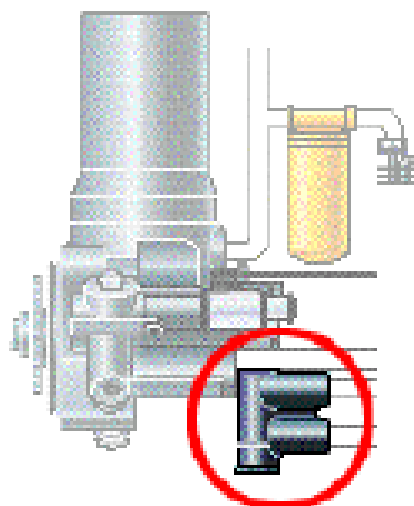


Figura 2.18. Bomba de Transferencia de Combustible
 (Romero, 2011, p.39)

2.4.7 Módulo de control electrónico (ECM)

La ECM que se indica en la Figura 2.19, controla todas las funciones y recibe las señales que envían los diferentes sensores del motor, posee un voltaje de 12 V o 24 V (Caterpillar, 2012, p. 49). La ECM facilita la fuerza eléctrica para todos los componentes electrónicos de igual manera, recibe, analiza y procesa las señales emitidas por los sensores para proceder a enviar señales de voltaje a los actuadores para controlar el suministro de combustible.

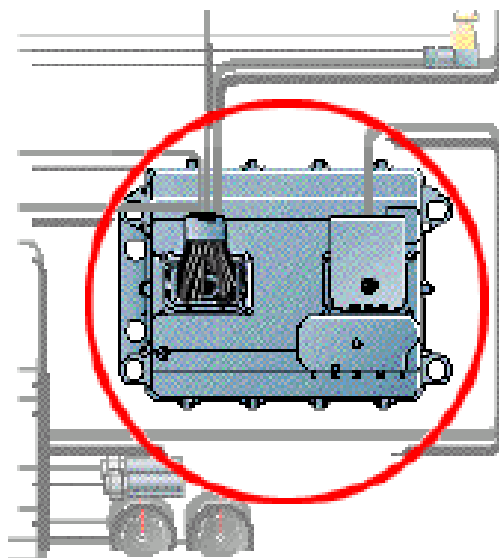


Figura 2.19 Módulo de Control Electrónico
(Romero, 2011, p.39)

2.4.8 Sensores del sistema HEUI

En el diagrama del sistema HEUI representado en la Figura 2.20, se muestran los diferentes sensores que forman parte de este sistema, los cuales, son dispositivos electrónicos que convierten, y a la misma vez se detecta un cambio en la presión, movimiento mecánico y temperatura en una señal electrónica, de igual manera, tiene la función de enviar información hacia la ECM mediante señales eléctricas, los sensores inspeccionan permanentemente todas las funciones del motor (Merdech, 2013, p.30).

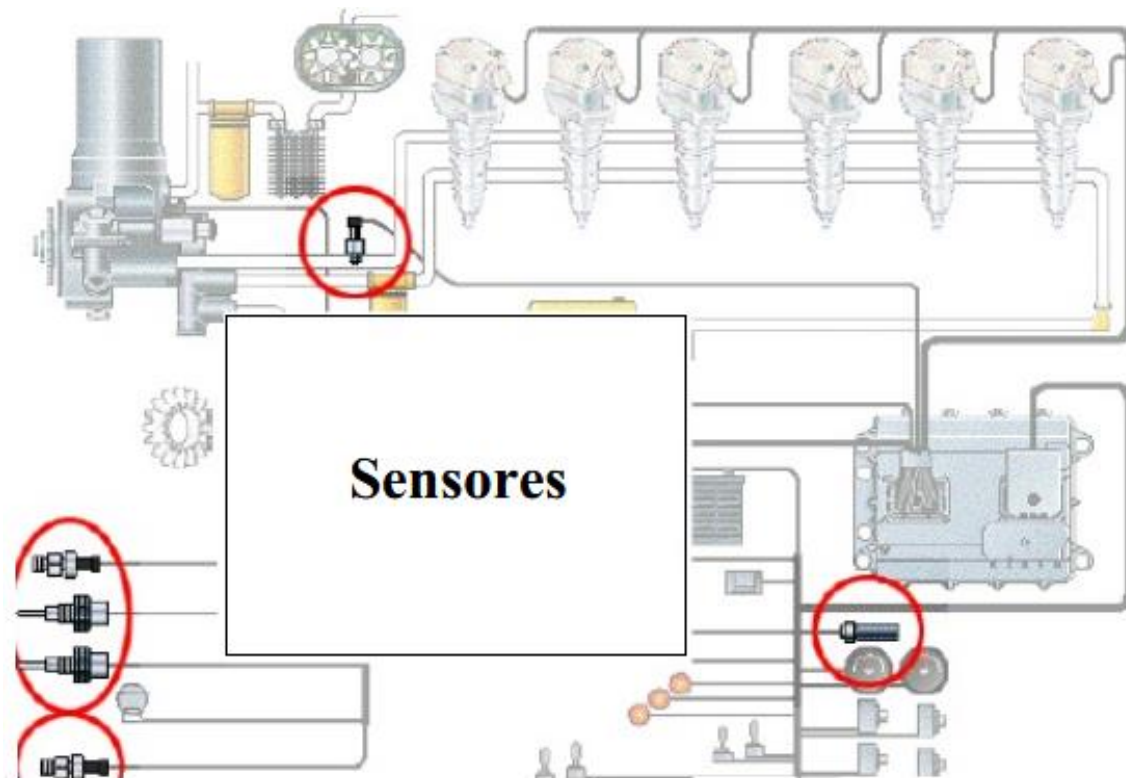


Figura 2.20 Sensores del sistema HEUI
(Romero, 2011, p.40)

2.4.8.1 Sensor de presión de sobrealimentación

Es un tipo de sensor piezoresistivo, su función es la de transmitir a la ECM una señal de tensión igual a la presión del colector de admisión. Este sensor solo está incorporado en vehículos equipados con turbocompresor. Al existir la ausencia de señal de este sensor la válvula Waste-gate queda totalmente anulada y existe pérdida de la potencia del motor (Caterpillar, 2010. p. 53)

2.4.8.2 Sensor de presión atmosférica

Tiene la función de medir la presión del aire en la entrada del múltiple de admisión. Este sensor funciona conjuntamente con el sensor de posición del cigüeñal y entre los dos remiten una señal a la ECM para poder inyectar el combustible (Merdech, 2013, p.33)

2.4.8.3 Sensor IAP

Tiene la función de supervisar la presión en el colector de presión de aceite de los inyectores y enviar una señal hacia la ECM, y mediante la válvula de control de presión pueda regular la presión de aceite que permite que los inyectores entren en funcionamiento. Entorno a esto, el sensor IAP también llega a controlar la presión de inyección de acuerdo al rendimiento del motor (Morales y Sangucholeines, 2013, p. 39).



Figura 2.21 Sensor de presión
(Casimiro, 2011, p.5)

2.4.8.4 Sensor de temperatura del refrigerante del motor

Este sensor controla los cambios de temperatura del refrigerante en el motor. De esta forma la ECM conoce cuál es la temperatura correcta del motor. Este sensor se encuentra ubicado antes del termostato y es fundamental para varias funciones del motor lo que es aconsejable que el motor trabajara a una temperatura normal de funcionamiento (Casimiro, 2011, p.6). En la Figura 2.22 se indica un sensor de temperatura como los respectivos cables de alimentación y masa.

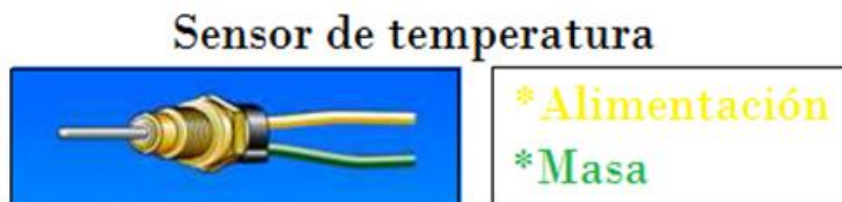


Figura 2.22 Sensor de temperatura
(Casimiro, 2011, p.6)

2.4.8.5 Sensor de temperatura del aire de admisión

Permite que la computadora pueda corregir el tiempo de inyección mediante el aire que ingresa a las cámaras de combustión. La cantidad de oxígeno que ingrese dependerá de la temperatura con la que se encuentre el aire y la computadora tendrá que regular la cantidad de combustible que ingrese a la cámara de combustión.

Este sensor normalmente se encuentra en la parte posterior del múltiple de admisión (Ibañez, 2012, p. 23). El circuito del sensor IAT visto en la Figura 2.23, indica cómo está conformado internamente este circuito y de igual manera muestra el voltaje que llega a la ECM.

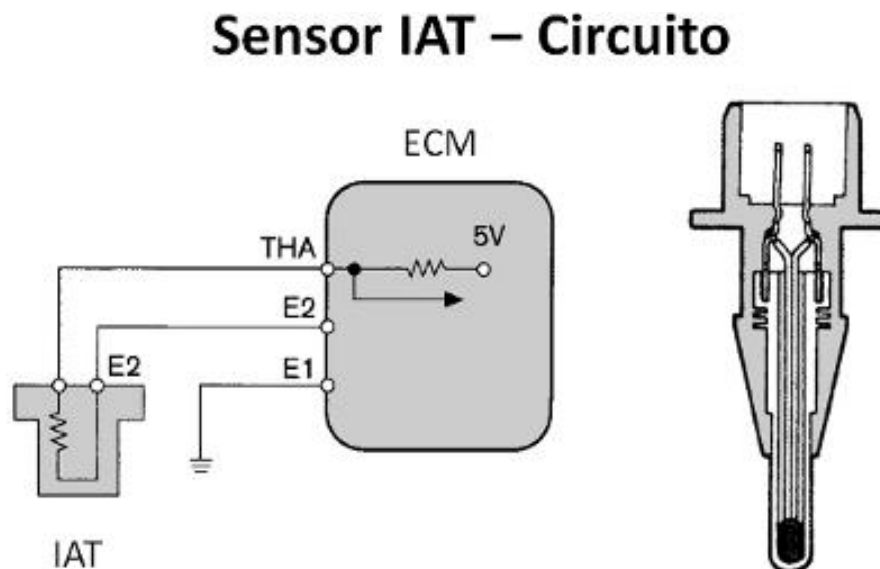


Figura 2.23 Circuito del sensor IAT
(Areny Pallás, 2003, p.19)

2.4.8.6 Sensor de posición del pedal del acelerador

El sensor de posición del pedal del acelerador representado en la Figura 2.24, tiene la función de calcular la posición exacta del pedal del acelerador, por lo tanto, esta posición es enviada a la ECM en forma de señal. Este sensor tiene una alimentación de 8 voltios (Casimiro, 2011, p.5).

1. Alimentación
2. Señal
3. Masa

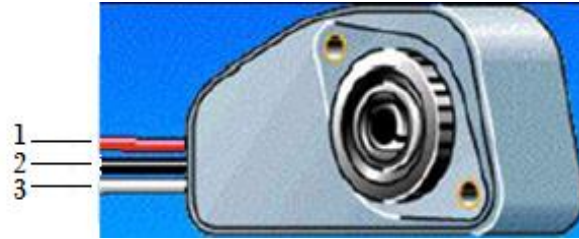


Figura 2.24 Sensor de posición del acelerador
(Casimiro, 2011, p.5)

2.4.8.7 Sensor de velocidad

En la Figura 2.25 se observa el circuito interno de un sensor de velocidad, el cual cumple las funciones de controlar la velocidad y el orden de encendido del motor. Son sensores inductivos que tienen una alimentación de 12.5 voltios (Casimiro, 2011, p.6).

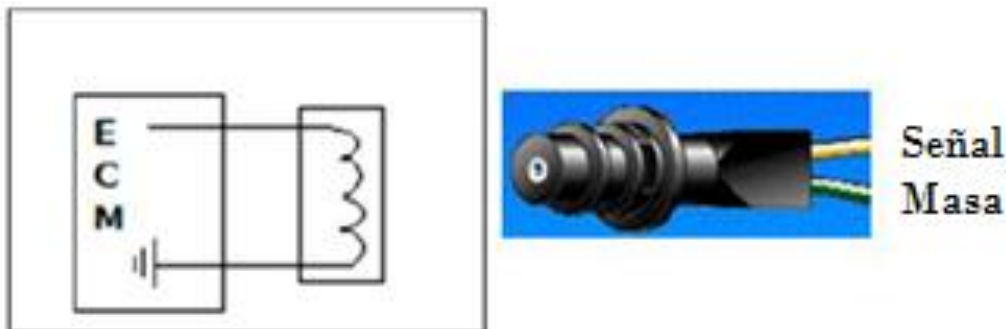


Figura 2.25 Sensor de Velocidad
(Casimiro, 2011, p.6)

2.4.9 Actuadores

Los actuadores del sistema HEUI se observan en la Figura 2.26, los cuales son dispositivos totalmente mecánicos, los que permiten proporcionar fuerza para mover otro dispositivo mecánico, la fuerza que permite el funcionamiento del actuador, depende de tres fuentes: presión neumática, presión hidráulica y fuerza motriz eléctrica lo cual proporciona un motor eléctrico o solenoide de igual manera

pueden cambiar el funcionamiento del motor a través de la corriente eléctrica que reciben desde la ECM (Caterpillar, 2012, p. 54).



Figura 2.26 Actuadores
(Romero, 2011, p.41)

En la Tabla 2.2, se muestran los valores de alimentación que llega a cada uno de los sensores y actuadores para su correcto funcionamiento.

Tabla 2.2 Voltajes de alimentación de los componentes electrónicos

VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN DE LOS COMPONENTES ELECTRÓNICOS		
No.	UNIDAD	V
1	ECM	24
2	Sensores de velocidad	12.5
3	Alimentación del inyector	115
4	Sensores analógicos (presión y temperatura)	5
5	Sensores Digitales (de posición y válvula ICP)	8
6	Válvula de control de bomba	0-24

(Morales y Sangucholeines, 2013, p.34)

2.5 Sistema de inyección unitaria Caterpillar (EUI)

El sistema de combustible EUI es de control electrónico y accionado mediante un balancín de rodillo, que recibe el movimiento del eje de levas. El combustible llega al inyector mediante conductos que se encuentran implantados en la culata. La estructura de los componentes es de lo más robusta para soportar las grandes presiones de trabajo a las que se encuentran sometidos (Merdech, 2013, p.2).

Como se muestra en la Figura 2.27, la leva está integrada en el árbol de levas del motor y es la encargada del accionamiento del inyector bomba. Los conjuntos mecánicos como la bomba de inyección, las tuberías de combustible y los inyectores, fueron sustituidos por un inyector unitario para cada cilindro. El sistema de combustible EUI también incluye un sistema de suministro de combustible de baja presión, controlado mecánicamente, que envía combustible a los inyectores (Caterpillar, 2012, p. 59).

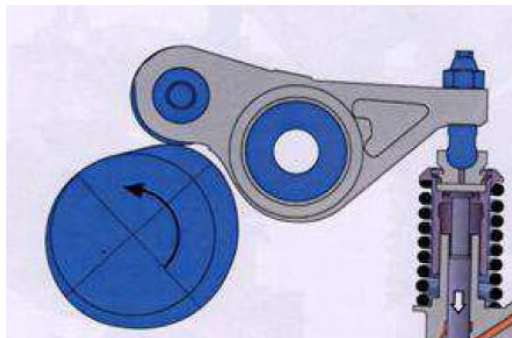


Figura 2.27 Leva y balancín de accionamiento del inyector EUI
(Merdech, 2013, p2)

En la Figura 2.28 se muestra el diagrama del sistema de inyección EUI. Entre todos los componentes que lo conforman están:

- Inyector EUI
- Bomba de transferencia de combustible
- Módulo de control electrónico
- Sensores
- actuadores

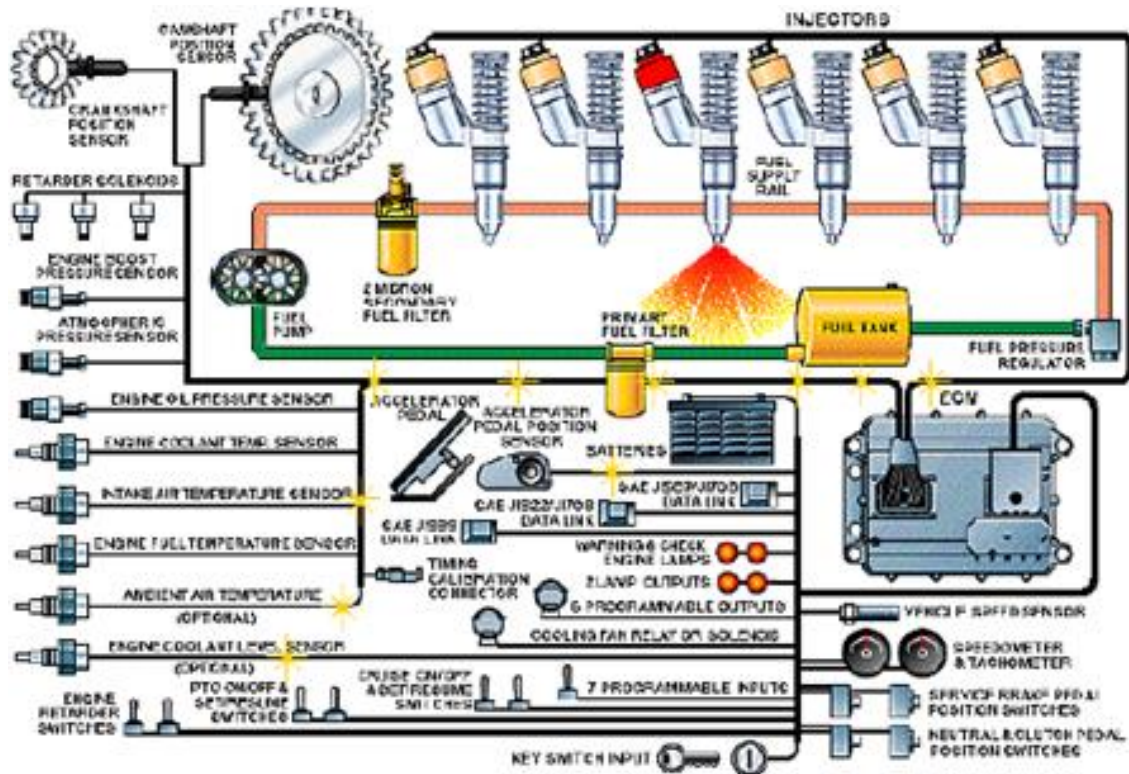


Figura 2.28 Sistema de Inyección EUI
(Romero, 2011 p.22)

2.5.1 Inyector EUI

Cumple la función de inyectar el combustible a una cantidad exacta y a una presión necesaria, de acuerdo a la ECM. Como este inyector sustituye a las combinaciones de porta inyector en los tradicionales sistemas de inyección, no necesita de tuberías de alta presión lo que provoca un cambio positivo en el funcionamiento del sistema de inyección. El inyector EUI se controla de manera electrónica y se acciona de manera mecánica. La ECM controla la apertura y el cierre de la válvula solenoide, que controla el flujo de combustible de presión alta al cilindro. El voltaje con el que opera los solenoides esta por alrededor de los 105 voltios, y la presión de los inyectores este aproximadamente sobre las 3000 Psi. Este sistema hace que la ECM controle el volumen y la sincronización de inyección de combustible (Casimiro, 2011, p.2). En la Figura 2.29 se indica el esquema de cómo están conformados los inyectores EUI.



Figura 2.29 Inyector EUI
(Romero, 2011, p.11)

2.5.1.1 Accionamiento del Inyector EUI

Existe una unidad inyectora para cada cilindro del motor, acoplada directamente en la culata, este inyector que constituye el inyector bomba, entra en la cámara de combustión. El árbol de levas dispone de una leva de accionamiento para cada unidad EUI. En la Figura 2.30 se representa el conjunto de accionamiento del inyector, un mecanismo de balancín mediante el movimiento de la leva, permite que el émbolo tenga un movimiento ascendente y descendente (Merdech, 2013, p.4)

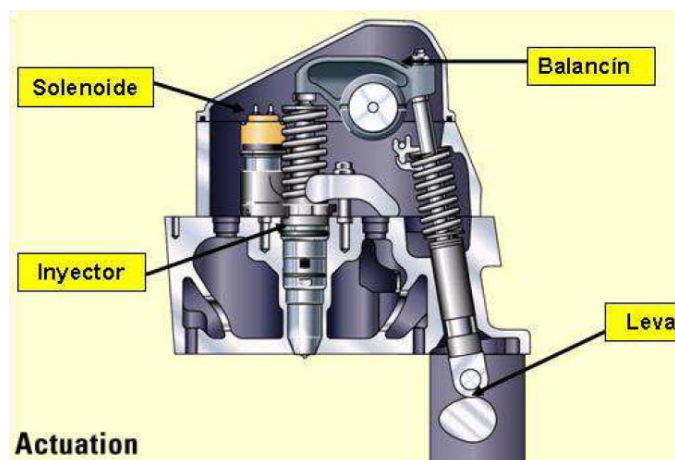


Figura 2.30 Accionamiento del inyector EUI
(Merdech, 2013, p. 13)

La forma de la leva determina la velocidad del émbolo de la bomba, lo cual de esto dependerá el caudal de inyección y el comienzo de la inyección. Es por esto que la fabricación del árbol de levas debe ser lo más de precisa.

2.5.1.2 Componentes del inyector EUI

En la Figura 2.31 se indica los componentes del inyector EUI, el cual, tiene tres componentes principales como lo son la electroválvula o válvula solenoide, los elementos de bombeo y finalmente la tobera. La leva y el mecanismo del balancín accionan el embolo de bombeo el cual se encuentra en posición de reposo por efecto de un resorte. La acción de bombeo impulsa el combustible almacenado en la cámara.

La tobera se abre mediante la presión del combustible que se encuentra pulverizado en el cilindro y envía el combustible mediante los 5 orificios de salida que esta posee. La ECM que es la que indica las modalidades de inyección, mantiene controlada la electroválvula (Delgado, Valle, Loaiza, y Lopez, 2014, p.4).

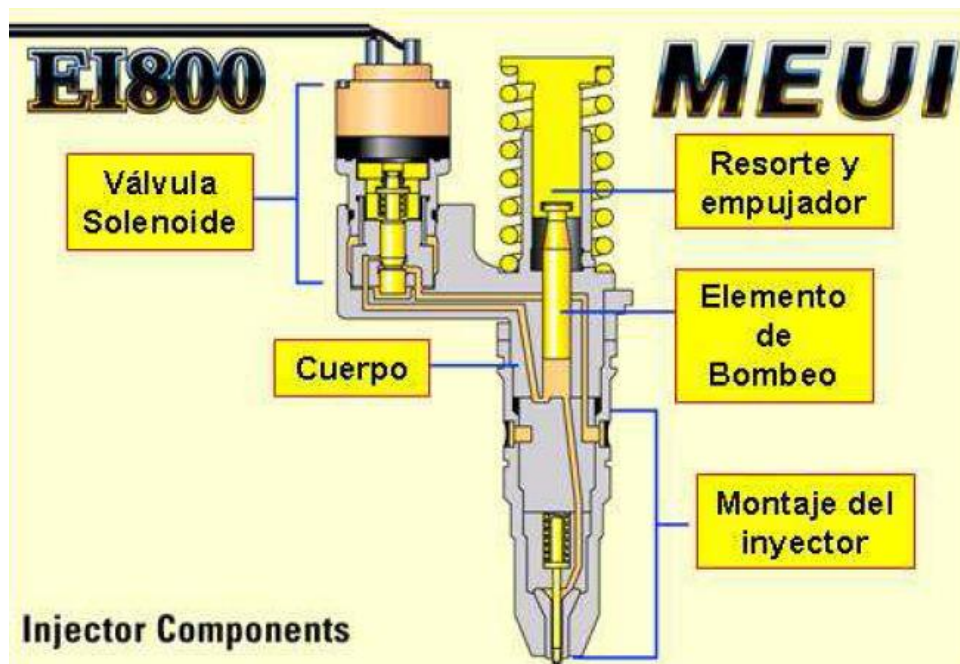


Figura 2.31 Componentes de un inyector EUI
(Merdech, 2013, p.14)

2.5.1.3 Generación de alta presión

En la Figura 2.32 se indica todos los elementos que están encargados de generar la alta presión en el inyector. Los elementos que generan la alta presión son: El cilindro, el embolo y el resorte de reposición.

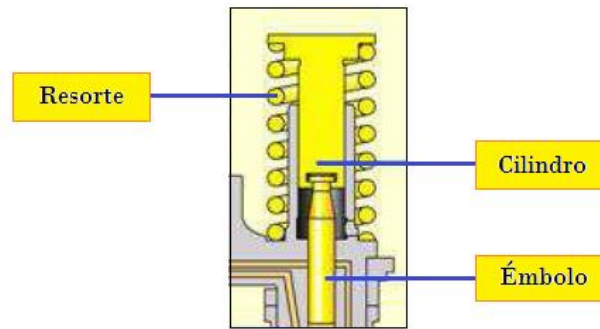


Figura 2.32 Componentes que generan la alta presión
(Merdech, 2013, p.15)

2.5.1.4 Electroválvula o solenoide de alta presión

La electroválvula o solenoide de alta presión tiene la función de establecer el momento adecuado de la inyección y el tiempo que dura la misma. Como se puede observar en la Figura 2.33, los elementos que conforman esta válvula son: el solenoide, el núcleo, el cuerpo de la válvula, la válvula y finalmente el resorte (Delgado et al., 2014, p. 10)

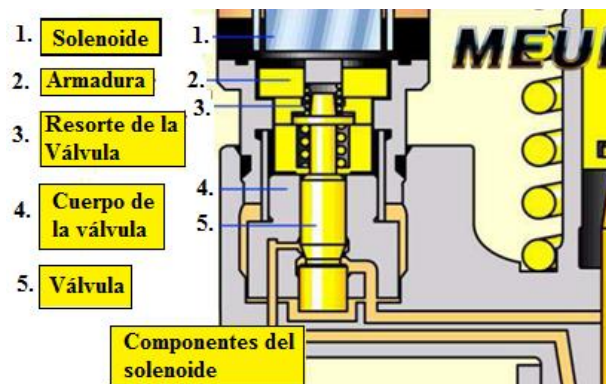


Figura 2.33 Componentes de la electroválvula
(Delgado et al., 2014, p. 10)

2.5.1.5 Conjunto inyector

El inyector distribuye y pulveriza el combustible que se encuentra almacenado en la cámara de combustión, y es así como se efectúa la inyección. Junto al inyector bomba se encuentra adyacente el eje de la válvula inyector mediante una tuerca de fijación (Delgado, Valle, Loaiza, & Lopez, 2014). En la Figura 2.34 se observan los componentes del inyector los cuales, son parte del conjunto que permite la inyección.

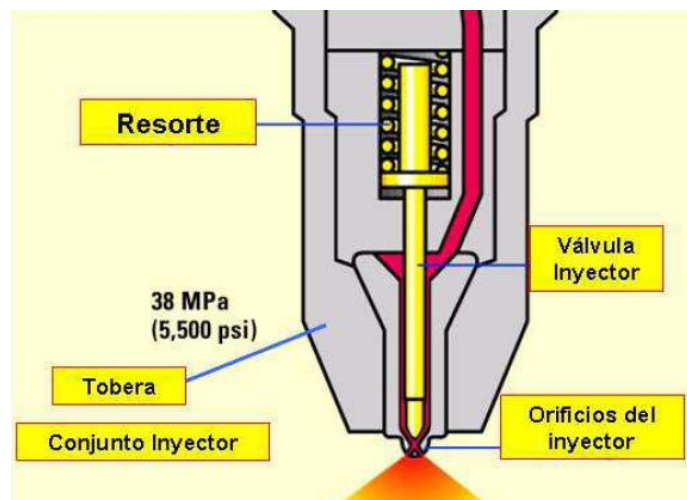


Figura 2.34 Componentes del conjunto inyector.
(Delgado et al., 2014, p. 11)

2.5.2 Funcionamiento de un inyector EUI

De acuerdo a la Figura 2.35, el funcionamiento del inyector EUI, se divide en 4 fases, en cada una de estas, se cumple un proceso diferente, el cual se lo detalla a continuación.

2.5.2.1 Fase de llenado

En la Figura 2.35 (a), indica la fase de llenado del inyector la cual, consiste en que el émbolo (2) es presionado hacia arriba por acción de la fuerza del resorte de

reposición (3). El combustible que se encuentra con una presión baja, fluye a través de los conductos que se localizan dentro del bloque motor hacia la cámara de la electroválvula (6). La electroválvula se encuentra abierta y el combustible llega a través de los canales de circulación hacia la cámara de alta presión (4) (Merdech, 2013, p. 17).

2.5.2.2 Fase de derrame

En la Figura 2.35 (b), el émbolo (2) desciende por motivo del movimiento de la leva (1). La electroválvula se mantiene abierta y el combustible es presionado por la acción del émbolo a través del conducto de retorno hacia la cámara de baja presión de combustible (Merdech, 2013, p. 17).

2.5.2.3 Fase de inyección

En la Figura 2.35 (c), La ECM envía una corriente eléctrica directo a la bobina del electroimán (7), por efecto de esto, la aguja de la electroválvula desciende al asiento (8) y corta la comunicación entre la cámara de alta presión y la cámara de baja presión. El efecto del cierre de la aguja invierte la corriente de la bobina y de esta manera comienza el suministro real de la inyección.

La presión del combustible que se encuentra en la cámara de alta presión aumenta por efecto del movimiento de la leva e igualmente lo hace la presión en el inyector a un máximo de 300 bar, a esta presión, se eleva la aguja del inyector (9) y el combustible es inyectado en la cámara de combustión (Merdech, 2013, p. 17).

2.5.2.4 Fase de reducción de la presión

En la Figura 2.35 (d), la bobina se desconecta y después de un periodo de tiempo la electroválvula se abre y conecta el paso entre la cámara de alta presión y la

cámara de baja presión. La presión disminuye por debajo del inyector y la aguja del inyector se cerrara, y así, finalizara el proceso de inyección. El combustible que se mantiene en la cámara de baja presión, es presionado por el émbolo hacia el conducto de retorno (Merdech, 2013, p. 17).

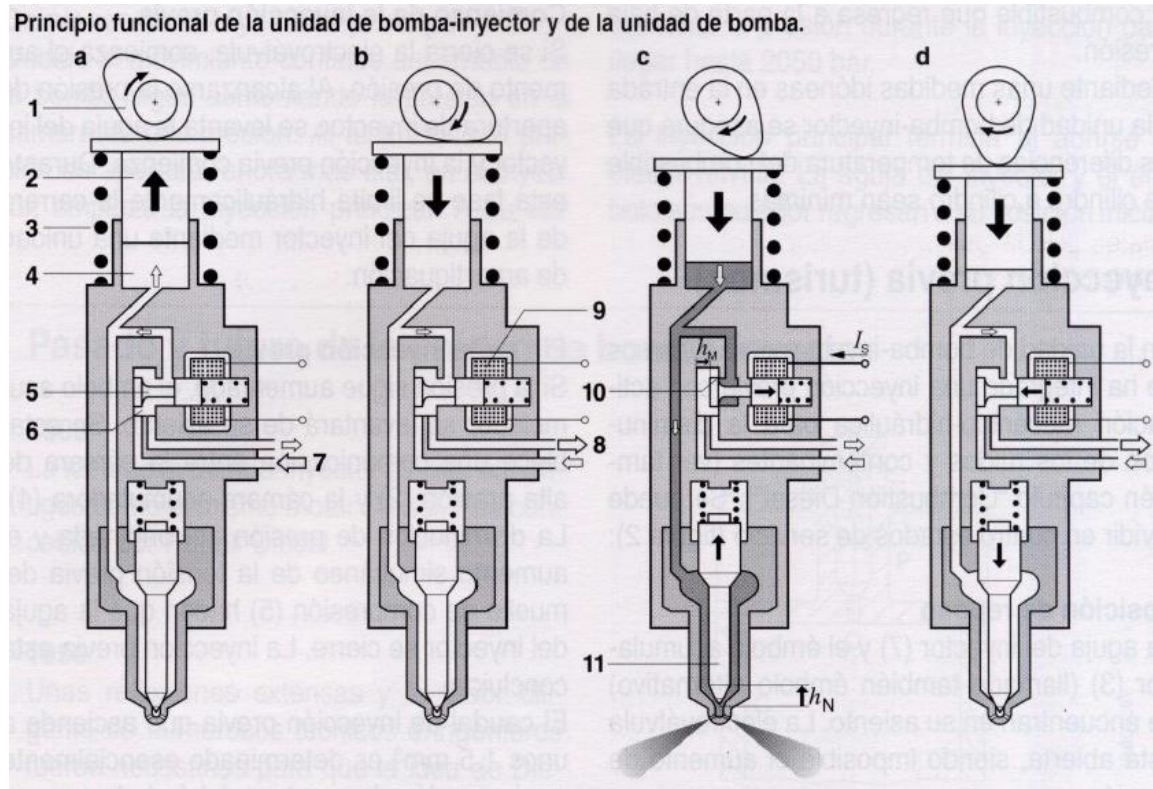


Figura 2.35 Fases de funcionamiento de un inyector EUI
(Merdech, 2013, p. 16)

2.5.3 Bomba de Transferencia de Combustible

Extrae combustible del tanque a través del filtro primario y lo envía a los inyectores. La bomba de transferencia de combustible tiene una válvula de alivio para proteger los componentes del sistema de combustible de la presión excesiva.

La válvula de alivio tiene una graduación mayor que el regulador de presión del combustible, la bomba de transferencia suministra el combustible a los inyectores desde el tanque y lo presuriza entre 60 y 125 Psi (Caterpillar, 2012, p. 60). La

Figura 2.36 indica las partes de una bomba de transferencia de combustible y de cómo estas ubicadas dentro de esta.



Figura 2.36 Bomba de Transferencia de Combustible
(Caterpillar, 2012, p. 60)

2.5.4 Módulo de Control Electrónico (ECM)

La Figura 2.37 indica el cerebro de un motor electrónico, que funciona como un regulador y computadora del sistema de combustible. El ECM recibe todas las señales provenientes de los sensores y activa los solenoides del inyector para controlar la sincronización y la velocidad del motor (Caterpillar, 2012, p. 55). La ECM tiene tres funciones principales:

- Suministrar energía a componentes, sensores e inyectores.
- Controla las entradas de los sensores y de los interruptores
- Controla la velocidad y la potencia del motor.

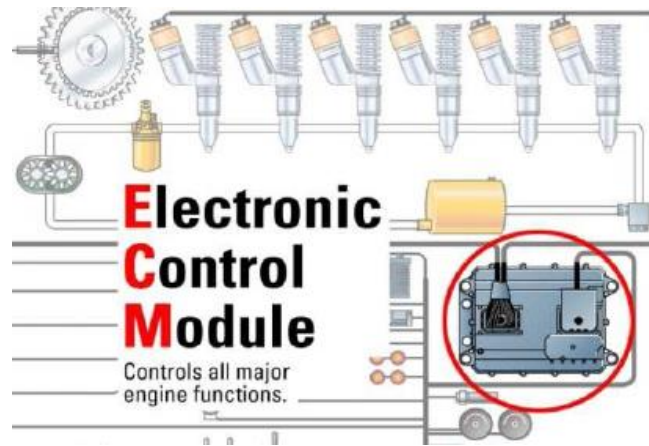


Figura 2.37 ECM (Módulo de Control Electrónico)
(Romero, 2011, p. 22)

2.5.5 Sensores del sistema EUI

En el diagrama de la Figura 2.38, indica los diferentes tipos de sensores del sistema EUI. Estos sensores como ya es de conocimiento general, convierten y detectan un cambio de presión, temperatura o un movimiento mecánico en una señal electrónica, que es enviada hacia la ECM mediante pulsos eléctricos, es por eso que los sensores inspeccionan todas las funciones del motor.

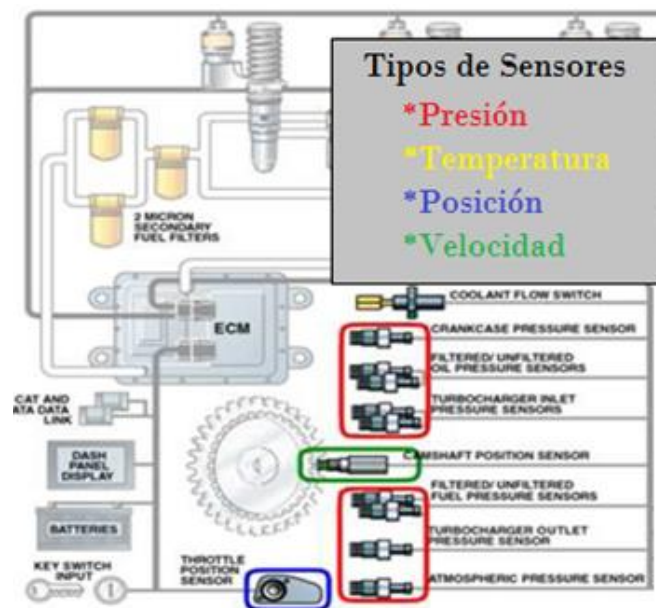


Figura 2.38 Sensores del Sistema EUI
(Romero, 2011, p. 26)

2.5.5.1 Sensor de posición del acelerador

El sensor de posición del acelerador que se representa en la Figura 2.39, está ubicado junto al pedal del acelerador y tiene la función de indicar la velocidad requerida por el operario y enviarla a la ECM en forma de señal de modulación de duración de impulsos (PWM). El voltaje que recibe la ECM es de 8 voltios (Casimiro, 2011, p.5)

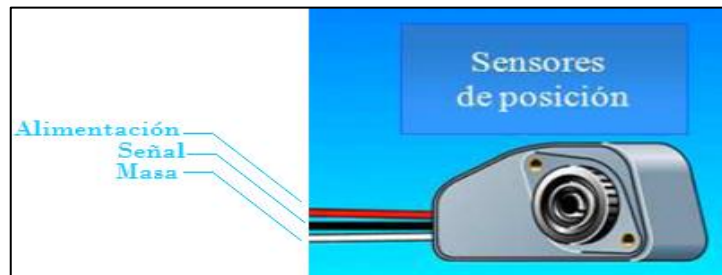


Figura 2.39 Sensor de posición del acelerador
(Casimiro, 2011, p.5)

2.5.5.2 Sensor de velocidad/sincronización

El sensor de velocidad que se muestra en la Figura 2.40, es de tipo magnético que provee una frecuencia igual a la velocidad del motor. Tienen dos funciones la primera es detectar la velocidad y la segunda sincronizar el motor. Estos sensores se ubican en la caja delantera en la parte inferior de la rueda de los engranajes de sincronización (Casimiro, 2011, p.6).



Figura 2.40 Sensor de velocidad/sincronización
(Casimiro, 2011, p.6)

2.5.5.3 Sensor de presión de salida del turbocompresor

La función principal de este sensor es activar el control de la relación de combustible, lo que esto ocasiona que disminuya el humo, las emisiones y se conserve el funcionamiento correcto del motor durante la aceleración. Por otro lado, este sensor manipula la presión atmosférica y la velocidad del motor para tener una buena relación de combustible (Campusano, 2013, p.24).

2.5.5.4 Sensor de presión atmosférica

Este sensor cumple cuatro funciones importantes dentro del motor que se detallan a continuación: recompensación automática de la altura y del filtro con una disminución máxima de 24% y de 20% respectivamente, determina la presión para las lecturas con el manómetro y sirve de referencia para poder calibrar el sensor de presión (Bosch, 2009, p. 35).

2.5.5.5 Sensor de presión de aceite

Es un sensor analógico de tres cables, que envía una señal de voltaje a la ECM para indicarle la presión de aceite del motor; la ECM le envía un voltaje de 5 voltio, para que la presión de aceite este fuera del límite normal, la ECM disminuye la potencia del motor y de igual manera envía una señal, la cual le advierte al operador de este problema (Casimiro, 2011, p. 7).

Sensor de presión



Figura 2.41 Sensor de presión
(Casimiro, 2011, p.5)

2.5.5.6 Sensores de temperatura del aire de entrada

La ECM utiliza este sensor para evitar daños en el motor debido a temperaturas excesivas, es decir, este tipo de sensor controla la temperatura del aire de entrada. En caso de detectar una elevada temperatura, implica tener temperaturas sumamente elevadas en el múltiple de escape y en el turbocompresor (Romero, 2011, p. 28)

2.5.5.7 Sensor de temperatura del refrigerante

Su ubicación está delante del motor justo debajo del termostato; este sensor permite que la ECM establezca la sincronización adecuada de la inyección. La temperatura del refrigerante se reduce, la ECM ejecuta la acción de “modalidad fría” y permite retrasar la inyección para incrementar la rentabilidad del motor en un clima frío, de modo similar pasa en el momento que la temperatura aumenta, el sensor del refrigerante protege al motor y envía la señal a la ECM (Romero, 2011, p. 29).

Sensor de temperatura

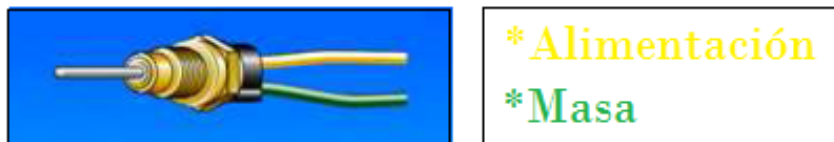


Figura 2.42 Sensor de temperatura
(Casimiro, 2011, p.6)

2.5.6 Actuadores

Al igual que en el sistema de inyección HEUI, los actuadores son dispositivos totalmente mecánicos, que ayudan a proporcionar una fuerza para mover otro dispositivos mecánico. Las fuerzas que permiten realizar este movimiento ya fueron descritas anteriormente, estas fuerzas reciben señales eléctricas de la

ECU y pueden cambiar el funcionamiento del motor (Caterpillar, 2012, p. 54). Como se observa en el diagrama del sistema EUI en la Figura 2.43, se muestran los actuadores que lo componen y el esquema de donde se puede ubicar estos componentes.

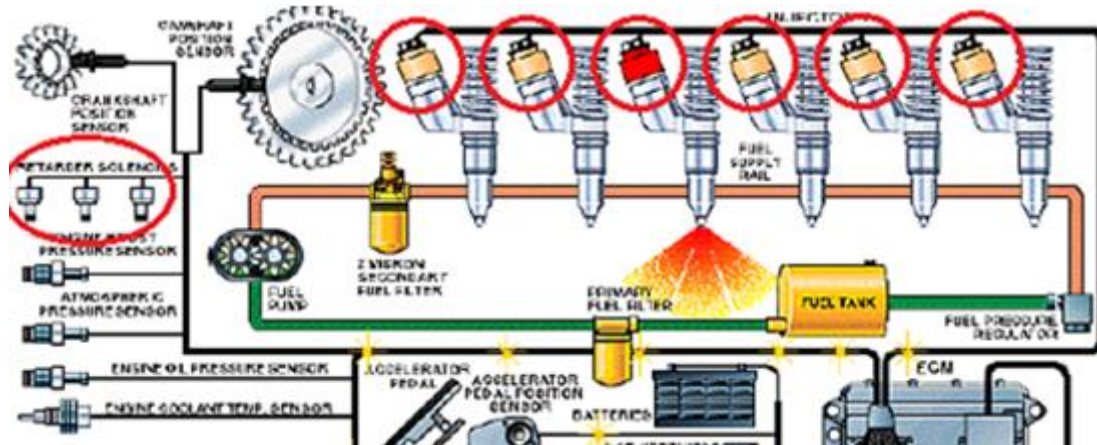


Figura 2.43 Actuadores del Sistema EUI
(Romero, 2011, p. 32)

2.6 Técnicas de recolección de información

Toda la información se podrá recolectar mediante libros de mecánica automotriz referente a maquinaria pesada, a lo que tenga relación con sistemas de inyección en motores Caterpillar. Para obtener datos en tiempo real como valores de presión, volumen, pulsos de la ECM y valores en formas de onda de inyección del motor CAT C7, se opta para la utilización de un scanner (NEXIQ) y de un osciloscopio (OTC).

2.7 Modelación

Es un proceso de descripción de lenguajes mediante un hardware, como una herramienta de modelado y simulación, siendo muy útiles para crear un diseño electrónico antes de su creación física. Por otra parte, en la industria Automotriz son muy utilizados este tipo de software para la creación de productos

automotrices por medio de la automatización de plantas ensambladoras, plantas constructoras, entre otras. Mediante el diseño electrónico- eléctrico previo, se aporta la evolución. En la actualidad se utiliza mucho el uso de lenguajes a nivel de sistemas electrónicos (ESL). Por ejemplo, para procesar señales se utiliza MATLAB en vez de los HDLs. Esto se debe a que MATLAB brinda a los diseñadores ventajas para realizar una interfaz amigable al momento de modelar proyectos con bajo costo de inversión, con una amplia variedad de funciones matemáticas pres desarrollados, y un gran ingenio al momento de graficar y visualizar (MathWorks, 2013)

2.7.1 Tipos de Modelación

En conclusión, los modelos de los sistemas de inyección Diésel que se pueden modelar bajo un software gráfico se pueden clasificar en tres grandes grupos: modelos multidimensionales, modelos cuasi dimensionales y modelos cero-dimensionales (More, 2000, p. 47).

2.7.1.1 Modelo Multidimensional

Este modelo ha evolucionado con el paso del tiempo, hasta llegar a los actuales códigos CFD comerciales, que tienen la capacidad de describir en detalle los fenómenos ocurridos durante la combustión, sin embargo, presentan la desventaja de ser sensibles a los sub-modelos utilizados, por lo cual realizar este tipo de modelado con lleva mayor tiempo de simulación, por tal motivo son menos eficientes desde un punto de vista operativo (More, 2000, p. 46).

2.7.1.2 Modelo cero-dimensional

Este tipo de modelo es más sencillos y más eficientes a la hora de computarizar los parámetros de funcionamiento del motor, sin embargo no logran describir en

su totalidad los subprocesos que se presentan en el proceso de combustión Diésel, de igual manera, no presentan la facilidad de calcular las emisiones de contaminantes en el motor. Esta clase de modelo se basa en la descripción de un modelo matemático referente a varios tipos de leyes preestablecidas (More, 2000, p. 48).

2.7.1.3 Modelos cuasi-dimensionales

Estos modelos permiten calcular los parámetros de funcionamiento del motor de una manera mucho más sencilla, en comparación con los modelos cero-dimensionales, estos modelos poseen la capacidad de calcular las emisiones del motor. Sin embargo, presentan la desventaja que es necesario ajustar los coeficientes con resultados experimentales por las grandes simplificaciones que requieren (More, 2000, p. 49).

2.8 Simulación

Los simuladores de sistemas de inyección diesel se da a conocer como un material didáctico, que permite generar y visualizar proyectos de diferente índole lo más cercano a la realidad, esto quiere decir, realizar un modelado y un proceso de inyección similar a un motor de manera directa, lo cual todo esto facilita tener una mejor comprensión y su correcta manipulación (Milton, 2003, p. 52).

2.9 Software a utilizar

Para la elaboración de la modelación y simulación de los inyectores HEUI se utilizara el software de MATLAB. El cual viene siendo una de las herramientas más sofisticadas de computación disponibles para resolver problemas matemáticos. Cada uno de estos permite efectuar cálculos matemáticos sencillos, pero se diferencian en el manejo de procesos matemáticos complejos como la

utilización de matrices. MATLAB es sumamente superior en cálculos en los que involucren matrices, esta clase de programas son calculadoras sofisticadas que tienen como base la computadora. Este software realiza muchas tareas de cálculos, a la vez, especialmente en proyectos relacionados con matrices y graficas con una simulación de los mismos en un solo programa.

2.10 Contaminación Ambiental

La contaminación ambiental es uno de los factores más problemáticos de los motores diésel en general y así un gran problema nacional que se encuentra en la gran mayoría de ciudades de nuestro país, al afectar la salud de las personas expuestas a las sustancias toxicas que generan este tipo de motores como es: el NO_x , CO₂ y PM (material particulado), que se encuentran en el aire, emitidos por todos los tipos de carburantes y motores diésel que se genera, únicamente por el resultado de la inflamación de combustibles fósiles de pésima calidad, consumidas por vehículos diésel de carga pesada o transporte público, en su funcionamiento, y un mal mantenimiento de todo el conjunto de inyección por lo cual nos lleva a analizar posibles alternativas de solución para la gran problemática de la contaminación ambiental, mediante el uso de biocombustibles para eliminar porcentualmente la contaminación creada de este tipo de motores (Orozco et al., 2003, p. 125).

Desde el punto de vista ambiental se debe considerar la cantidad y calidad de los combustibles que se comercializan en el país, para determinar el total de la contaminación ambiental. Estudios muestran que más del 50% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) son ocasionadas por el transporte, lo que permite identificar al transporte terrestre como el de mayor impacto ambiental en el Ecuador (Corral, Guayanlema, e Izurieta, 2013, p. 3).

CAPÍTULO III

3. DESARROLLO DE LA PROPUESTA

3.1 Diagnóstico del motor Caterpillar C7

El desmontaje del motor se realiza por partes; por lo cual, se informa que al momento de recibirlo se encontraba totalmente desarmado, y con impurezas debido al tiempo que se estaba en abandono. Por este motivo se recomienda realizar una limpieza total del motor y de cada uno de los componentes para tener los componentes impecables.

El sistema de refrigeración motor no constaba en la entrega del motor y se hizo la adquisición del radiador, reservorio y tuberías de paso de agua. Lo referente al sistema de aire, no se realizó la instalación debido al gasto que generaba la compra de tanques de aire, cañerías y todo lo relacionado con este sistema, es por esto que no se realizó el montaje del compresor de aire.

El cableado eléctrico no constaba en la entrega del motor por lo que se vio la manera más factible de implementar otro sistema de cables apto para este motor CAT C7. Otro de los componentes que no se adjuntó al motor fue el depósito de combustible, el mismo, que tuvo que ser reemplazado por otro tanque y fue acoplado a las necesidades del motor.

3.1.1 Bloque Motor

El bloque motor que se indica en la Figura 3.1, es una de las partes principales del motor, no presenta daños ni rupturas, ya que en él, se sitúan los componentes que constituyen el motor, (pistones, camisas de cilindros, cigüeñal, árbol de levas, cojinetes, culata) los cuales, están en constante movimiento en el interior del bloque motor y recibiendo grandes temperaturas.



Figura 3.1 Bloque Motor

3.1.2 Culata o Cabezote

La culata que se observa en la Figura 3.2, es otra de las partes principales que conforman el motor; en él se producen grandes movimientos con sus componentes internos y al mismo tiempo, estos están sometidos a grandes temperaturas; no presenta daños ni fugas lo que puede ocasionar anomalías en el funcionamiento del motor. Cabe destacar, que sus componentes internos como balancines, muelles, asientos de válvulas, válvulas, varillas de accionamiento se encuentran en perfectas condiciones y cumplen su función correctamente.



Figura 3.2 Culata o Cabezote

3.1.3 Pistón

La Figura 3.3 indica el pistón del motor, el cual, está sometido a grandes temperaturas, debido a estos grandes esfuerzos, presentan en su parte superior

(cámara de combustión), cantidades de hollín producidas por el proceso de combustión. Los anillos del pistón se encuentran en perfectas condiciones y no presentan daños que representen un reemplazo de estos.



Figura 3.3 Pistón

3.1.4 Biela

La biela que se muestra en la Figura 3.4, juntamente con el pistón, presenta un movimiento constante en el interior del cabezote y también se somete a grandes temperaturas debido a las carreras que realizan en los tiempos de funcionamiento del motor, no se observa desgaste ni algún tipo de dobladura o ruptura lo que dificulte el funcionamiento correcto del motor.



Figura 3.4 Biela

3.1.5 Cojinetes de Biela

El cojinete que se observa en la figura 3.5, presenta un mínimo desgaste en su superficie debido al rozamiento que este tiene con el codo de biela del cigüeñal;

este desgaste se origina a casusa de la falta de lubricación que existe entre los dos componentes. Siendo el desgaste muy superficial, no amerita un reemplazo de todos los cojinetes de biela, solo permite brindar una rectificación leve sobre la superficie.

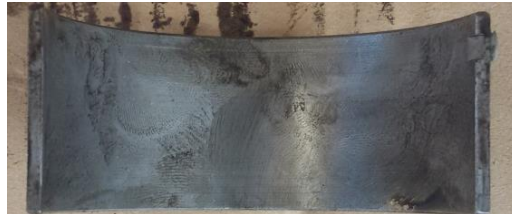


Figura 3.5: Cojinetes de Biela

3.1.6 Bulón o Pasador

En la Figura 3.6 se observa el bulón o pasador que permite acoplar el pistón con la biela, lo que permite que se dé el movimiento libre al pistón, no presenta desgaste que signifique un reemplazo del mismo, lo cual quiere decir que aún tiene vida útil por un largo tiempo.



Figura 3.6: Bulón o Pasador

3.1.7 Cigüeñal

El cigüeñal que se indica en la Figura 3.7, es un componente giratorio que se encuentra a grandes revoluciones y permite el movimiento rectilíneo de los

pistones. Este componente presenta un ligero desgaste en 4 de los 6 codos de biela, lo que no permite el reemplazo del cigüeñal. Es aconsejable aplicar una corrección superficial con ayuda de una lija para eliminar rayaduras que se originan por efecto de impurezas existentes entre la bancada y el cigüeñal. El retén del cigüeñal no está en buen estado por lo que a merita ser reemplazado.



Figura 3.7 Cigüeñal

3.1.8 Cojinetes de Bancada

Los cojinetes que se indican en la Figura 3.8, reciben todo el peso del cigüeñal y por lo tanto sufren desgaste con el rozamiento que este provoca al tener un giro a elevadas revoluciones. Por lo tanto el desgaste es mínimo por lo que no permiten ser reemplazados.



Figura 3.8 Cojinetes de bancada

3.1.9 Árbol de levas

El árbol de levas que se indica en la Figura 3.9 es un eje rotatorio que mueve una o más levas, no presenta desgaste en sus levas debido a la buena lubricación que

existe, por lo cual, no es aconsejable un reemplazo. El retén del árbol de levas no presenta desgaste lo que ocasione tener fugas de aceite en su funcionamiento.



Figura 3.9 Árbol de Levas

3.1.10 Bomba de Alta Presión

La bomba de alta presión que se muestra en la Figura 3.10, cumple la función de generar la alta presión y enviarla hacia los inyectores, la bomba de alta presión, no presenta fugas en su funcionamiento, por lo que su trabajo lo realiza correctamente y no da a lugar a una reparación o reemplazo de la bomba y de igual manera de sus partes internas.



Figura 3.10 Bomba de alta presión

3.1.11 Cañerías de paso de combustible

Las cañerías permiten el paso de combustible desde la bomba, a los filtros inyectores y viceversa, en su diagnóstico, no se detectó fugas por lo cual, el

combustible circula correctamente hasta los inyectores y de igual manera el retorno de combustible hacia el tanque lo realiza sin inconvenientes.

3.2. Montaje del Motor Caterpillar C7

El armado del motor debe ser de lo más de impecable posible, especialmente en las partes que tienen rozamiento unas con otras, estos componentes deben estar bien limpios y con suficiente lubricante para evitar que se remuerdan hasta el momento que se coloque el aceite lubricante.

Para el montaje de motor otro punto importante a tener en cuenta es utilizar ropa de trabajo adecuada como un overol y botas, de igual manera tener la herramienta apropiada para tener un trabajo eficaz y sin accidentes.

3.2.1 Limpieza de las partes del Motor Caterpillar C7

Antes de proceder con el armado del motor, debemos tener en cuenta que cada una de sus partes estén totalmente limpias de grasa, o residuos que puedan lastimar la superficie de los componentes giratorios, como cojinetes de biela y de bancada, los codos del cigüeñal deben estar sin impurezas, es decir debe existir una limpieza bien meticulosa de todos los componentes.

3.2.2 Lubricación del Bloque motor

La lubricación se hace con la finalidad de obtener una fina capa de aceite entre los componentes que van asentados en el bloque motor. Las partes que se montan en el bloque motor se debe colocar con suficiente aceite para evitar que no se remuerdan hasta el momento de colocar el aceite entre si durante el funcionamiento del motor. El lubricante empleado en el motor es el aceite Amalie 15W – 40, utilizado para motores diésel turbo-alimentados de gran potencia que operan en circunstancias muy extremas.



Figura 3.11 Aceite Amalie 15W – 40

3.2.3 Montaje de los Pistones en el Bloque Motor

En la Figura 3.12 se indica el montaje del pistón en el bloque motor, para su montaje, se debe tener en cuenta que los anillos del pistón estén en la posición correcta, es decir, que las puntas de inicio y fin de los anillos deben estar a un ángulo de aproximadamente de 45°; las ranuras de los anillos no deben estar en línea recta.

Con un prensa rines, se procede a introducir cada uno de los pistones en su respectivas camisas que se encuentran encajadas en el bloque motor siguiendo con una numeración correcta.



Figura 3.12. Montaje del pistón en el bloque motor

3.2.4 Montaje del cigüeñal en el bloque motor

Se procede a montar el cigüeñal en el bloque motor, teniendo la debida precaución, una vez asentado correctamente, se coloca una varita de “plastigage” la cual, sirve para medir la holgura que debe de existir entre el cigüeñal y la bancada. La holgura que debe de tener con las siete bancadas ajustadas con el par de apriete adecuado es de $0.51mm$ (Caterpillar, 2010). Una vez ya obtenido la holgura adecuada, se procede a realizar una segunda limpieza del cigüeñal y de las bancadas, con el fin de quitar las impurezas que se pueden a ver suscitado en la medición de la holgura. Se vuelve a montar el cigüeñal y con el uso de un torquimetro se ajusta las 7 bancadas partiendo desde el centro hacia los extremos.

Finalmente se asegura que el cigüeñal pueda girar correctamente, si esto no sucede como es debido, se procede aflojar las bancadas y empezar nuevamente con la medición hasta que el cigüeñal tenga su giro normal. En la Figura 3.13 se muestra la medición con el “plastigage” en el cigüeñal y la medida que debe tener.

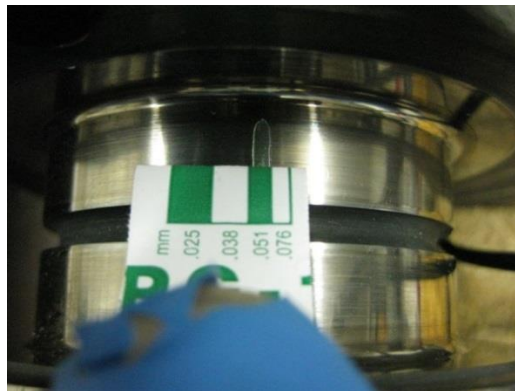


Figura 3.13 Medición con Plastigage la holgura entre el cigüeñal y la bancada

3.2.5 Colocación de la bomba de aceite

Después de verificar que el cigüeñal tenga su giro correcto, se coloca la bomba de aceite en el lugar que corresponda, se realiza el ajuste respectivo a todos los pernos que la sujetan al bloque motor con un dado #13, para finalizar, se verifica que el ajuste este correcto y no presente ningún movimiento.

3.2.6 Montaje del cárter

Se verifica que el cárter esté libre de polvo y de aceite, una vez que se encuentre limpio, se coloca silicona en toda su superficie donde va a ir asentado. Esto se realiza con el fin de que exista una mayor fijación entre el cárter y el bloque motor. Los pernos y el tapón de aceite deben ser ajustados correctamente para que no existan fugas por motivo que en el cárter se almacena todo el aceite con el que funciona el motor.

3.2.7 Montaje del cabezote o culata

Se toma en cuenta que para realizar el montaje del cabezote, este debe ir acompañado de su respectivo empaque, esto se realiza para evitar fugas de aceite al momento que se encuentre el motor en funcionamiento. Luego de verificar que el cabezote esté limpio de aceite, grasa e impurezas, se coloca silicona en todo el contorno del empaque para tener una mayor fijación con el bloque motor.

El cabezote siendo un elemento suficientemente pesado imposible para la fuerza humana, es recomendable utilizar una pluma hidráulica, la cual permite levantar el cabezote con mayor facilidad para colocarlo en el lugar correspondiente del bloque motor. Se debe tomar en cuenta antes de asentar el cabezote que el empaque no se deslice y este en el lugar correcto. Finalmente, una vez asentado el cabezote, se coloca todos los pernos para dar el torque adecuado.

3.2.8 Montaje del colector de admisión

Una vez montada y ajustada la culata, se instala el colector de admisión de igual manera con su respectivo empaque. Todo esto permite que el aire del exterior pueda circular a través de los canales de la culata hasta cada uno de los cilindros, esto ocasiona que al mezclarse el aire con el combustible se produzca la

combustión. Por último se verifica que no existan fugas que ocasionen la pérdida de potencia en el motor.

3.2.9 Montaje del múltiple de escape

Se instala el múltiple de escape de igual manera con su respectivo empaque. El empaque se debe colocar con suficiente silicona en toda la superficie que está en contacto con los conductos de escape del bloque motor y a su misma vez la superficie que está en contacto con el múltiple de escape, esto permite que no existan fugas de los gases quemados producidos por la combustión. Una vez que se encuentra colocado el empaque, se procede a montar el múltiple de escape y ajustar todos los pernos para que se encuentre debidamente fijado con el bloque motor.

3.2.10 Montaje del turbocompresor y del tubo de escape

Antes de realizar el montaje se debe tomar en cuenta varios aspectos entre ellos está que los sistemas de toma/salida del motor deben estar sin residuos de aceite, polvo, y otros restos. Después de verificar los aspectos antes mencionados, se procede a montar el turbo en el lugar que corresponda haciendo que coincida todas las tomas de entrada y salida.

Inmediatamente de verificar que el turbo este instalado correctamente, se coloca el tubo de escape a la salida de los gases del turbocompresor, este debe estar bien colocado y sujeto para evitar la vibración del motor, de igual manera se debe tomar en cuenta que los gases de escape deben salir por encima del motor, es decir, la boca del tubo de escape debe estar a dos metros de altura desde el suelo. Esto ayuda a reducir la inhalación de estos gases por parte de las personas que se encuentran alrededor del motor.

3.2.11 Instalación del sistema de refrigeración

Luego de tener todo el conjunto motor armado, se procede a instalar el sistema de refrigeración, se empieza por colocar la bomba de agua, mangueras de paso de agua, radiador y ventilador, este último debe tener una protección adecuada para evitar posibles accidentes que se puedan presentar.

Al final que se encuentre completamente instalado el sistema de refrigeración, se verifica que no existan fugas de agua para evitar un sobrecalentamiento del motor.

3.2.12 Instalación del sistema de inyección de combustible

El sistema de inyección comprende el tanque de combustible, bomba de alta presión, filtros de combustible, cañerías de paso de combustible, bomba de lubricación, regulador de la presión del combustible e inyectores, todos estos componentes deben ser instalados correctamente, para que circule correctamente el combustible desde el tanque hasta llegar a los inyectores para así lograr inyectar el combustible.

3.2.13 Instalación del sistema eléctrico

Para instalar los cables que conforman el sistema eléctrico, se toma como guía el diagrama eléctrico correspondiente al motor CAT C7, que indica la manera de cómo va conectado el cableado tanto al tablero de instrumentos, a la ECM, a los diferentes sensores y finalmente a los inyectores.

Para tener una correcta instalación del sistema eléctrico, se necesita la ayuda de un profesional entendido en sistema eléctrico de motores que permita realizar todas las conexiones del cable para que el motor pueda funcionar normalmente junto con el tablero de instrumentos.

3.3 Modelado del inyector HEUI

El modelado del inyector se lo realiza mediante modelos matemáticos, que se constituyen en la manera más aconsejable para el desarrollo de control de procesos. Los modelos que se realizan mediante fórmulas matemáticas investigan el comportamiento del sistema con más fidelidad.

3.3.1 El solenoide

El solenoide HEUI tiene características similares en comparación con el solenoide CRDi. La única diferencia importante se encuentra en la línea de dirección de la presión efectuada sobre el émbolo del solenoide. En el sistema CRDi, la presión permite la apertura de la válvula del solenoide, mientras que en el sistema HEUI pasa todo lo contrario.

Como se observa en la Figura 3.14 la línea de presión no permite el paso, es decir, obstaculiza la apertura de la válvula solenoide.

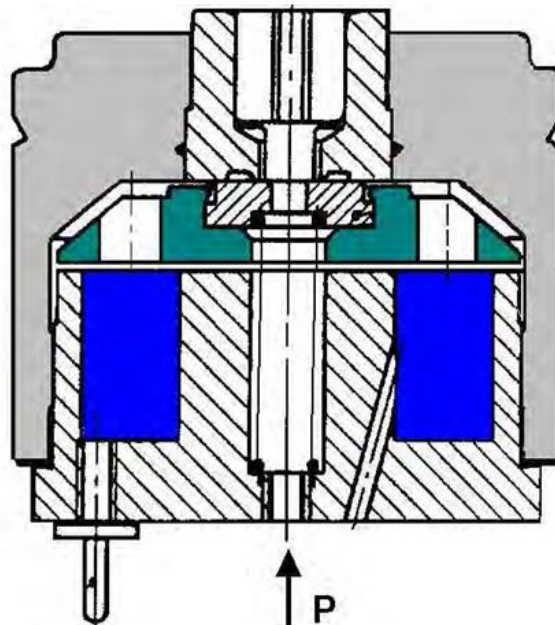


Figura 3.14. Esquema del solenoide HEUI
(Tran, 2003, p. 57)

Entonces, la diferencia localizada entre ambos casos permite que haya un cambio en el modelo del sistema HEUI solenoide y es que el signo del equilibrio de fuerzas cambio de positivo a negativo, como podemos ver en la ecuación [3.1].

$$m_1 \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = K_f \cdot i + m_1 g - P_L S_1 - k_1 \cdot (x + x_0) - f_1 \cdot \frac{dx}{dt} \quad [3.1]$$

Dónde:

m = masa del solenoide

d = diámetro del émbolo del solenoide

x = desplazamiento del solenoide

t = Tiempo

K_f = Constante de fuerza del solenoide

i = corriente que circula por la bobina

g = aceleración gravitacional

P_L = Presión

S = Área de la sección transversal

k_1 = rigidez del resorte

x_0 = Precarga del muelle del solenoide

f_1 = coeficiente de fricción

3.3.2 Componentes hidráulicos

El componente hidráulico del sistema HEUI, es mucho más complejo que el del sistema CRDi, por lo que dispone de válvulas y un dispositivo que ayuda a incrementar la presión hasta nueve veces. Esto permite tener una presión de inyección sumamente elevada, y el combustible de entrada lo mantiene a una presión normal de funcionamiento, lo que evita el empleo de una bomba de alta presión que necesita de energía y al mismo tiempo puede ocasionar fugas en la inyección de combustible.

El componente hidráulico del sistema HEUI se compone de tres partes principales: la válvula hidráulica diferencial (HDV), el intensificador y la aguja de

inyección. Cada uno de estos componentes tiene, independientemente una entrada y una salida, lo que permite consolidar un modelo matemático para cada componente. El modelo de los componentes hidráulicos del sistema HEUI, es un modelo unidimensional, compresible y transitorio, el cual está desarrollado en base a la mecánica de fluidos, e incluye ciertos números de no linealidades, que suplantando singularidades de diseño típicas de un inyector.

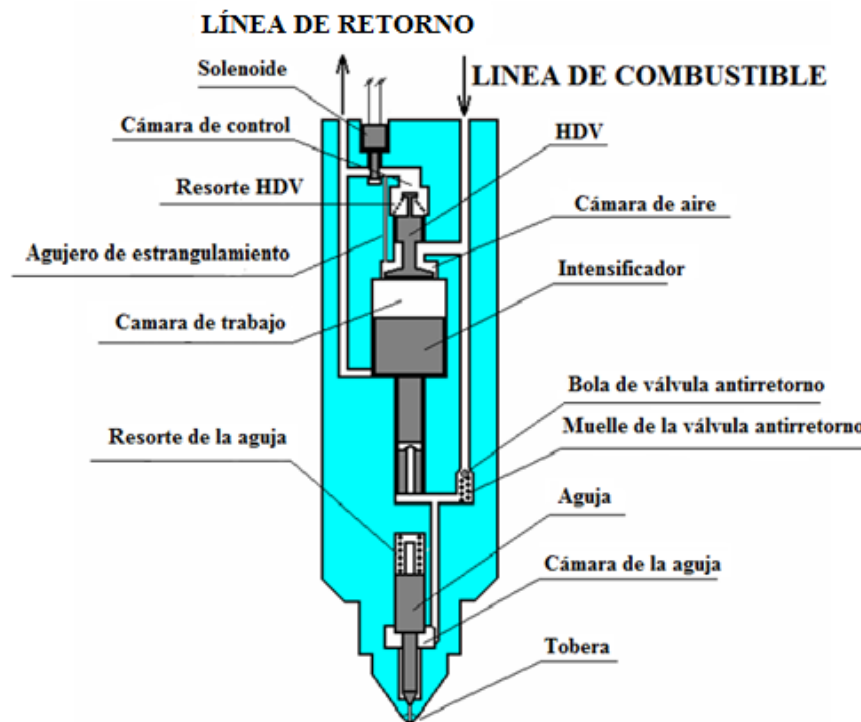


Figura 3.15 Esquema simplificado HEUI
(Tran, 2003, p. 59)

3.3.2.1 Válvula diferencial hidráulica

Al aplicar una corriente a la válvula del solenoide, esta se abre para permitir el paso del combustible desde la cámara de trabajo hacia la válvula de retención, para posteriormente pasar a la cámara de control y finalmente hacia la tubería de retorno. Existe una oposición al flujo por medio de la válvula mariposa, lo que ocasiona que se origine una fuerza hidráulica para que actúe sobre la HDV en dirección del flujo, que mantiene cerrada la HDV con la ayuda del resorte. El flujo de salida permite reducir la presión generada en la cámara de trabajo y hace que

el intensificador ascienda para que inicie la fase de dosificación. El cierre del solenoide permite que el flujo se detenga, lo que ocasiona que la válvula de resorte se abra debido a la diferencia de presión que existe entre la cámara de trabajo y el puerto de entrada. La diferencia de presión entre la entrada y salida de la válvula supere la fuerza del resorte, está válvula de disco procede a la apertura. Una considerable presión, permite que el flujo de la válvula, tome cierta forma de chorro aplicado sobre la cara de la válvula de vástago. El chorro estimula una fuerza de reacción la cual, es igual a la velocidad del combustible con la que fluye; la cámara de paso de ingreso a la válvula de resorte es mucho mayor que el volumen del puerto de apertura (esto es debido a que el movimiento del disco de válvula es muy corto) lo que permite que la velocidad del combustible en el orificio de entrada sea ignorado al existir la comparación con la velocidad del combustible del chorro. El área de orificio es equivalente a la válvula de resorte abierta, gracias al movimiento en dirección axial se presenta en la ecuación [3.2].

$$S_p = \pi \cdot z \cdot \sin \alpha (d - z \cdot \sin \alpha \cos \alpha) \quad [3.2]$$

Dónde:

S_p = Área de la sección transversal

z = Desplazamiento de la HDV

d = Diámetro

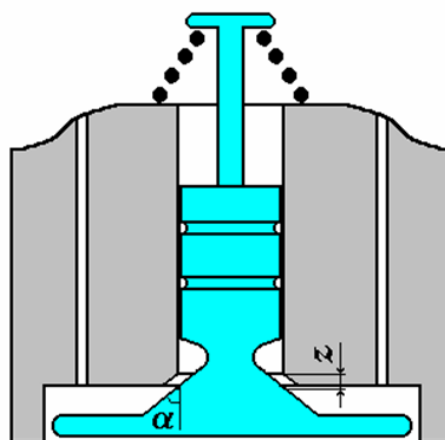


Figura 3.16 Válvula de asiento HEUI
(Tran, 2003, p. 62)

Entonces, la fuerza del flujo del chorro se expresa en la ecuación [3.3].

$$F_1 = \frac{q^2}{K_j S_j} \quad [3.3]$$

Dónde:

F = Fuerza

q = Taza de flujo de inyección

S = Área de la sección transversal

El flujo a través de la válvula de disco se calcula mediante la ecuación [3.4].

$$q = K_j S_j \sqrt{P_L - P_W} \quad [3.4]$$

Dónde:

q = Taza de flujo de inyección

S = Área de la sección trasversal

P = Presión

En la ecuación [3.5] se expresa todas las fuerzas que actúan sobre el disco de válvula de vástago.

$$m_2 \cdot \frac{d^2 z}{dt^2} = P_L \cdot S_{21} + m_2 g - k_2 \cdot (z + z_0) - F_j - S_{22} \cdot P_W - f_2 \cdot \frac{dz}{dt} \quad [3.5]$$

Dónde:

m = Masa de la válvula HDV

d = Diámetro

z = Desplazamiento

t = Tiempo

P = Presión

S_{21} = Área de la sección transversal del lado de la cámara de trabajo de la HDV

S_{22} = Área de la sección transversal del lado de la cámara de aire de la HDV

g = Aceleración gravitacional

k_2 = Rigidez del resorte

z_0 = Precarga del resorte de la HDV

F = Fuerza

f = Coeficiente de fricción

3.3.2.2 Intensificador

Todas las ecuaciones anteriormente examinadas, ilustran hasta qué punto el intensificador de presión podría amplificar. Ellos no se pueden utilizar en el cálculo por que el fenómeno es mucho más complicado con condiciones transitorias. El combustible se comprime en los dos compartimientos extremos del intensificador. Además, hay flujos de entrada y salida de los comportamientos, por ejemplo, el flujo de inyección. Este flujo se produce solo cuando la presión de combustible en la cámara de la aguja, que está conectada directamente al compartimiento de alta presión del intensificador, se intensifica hasta el nivel que supere la fuerza del muelle de la aguja. Al mismo tiempo, el combustible sigue fluyendo en el acumulador de presión en el compartimiento de baja presión.

Sobre la base de estas justificaciones, las ecuaciones aplicadas para el intensificador se escriben como ecuaciones de conservación de masa para ambos compartimientos del intensificador es decir, la cámara de trabajo, la cámara de la aguja y de igual manera la ecuación de movimiento para el propio intensificador.

Cuando la presión en la cámara de trabajo se ha reducido a un cierto nivel, el intensificador comienza a ascender debido a la diferencia de presión entre los dos extremos. El movimiento libera el resorte de la válvula de no retorno, que mantiene a esta válvula cerrada. Se supone que la válvula de no retorno no causa ninguna pérdida de presión, y funciona en su totalidad como una puerta abierta-cerrada.

La ecuación de movimiento para el intensificador se expresa en la ecuación [3.6].

$$m_3 \cdot \frac{d^2y}{dt^2} = P_N \cdot S_{32} + k_3 \cdot (y - y_0) - m_3 g - S_{31} \cdot P_W - f_3 \cdot \frac{dy}{dt} \quad [3.6]$$

Dónde:

m = Masa del intensificador

d = Diámetro

y = Desplazamiento del intensificador

P = Presión

S_{32} = Área transversal de la cámara de alta presión del intensificador

k_3 = Rigidez del resorte

y_0 = Precarga del resorte del intensificador

g = Aceleración gravitacional

S_{31} = Área transversal de la cámara de baja presión del intensificador

f = Coeficiente de fricción

El flujo que entra en la cámara de trabajo a través del orificio de control anular de las causas de válvula de vástago fluya hacia fuera de la línea de retorno a través de la válvula de solenoide y haga el movimiento intensificador y comprimir el combustible en la cámara se expresa en la ecuación [3.7].

$$S_{31} \cdot \frac{dy}{dt} - \frac{V_{w0}}{\beta} \cdot \frac{dP_W}{dt} = K_0 \cdot S_0 \cdot \frac{x}{x_{max}} \cdot \sqrt{P_W - P_R} - K_j \cdot S_j \cdot \frac{z}{z_{max}} \cdot \sqrt{P_L - P_W} \quad [3.7]$$

Dónde:

S_{31} = Área transversal de la cámara de baja presión del intensificador

d = Diámetro

y = Desplazamiento del intensificador

V = Volumen

K_0 = coeficiente de flujo de la HDV a la línea de retorno

S_0 = Área equivalente del orificio de salida de la cámara de trabajo

x = Desplazamiento del émbolo del solenoide

x_{max} = Desplazamiento máximo del émbolo del solenoide.

P = Presión

S = Área de la sección transversal

z = Desplazamiento de la HDV

z_{max} = Desplazamiento máximo de la HDV

El compartimiento de alta presión del intensificador está conectado directamente a la cámara de la aguja a través de un orificio, cuyo diámetro es suficientemente grande como para suponer que el compartimiento de alta presión de la cámara de intensificador y de la aguja puede ser considerado como una cámara unida.

3.3.2.3 Aguja de inyección

Se abre la válvula de retención y permite transmitir la presión hacia la cámara de la aguja desde el puerto de entrada en la fase de medición del intensificador, la presión de la cámara de la aguja y la presión del acumulador, son iguales. En la fase de compresión, la presión asciende, y cuando logra llegar al punto de presión máximo, es cuando se produce la inyección.

La ecuación [3.8] define el movimiento de la aguja mediante el equilibrio de fuerzas.

$$m_4 \cdot \frac{d^2\mu}{dt^2} = P_N \cdot S_4 - m_4 g - k_4 \cdot (\mu + \mu_0) - f_4 \cdot \frac{d\mu}{dt} \quad [3.8]$$

Dónde:

m = Masa de la aguja

d = diámetro

t = Tiempo

u = Desplazamiento de la aguja

μ_0 = Precarga del muelle de la aguja

f = Coeficiente de fricción

La ecuación [3.9] interpreta la conservación de la masa para la cámara de la aguja.

$$S_{31} \cdot \frac{dy}{dt} - \frac{V_{n0}}{\beta} \cdot \frac{dP_N}{dt} = q_U \quad [3.9]$$

Dónde:

S_{31} = Área transversal de la cámara de baja presión del intensificador

d = Diámetro

y = Desplazamiento del intensificador

V = Volumen

q_U = tasa de flujo de inyección

El módulo de volumen cambia según la presión, $\beta = f(P)$ como anteriormente se menciona. También se observa que el módulo de volumen está cambiando según la presión, es decir, $\beta = f(P)$ como se mencionó anteriormente. El módulo de volumen también depende de la temperatura pero no a la presión, por lo que para el cálculo en la cámara de agujas, el efecto de temperatura en el módulo de volumen se ignora.

En la ecuación [3.9], q_u es la tasa de flujo de inyección causada por el combustible comprimido en la cámara de la aguja. En la ecuación [3.10] se representa el flujo a través de los orificios de la boquilla.

$$q_U = K_z \cdot S_5 \cdot \frac{u}{U_{max}} \cdot \sqrt{P_N - P_C} \quad [3.10]$$

Dónde:

q_U = tasa de flujo de inyección

K_z = coeficiente de flujo del flujo de inyección

S_5 = Área efectiva de las boquillas

U_{max} = Desplazamiento máximo de la aguja

P = Presión

Se utiliza un tipo de boquilla de inyector VCO, por lo que se supone que el flujo de inyección en cada posición de la aguja es proporcional a la ecuación [3.11].

$$S_5 \cdot \frac{u}{U_{max}} \quad [3.11]$$

Dónde:

S_5 = Área efectiva de las boquillas

u = Desplazamiento de la aguja

U_{max} = Desplazamiento máximo de la aguja

Además de eso, el valor de la presión en el cilindro se inserta manualmente. También se considera sin cambios durante la inyección porque no hay datos suficientes para la presión del cilindro durante la inyección. Para un modelo futuro, se puede incluir una taza aproximada de la presión del cilindro para proporcionar una diferencia de presión más precisa entre la presión dentro de la cámara de la aguja y el cilindro. En la ecuación [3.12], la cantidad de inyección es la integral de la tasa de flujo de inyección para el período de tiempo de t_0 a t .

$$Q = \int_{t_0}^t q_I \quad [3.12]$$

Dónde:

Q = Cantidad de inyección

t = Tiempo

El caudal volumétrico se calcula según las propiedades del combustible en condiciones estándar (20 ° C, 105 Pa) para obtener la cantidad de suministro de combustible en kg (mg) (Tran, 2003, p. 67).

3.4 Implementación del modelo en simulink

Para poder implementar todo el modelo HEUI en simulink, se procede a construirlo en bloques que consta de cuatro partes principales: solenoide, HDV, intensificador y la aguja. Para la visualización de cada una de las partes del modelo, se procede a conectar un monitor con la salida de cada bloque, de igual manera para observar todo el sistema junto, están conectadas todas las salidas de cada uno de los bloques a un solo monitor.

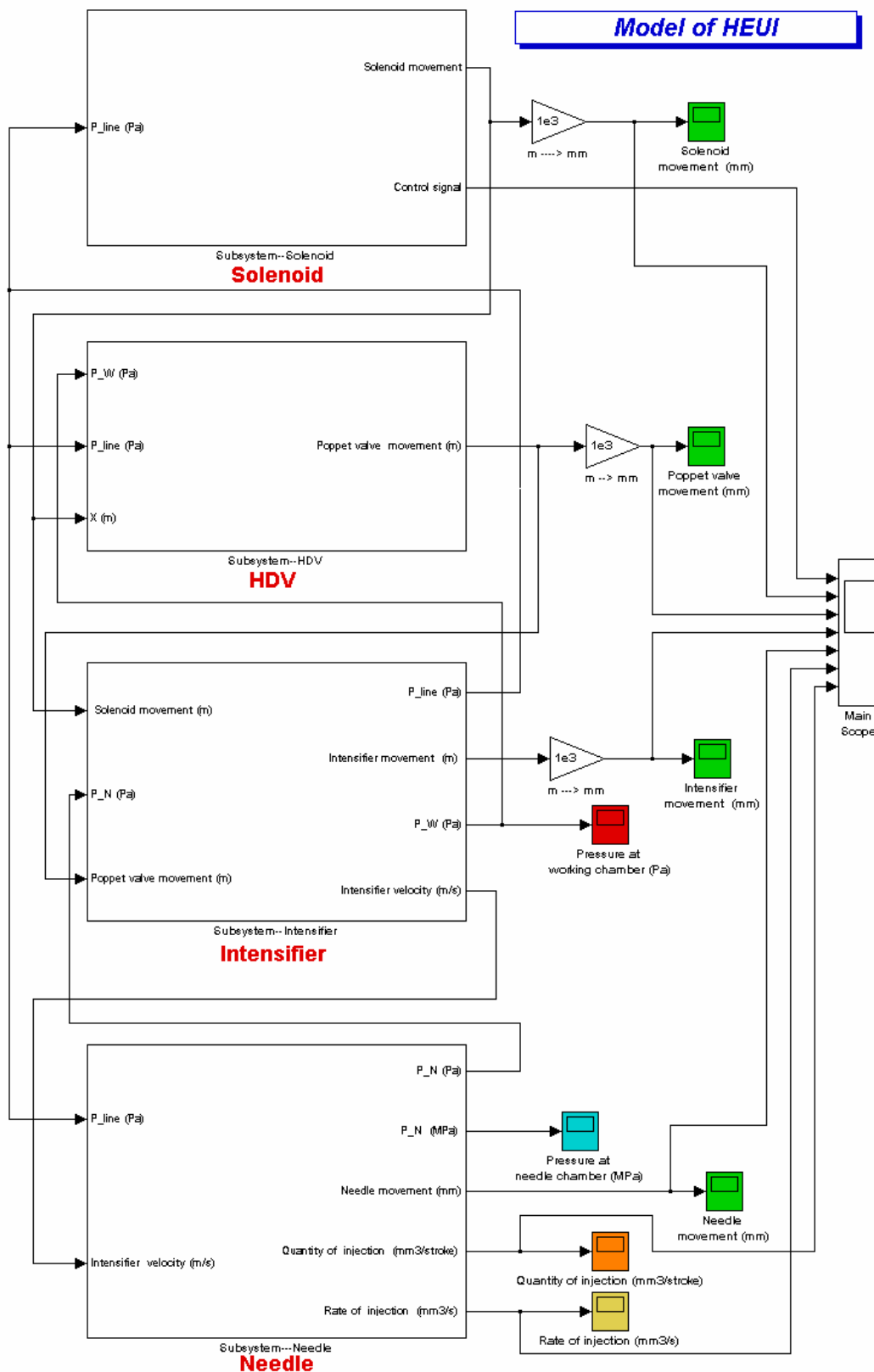


Figura 3.17 Diagrama de bloques del modelo HEUI

3.4.1 Simulación de la señal de control del solenoide

La ECM controla y asegura la cantidad de combustible entregado, modificando el tiempo en que el solenoide permanece energizado, este espacio de tiempo se lo llama “duración” y es calculado por la ECM, que permite tener la cantidad correcta de combustible.

En la Figura 3.18, se muestra la señal de control del solenoide al momento que la ECM envía el voltaje de 70 V, correspondiente al periodo de máximo rendimiento del motor, y al instante en que el módulo retira dicho voltaje.

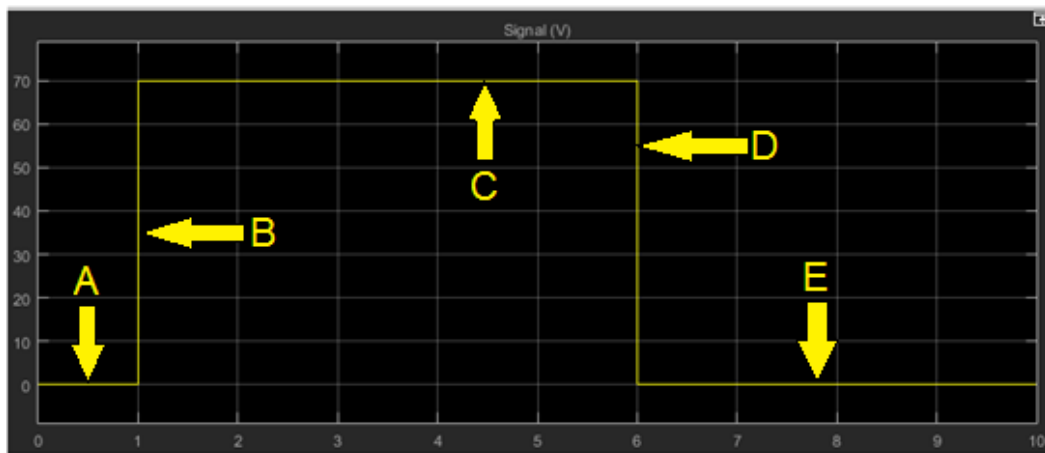


Figura 3.18 Señal de control del solenoide

En la Tabla 3.1, se expone de una manera clara, que es lo que sucede en cada uno de los parámetros de la señal de control del solenoide al momento en que la ECM envía los 70 V.

Tabla 3.1 Parámetros de la señal de control del solenoide

Parámetro de señal	Descripción
A	Tiempo en que el solenoide no está energizado
B	Voltaje máximo que llega al solenoide para ser energizado (70V)
C	Tiempo que permanece energizado el solenoide (5ms).
D	Reducción del nivel de la corriente.
E	Tiempo en que el solenoide vuelve a no estar energizado.

- **Parámetro B.** Punto en el cual la ECM envía el voltaje de 70V al solenoide, el cual, crea un fuerte campo magnético logrando atraer la armadura que se encuentra en el punto más lejano del solenoide, esto permite levantar a la válvula poppet de su lugar de entrada, y la envía contra la fuerza del resorte.
- **Parámetro D.** La ECM después de un tiempo de 5ms, reduce el voltaje y al mismo tiempo logra disminuir el calor existente en el solenoide para extender la vida del mismo. La válvula aún sigue estando contra la fuerza del resorte.

3.4.2 Simulación del movimiento del émbolo del solenoide

La ECM envía el voltaje de 70V y posterior a formarse el campo magnético, el émbolo del solenoide comienza accionarse lentamente atrayendo junto con el la válvula poppet y el tiempo en el que permanece accionado es de 5ms, y el tiempo desde que empieza la apertura hasta el punto en el que termina es de 8.3 ms.

La Figura 3.19, representa la señal que tiene al momento de que se energiza el solenoide y permite el movimiento ascendente del émbolo hasta el punto en que se retira el voltaje por medio de la ECM y el émbolo comienza a descender a su posición normal.

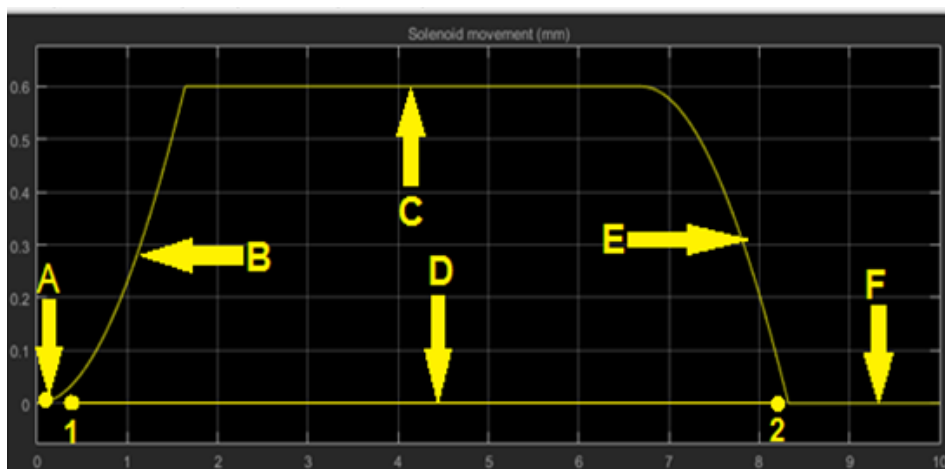


Figura 3.19 Señal de accionamiento del émbolo del solenoide

En la Tabla 3.2 se explica los parámetros claramente detallados de cada periodo que toma la señal cuando se produce la energización del solenoide y por tal el movimiento del émbolo.

Tabla 3.2 Parámetros de accionamiento del émbolo del solenoide

Parámetro de señal	Descripción
A	Punto de partida al accionamiento del émbolo.
B	Momento en el que el émbolo se acciona lentamente.
C	Altura máxima de accionamiento 0.6 mm por un lapso de 5 ms.
D	Lapso de tiempo que permanece accionado el émbolo desde el punto 1 de partida del accionamiento hasta el punto 2 en el cual finaliza el accionamiento.
E	Momento en el que el émbolo comienza a descender.
F	Momento en que el émbolo no está accionado.

3.4.3 Simulación de la apertura de la válvula HDV

La válvula HDV tiene dos posiciones principales, una abierta y otra cerrada. Cuando no está energizado el solenoide, esta válvula se mantiene presionada sobre su asiento por acción de la fuerza del resorte. El asiento de la válvula prepara el aceite a alta presión para transportarlo hacia el inyector. El conducto de escape al retorno se encuentra abierto. La Figura 3.20, indica la señal de apertura que tiene la válvula HDV, al momento que es atraída por el émbolo del solenoide accionado por los 70V.

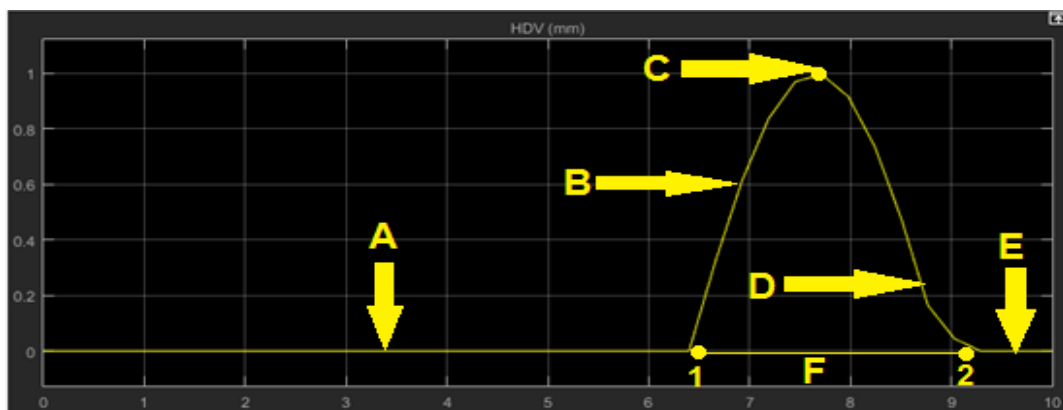


Figura 3.20 Señal de apertura de la válvula HDV

La ECM prepara la cantidad adecuada de combustible que va hacer entregado a la cámara de combustión por parte del inyector. En el momento que el solenoide es energizado por parte de la ECM, atrae el émbolo y permite la apertura de la válvula HDV.

La Tabla 3.3, se explica cada uno de los parámetros que tiene la señal de apertura de la válvula HDV cuando es atraída por el émbolo del solenoide y el momento del cierre de la válvula, para obstaculizar el paso del aceite a alta presión.

Tabla 3.3 Parámetros de apertura de la válvula HDV

Parámetro de señal	Descripción
A	Tiempo en que la válvula HDV permanece cerrada.
B	Momento en que el émbolo es accionado por el solenoide y permite la apertura de la válvula HDV.
C	Altura máxima de apertura de la válvula HDV antes de empezar a cerrarse, tiene una altura de 1 mm
D	Etapa cuando la válvula HDV comienza a descender para proceder a cerrarse.
E	Etapa cuando la válvula HDV se vuelve a cerrar.
F	Tiempo de 2.7ms en que la válvula HDV permanece abierta desde el punto 1 al 2.

3.4.4 Simulación del movimiento del intensificador

Cuando la válvula HDV se abre y permite el paso del aceite por medio de los conductos hacia la parte superior del intensificador a una alta presión, esto permite que el pistón del intensificador descienda y empuje el plunger para que de esta manera se logre la presurización del combustible que se encuentra entre la cámara y el asiento de la aguja de la válvula.

La Figura 3.21, muestra la señal del movimiento descendente del intensificador al momento que se acumula la alta presión de aceite en su parte superior por acción de la apertura de la válvula HDV y el instante en que regresa a su posición natural por motivo del cierre de la válvula HDV.

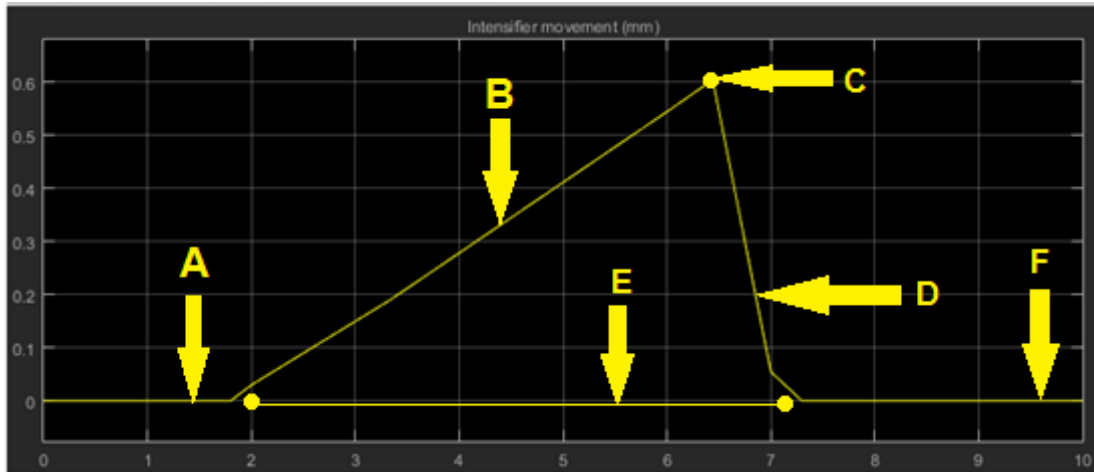


Figura 3.21 Señal del movimiento del intensificador

En la Tabla 3.4 se indica los parámetros que tiene la señal del movimiento del intensificador cuando la válvula HDV permite el paso del aceite a una alta presión hacia la parte superior del intensificador y cuando este regresa a su posición natural por efecto del cierre de la HDV.

Tabla 3.4 Parámetros de la señal del movimiento del intensificador

Parámetro de señal	Descripción
A	Lapso en el cual ingresa el aceite bajo presión hacia la parte superior del intensificador.
B	Momento en el que el pistón intensificador comienza a descender por efecto del aceite a alta presión.
C	Distancia máxima de 0.6 mm, siendo aquí donde se presuriza el combustible a una presión de 145000 Kpa.
D	Posterior a presurizar el combustible, el pistón intensificador regresa a su posición inicial.
E	Tiempo de 5.3 ms que dura el movimiento del intensificador.
F	Lapso en el cual ingresa nuevamente el aceite a alta presión.

3.4.5 Simulación del movimiento de la aguja

La presión almacenada supera la presión de apertura de la válvula (31 000 KPa), esta se levanta permitiendo abastecer de combustible a las perforaciones de la

tobera. Cuando ya termina la inyección, la aguja se cierra a una presión de 21 000 KPa. El fin de la inyección se produce cuando se corta la corriente que envía la ECM al solenoide, la pérdida de voltaje ocasiona que todos los elementos regresen a su posición inicial por efecto de que el solenoide no se encuentra accionado.

En la Figura 3.22, se grafica las señales de la preinyección, (cuando el aceite a una alta presión y permite el paso de combustible hacia la aguja) la inyección principal (cuando la presión del combustible vence la presión que ejerce el resorte en la aguja y permite que esta se abra para inyectar el combustible) y del fin de la inyección (cuando se corta el voltaje enviado por la ECM).

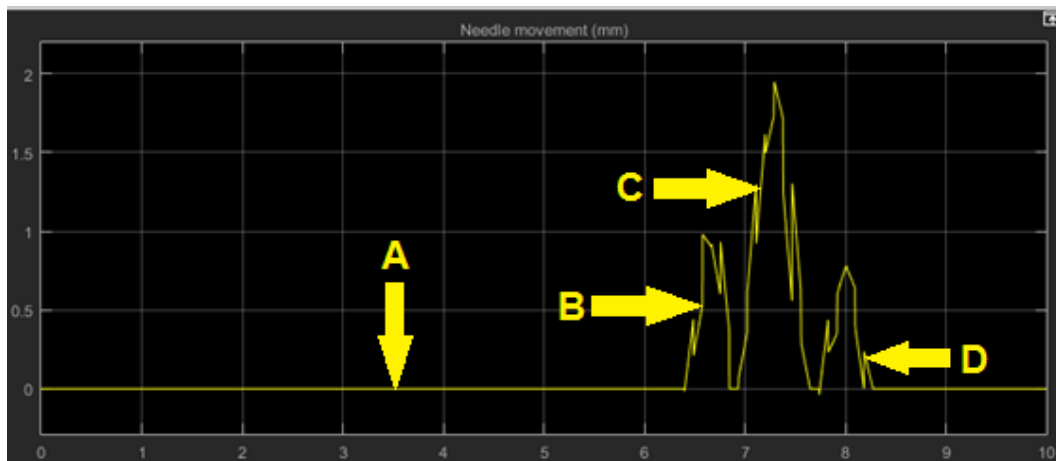


Figura 3.22 Simulación de la señal del movimiento de la aguja

La Tabla 3.5, muestra los parámetros que intervienen en las fases de la inyección del inyector desde el momento que se abre la aguja por acción del voltaje que envía la ECM al solenoide hasta el momento en que retira el voltaje.

Tabla 3.5 Parametros de la señal del movimiento de la aguja

Parámetro de señal	Descripción
A	Periodo donde se levanta la aguja y deja fluir el combustible hacia las perforaciones de la tobera.
B	Fase de la preinyección.
C	Fase de la inyección principal
D	Fin de la inyección

3.4.6 Simulación de la cantidad de inyección

Después de que se levante la aguja de la válvula, se inyecta el combustible, que es repartido sobre toda la cámara de combustión. Finalizada la entrega de combustible, la aguja regresa a su posición original por efecto que el solenoide no se encuentra energizado.

La figura 3.23, indica la señal de la cantidad de combustible que se inyecta en la cámara de combustión cuando llega el combustible a una alta presión y permite que se abra la aguja del inyector.

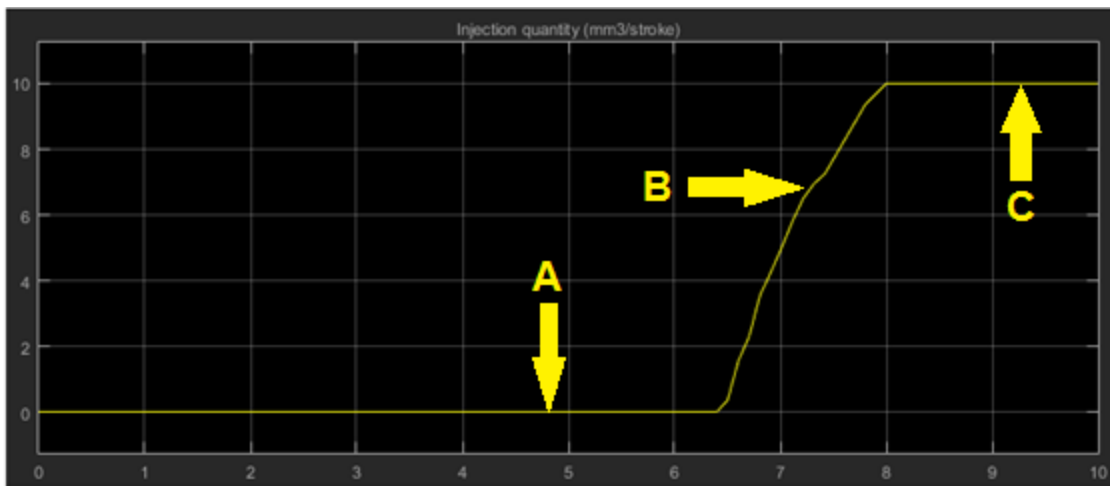


Figura 3.23 Simulación de la cantidad de inyección

La Tabla 3.6, muestra los parámetros que existen en la señal de la cantidad de inyección que se inyecta a la cámara de combustión por acción del combustible a una alta presión que vence al resorte de la aguja y permite que esta se abra.

Tabla 3.6 Parámetros de la cantidad de inyección

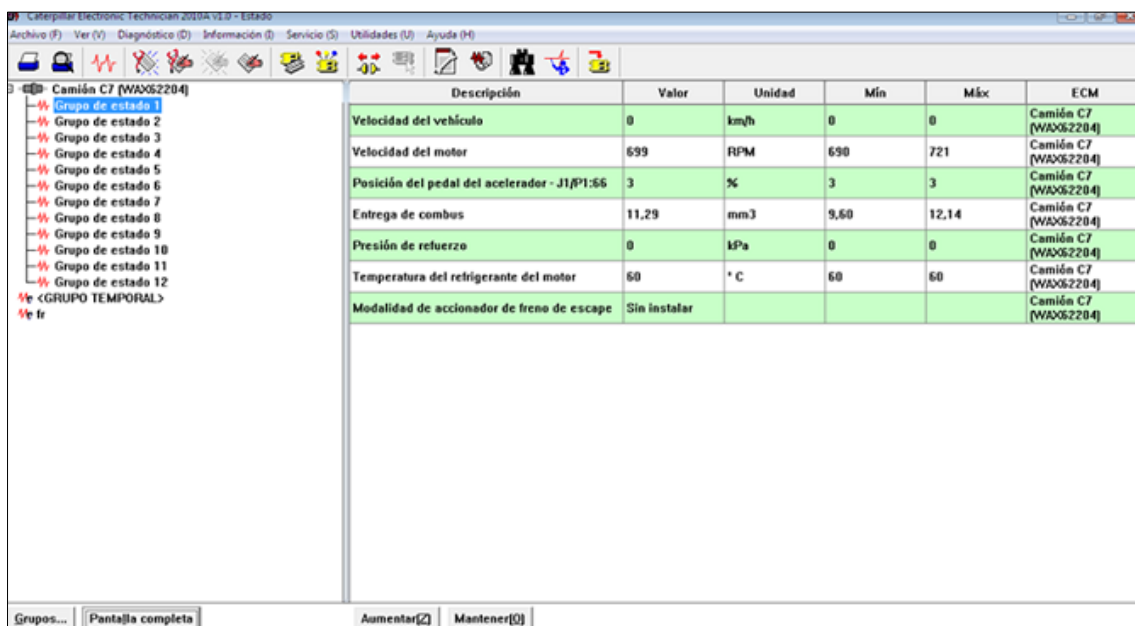
Parámetro de señal	Descripción
A	Periodo cuando llega el combustible a una alta presión y vence el resorte de la aguja.
B	Inyección de combustible.
C	La inyección se mantiene constante.

3.5 Lectura de los parámetros del motor con Scanner en ralentí, 1000 rpm y 2000 rpm.

Estas lecturas se realizan con la implementación del scanner, el cual, permite identificar los diferentes parámetros del motor como lo son en ralentí, 1000 rpm y 2000 rpm. Los valores que se obtiene permiten identificar el comportamiento del motor en diferentes estados de funcionamiento.

3.5.1 Prueba del motor en ralentí.

En la Figura 3.24, los parámetros con el motor en ralentí se obtiene que, el pedal del acelerador se encuentra accionado un 3%, debido a que existe una mínima aceleración que se mantiene constante. La entrega de combustible está en un valor mínimo de 9.60 mm^3 y un valor máximo de 12.14 mm^3 , que da un promedio de 10 mm^3 de combustible que entrega el inyector. Debido a que el motor no se encuentra trabajando a altas revoluciones da una presión de refuerzo de 0, esto por motivo que el motor se encuentra en ralentí. La temperatura de 60°C se mantiene entre los límites permitidos, por lo cual el motor está en temperatura normal de funcionamiento.



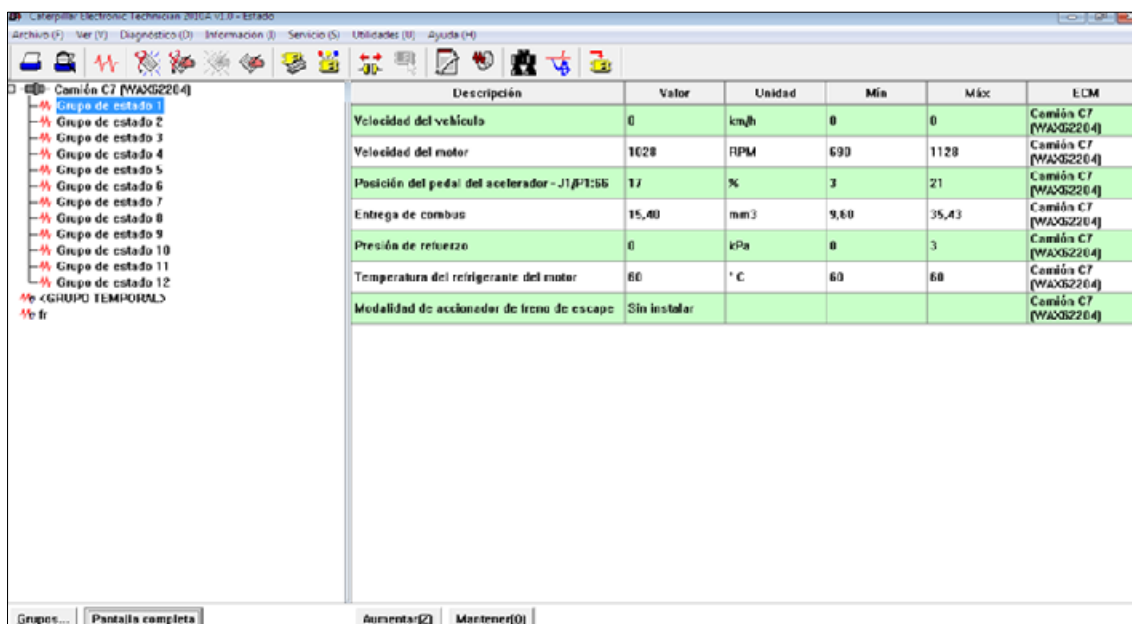
Descripción	Valor	Unidad	Mín	Máx	ECM
Velocidad del vehículo	0	km/h	0	0	Camión C7 (WAX62204)
Velocidad del motor	699	RPM	690	721	Camión C7 (WAX62204)
Posición del pedal del acelerador - J1/P1:66	3	%	3	3	Camión C7 (WAX62204)
Entrega de combus	11.29	mm ³	9.60	12.14	Camión C7 (WAX62204)
Presión de refuerzo	0	kPa	0	0	Camión C7 (WAX62204)
Temperatura del refrigerante del motor	60	° C	60	60	Camión C7 (WAX62204)
Modalidad de accionador de freno de escape	Sin instalar				Camión C7 (WAX62204)

Figura 3.24 Prueba del motor en ralentí

3.5.2 Prueba del motor a 1000 rpm

En la Figura 3.25 los parámetros con el motor a 1000 rpm se determina que el pedal del acelerador se encuentra en un 17% por motivo que se encuentra accionado a las revoluciones antes indicadas. La entrega de combustible tiene un valor de 15.40 mm^3 , es decir aumenta 3 mm^3 por cada 300 revoluciones que se le aumenta al motor, tiene un valor mínimo de 9.60 mm^3 y un máximo de $35,43 \text{ mm}^3$ lo que da un valor promedio de inyección de 22 mm^3 .

La presión de refuerzo se mantiene en 0 por motivo que el motor no está siendo exigido completamente. La temperatura se mantiene igual a 60°C no cambia a estas revoluciones.



Descripción	Valor	Unidad	Mín	Máx	ECM
Velocidad del vehículo	0	km/h	0	0	Camión C7 [WAG2204]
Velocidad del motor	1028	RPM	690	1128	Camión C7 [WAG2204]
Posición del pedal del acelerador - J1/P1:56	17	%	3	21	Camión C7 [WAG2204]
Entrega de combus	15,40	mm ³	9,60	35,43	Camión C7 [WAG2204]
Presión de refuerzo	0	kPa	0	3	Camión C7 [WAG2204]
Temperatura del refrigerante del motor	60	°C	60	60	Camión C7 [WAG2204]
Modalidad de accionador de freno de escape	Sin instalar				Camión C7 [WAG2204]

Figura 3.25 Prueba del motor a 1000 rpm

3.5.3 Prueba del motor a 2000 rpm

En la Figura 3.26 los parámetros del motor a 2000 rpm, se observa que el pedal del acelerador se encuentra a un 64% de accionamiento por motivo que se encuentra a las revoluciones antes indicadas.

La presión de inyección es de 30,29 mm^3 , la cantidad de inyección aumento al doble debido a que de igual forma se aumentaron las revoluciones. En este caso la presión de refuerzo sube a 23 KPa por consecuencia que el motor está siendo exigido. La temperatura del refrigerante se mantiene igual (60°C) solo con la variación que tiene una temperatura máxima de 61°C.

Descripción	Valor	Unidad	Mín	Máx	ECM
Velocidad del vehículo	0	km/h	0	0	Camión C7 (MAM52204)
Velocidad del motor	2051	RPM	600	2051	Camión C7 (MAM52204)
Posición del pedal del acelerador - J1/P1:66	64	%	3	64	Camión C7 (MAM52204)
Entrega de cumbas	30.29	cm ³	0.00	39.79	Camión C7 (MAM52204)
Presión de refuerzo	23	kPa	0	23	Camión C7 (MAM52204)
Temperatura del refrigerante del motor	60	°C	60	61	Camión C7 (MAM52204)
Modalidad de accionador de freno de escape	Sin instalar				Camión C7 (MAM52204)

Figura 3.26 Prueba del motor a 2000 rpm

3.6. Lectura del voltaje de accionamiento con uso del osciloscopio OTC

En la Figura 3.27 se indica la lectura del voltaje de accionamiento del inyector en una escala de 10v sobre un tiempo de 0.5 ms. Antes de que la ECM enviara la corriente hacia la ECM, existe un lapso de tiempo en donde el solenoide no tiene voltaje de accionamiento.

Una vez que la ECM envía la señal, el solenoide se encuentra energizado durante el tiempo de 1.5 ms, posterior a esto el voltaje de comienza a decrecer hasta tener una caída de voltaje de 20V, esto sucede con el fin de rebajar el calor que existe durante el accionamiento y mejorar una vida útil del solenoide.

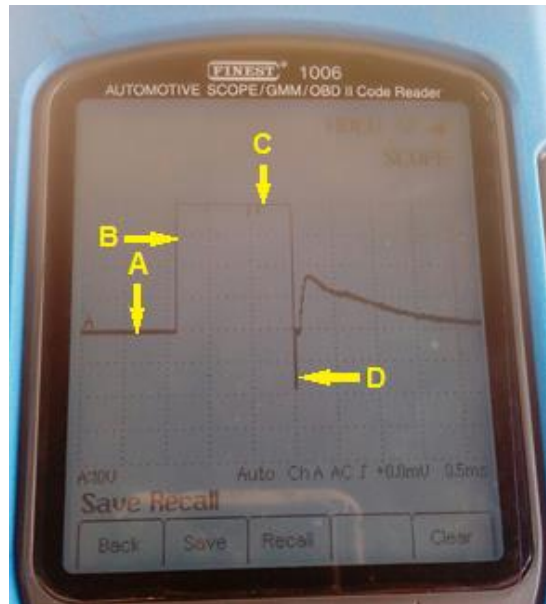


Figura 3.27 Voltaje de accionamiento del solenoide en ralentí.

La Tabla 3.7, indica los parámetros que tiene la señal del voltaje reflejada en el osciloscopio cuando tiene un voltaje de 40 v en ralentí.

Tabla 3.7 Parámetros de la señal emitida por el OTC

Parámetro de señal	Descripción
A	Tiempo en que el solenoide no está energizado
B	Voltaje máximo que llega al solenoide para ser energizado (40V)
C	Tiempo que permanece energizado el solenoide (1.5ms).
D	Reducción del nivel de la corriente. Caída de voltaje

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Análisis de sensibilidad del modelo

Para el análisis de sensibilidad del inyector HEUI. Se utilizaron parámetros de salida como:

- Retardo de la inyección
- Duración de la inyección
- Cantidad de inyección

Se ha realizado el análisis de sensibilidad de los parámetros de salida superiores a los siguientes parámetros de entrada:

- Coeficiente de fuerza del resorte del HDV (k_2)
- Coeficiente de fuerza del resorte de la aguja (k_4)
- Diámetro del intensificador (re_{yo}). El diámetro del intensificador se entiende como un parámetro complejo que afecta a los valores de otros parámetros dependientes. Estas incluyen las áreas de sección transversal de los dos extremos del intensificador, la masa del intensificador, y los volúmenes de la cámara de la aguja.
- Temperatura de la bobina del solenoide (T_s)

Tabla 4.1 Análisis de sensibilidad del modelo

	k_2	k_4	re_{yo}	T_2
Retardo de la inyección	$4.49e^{-5}$	0,088	0,04	-3,575
Duración de la inyección	$-6.556e^{-4}$	-0,416	0,497	-0,435
Cantidad de la inyección	$4.55e^{-5}$	-1,59	5,68	-3,510

Las investigaciones muestran un efecto intrascendente de la rigidez del resorte de

HDV (k_2). Como se indica en la Tabla 4.1, las variaciones en el coeficiente de fuerza del resorte de la aguja (k_4) pueden causar cambios significativos en la duración y cantidad de las inyecciones.

El otro resultado importante de la investigación es que la temperatura de la bobina del solenoide (T_s) tiene también un efecto considerable en el comportamiento del inyector. La razón es que el solenoide HEUI tiene alta inductancia (2,3 mH) y resistencia alta (2,8 Ohm). El aumento de la temperatura de la bobina puede causar un cambio significativo en la corriente del solenoide. Esto puede afectar de manera significativa el periodo de medición del inyector y, en consecuencia, el retardo de la inyección y la cantidad de inyección.

4.2 Análisis comparativo del voltaje de accionamiento del solenoide

Para realizar la comparación entre los voltajes, se toma la señal que brinda el osciloscopio con un valor de 40 v estando el motor en ralentí y la señal de accionamiento con un valor máximo de 70 V con un rendimiento máximo del motor.

4.2.1 Análisis entre las señales de accionamiento del solenoide

Como se puede observar en las Figuras 4.1 y 4.2, las señales gráficas del accionamiento del solenoide, se diferencian una de la otra en que el voltaje varía debido a que en la Figura 4.2 no se toma en cuenta las revoluciones del motor, es más bien que se toma como un dato directo obtenido mediante el osciloscopio a una máxima revolución de 2000 rpm dando así un voltaje máximo de 70V. Los 40 V que se representan en la Figura 4.1 se toman en un estado del motor a ralentí es decir a 700 rpm.

Debido a esto se toma el valor máximo de 70 V para poder simular y tener una gráfica más clara del accionamiento del solenoide como se muestra en la Figura 4.2.

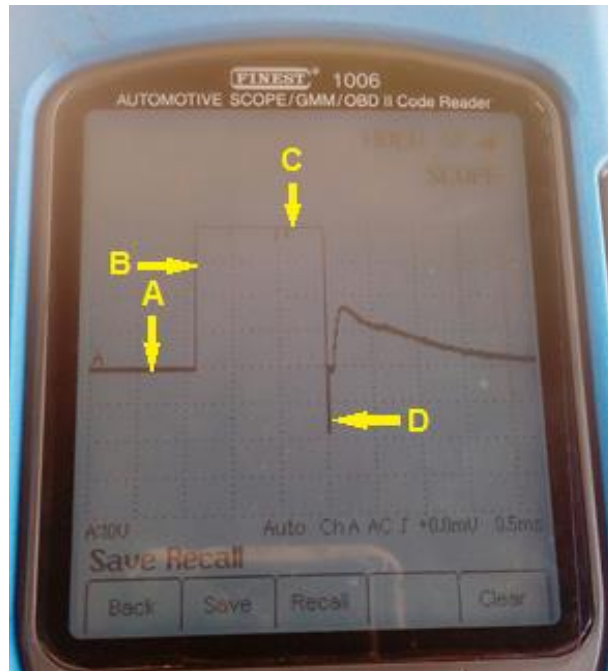


Figura 4.1 Señal de accionamiento tomada con el osciloscopio

El tiempo en el que permanece el solenoide accionado varía de 1.5 ms (de acuerdo a la Figura 4.1) a 5 ms (de acuerdo a la Figura 4.2) esta diferencia del tiempo de accionamiento en comparación entre las dos gráficas sucede debido a que en el osciloscopio, no se permite cambiar estos valores de tiempo y en el entorno gráfico del simulink no se permite rebajar a más del tiempo estipulado.

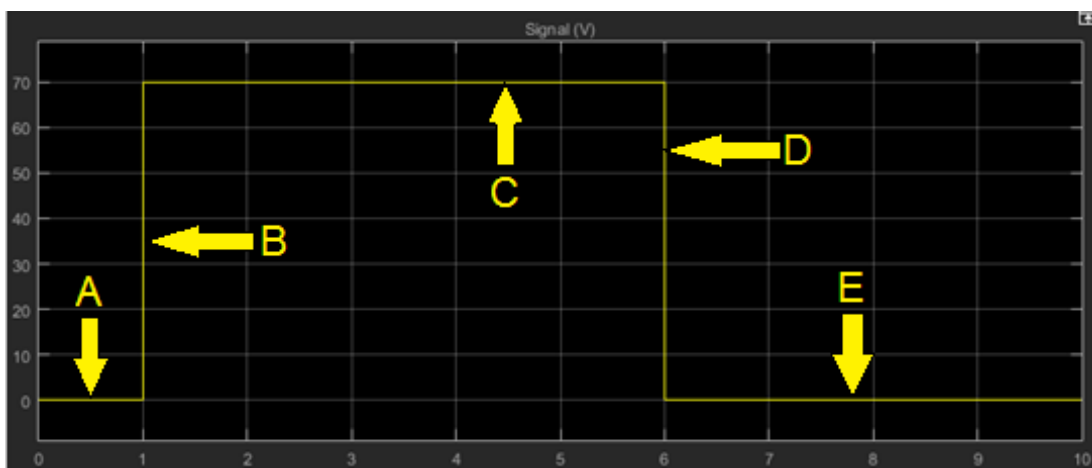


Figura 4.2 Señal de accionamiento simulada mediante simulink

4.2.2 Análisis entre parámetros obtenidos a partir de las señales de accionamiento del solenoide.

Tabla 4.2 Datos obtenidos a partir de la figura 4.1

Parámetro de señal	Descripción
A	Tiempo en que el solenoide no está energizado
B	Voltaje máximo que llega al solenoide para ser energizado (40V)
C	Tiempo que permanece energizado el solenoide (1.5ms).
D	Reducción del nivel de la corriente. Caída de voltaje

- Parámetro A: concuerdan entre ambas graficas el momento en que el solenoide no está energizado
- Parámetro B: el voltaje de accionamiento varía de 40 V a 70 V debido a las revoluciones del motor que son diferentes.
- Parámetro C: Tiempo en que permanece energizado el solenoide varía de 1.5 ms a 5 ms.
- Parámetro D: se obtiene la misma reducción de la corriente en ambos casos a excepción que en la toma con el osciloscopio se presenta una caída de tensión.

Tabla 4.3 Datos obtenidos a partir de la figura 4.2

Parámetro de señal	Descripción
A	Tiempo en que el solenoide no está energizado
B	Voltaje máximo que llega al solenoide para ser energizado (70V)
C	Tiempo que permanece energizado el solenoide (5ms).
D	Reducción del nivel de la corriente.

4.3 Señal de activación del solenoide HEUI

Cuando el voltaje llega al solenoide, este comienza a moverse lentamente hasta que llega a un límite de 0.6mm, el cual es la distancia máxima que el solenoide se mueve, permanece constante durante un tiempo de 6ms para luego de este

tiempo proceder a descender hasta que el solenoide quede inmóvil y esperando por el siguiente ciclo. El tiempo total que este permanece abierto es de 8.5 ms.

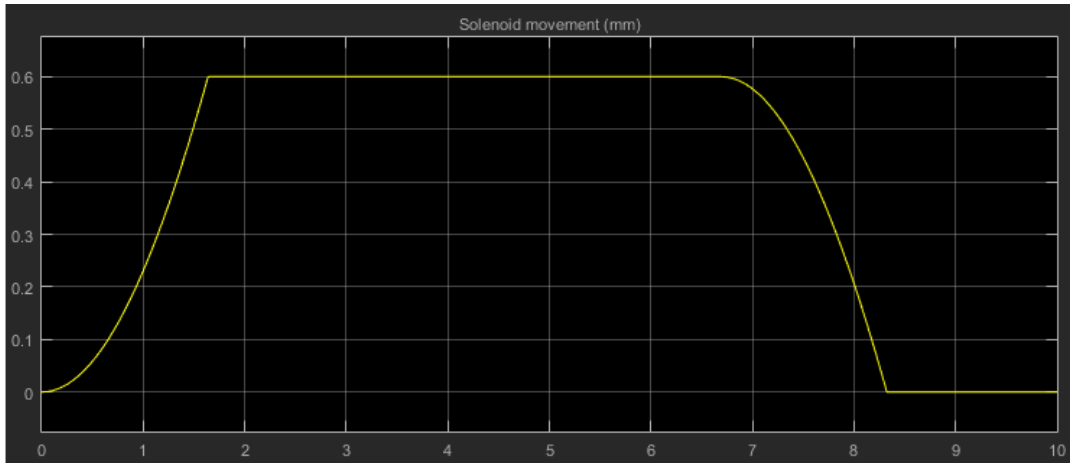


Figura 4.3 Señal de activación del solenoide

4.4 Señal de la apertura de la válvula HDV

Cuando el solenoide está por finalizar su movimiento, la válvula HDV empieza abrirse lentamente hasta alcanzar un valor máximo de 1 mm, el tiempo en que permanece abierta la válvula HDV desde el punto que comienza la apertura hasta el momento del cierre es de 2 ms y el tiempo que permanece constante cuando alcanza su valor máximo de apertura es de 0.2 ms.

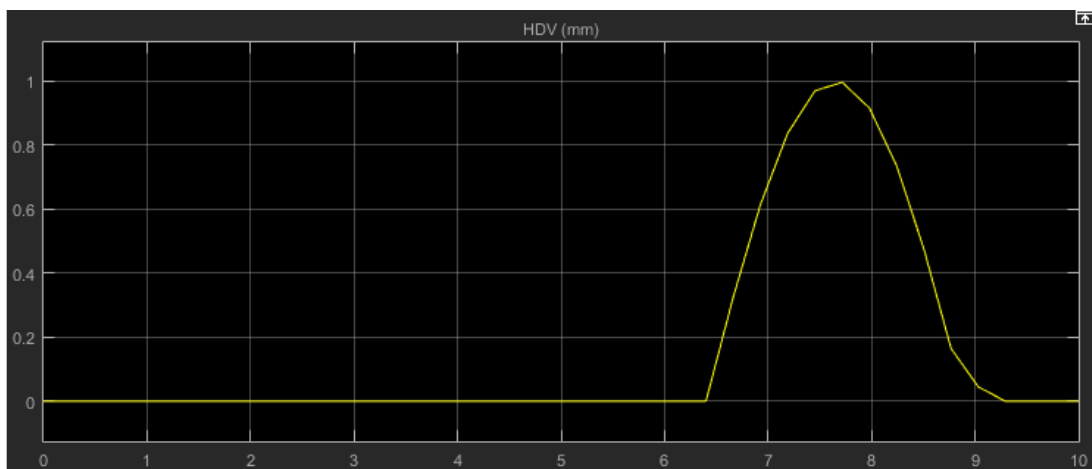


Figura 4.4 Señal de apertura de la válvula HDV

4.5 Señal del movimiento del intensificador

Se observa que el intensificador comienza su apertura lentamente hasta alcanzar una altura de 0.6mm, este movimiento se lo realiza en el tiempo de 4.5 ms, luego de haber alcanzado este punto máximo comienza a descenderde lentamente.

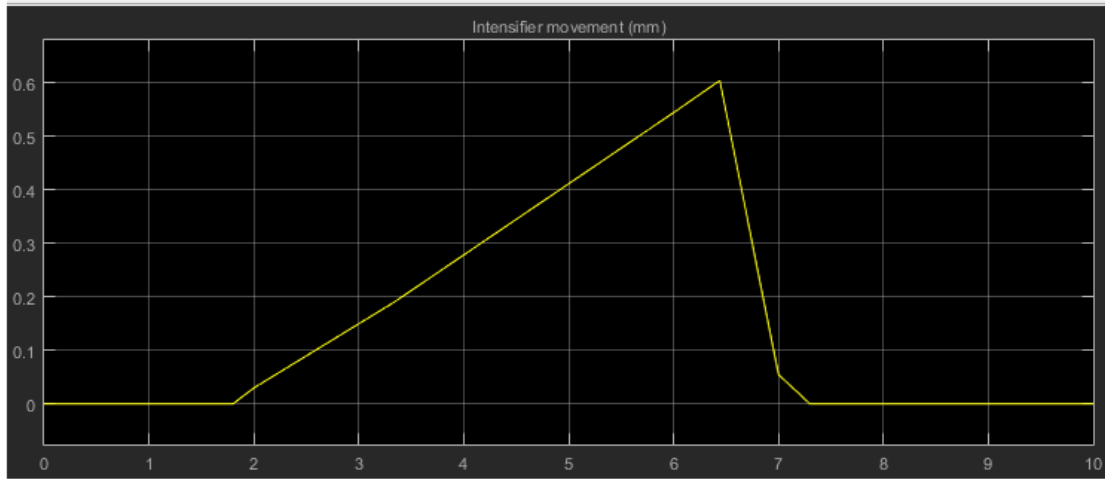


Figura 4.5 Señal del movimiento del intensificador

4.6 Señal del movimiento de la aguja

En la Figura 4.6 se puede observar las tres fases de funcionamiento del inyector HEUI como lo son la preinyección, la inyección y el fin de la inyección, todas estas fases se realizan en el tiempo de 2ms.

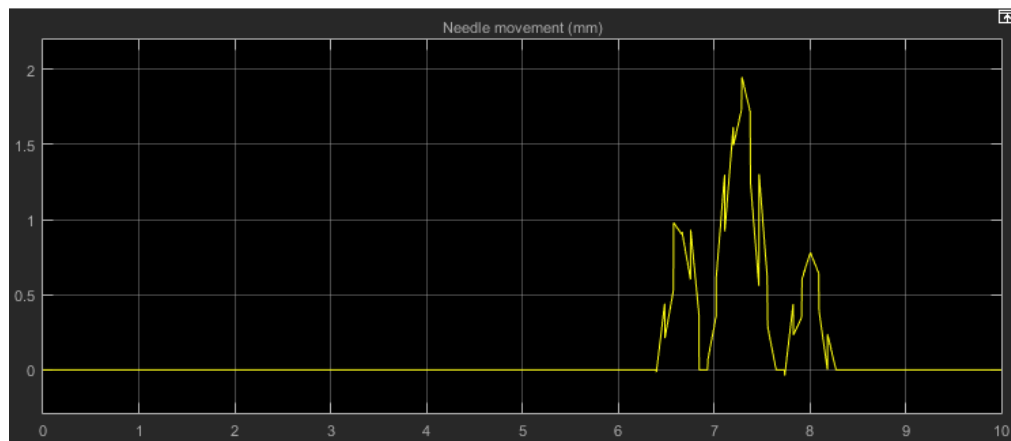


Figura 4.6 Señal del movimiento de la aguja

4.7 Señal de la cantidad de inyección

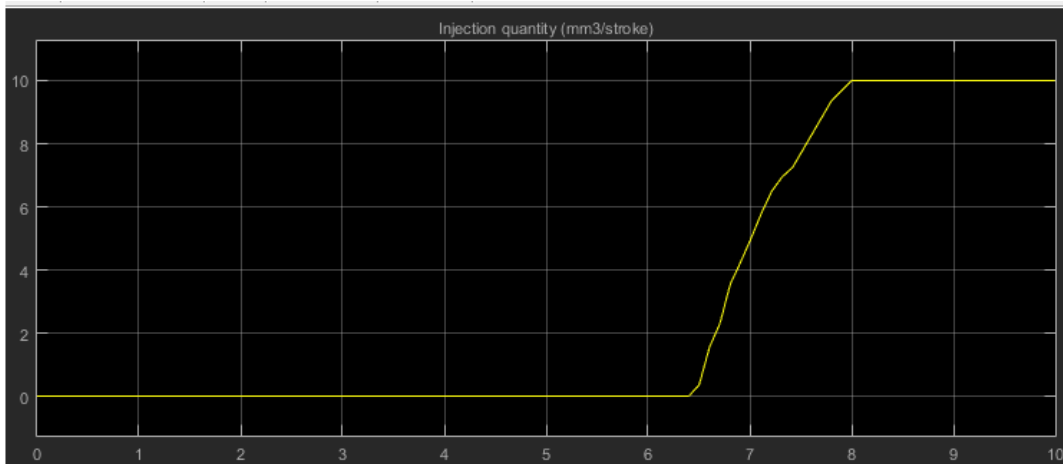


Figura 4.7 Señal de la cantidad de inyección

De acuerdo a la toma de datos que se muestran en la Figura 4.8, se puede apreciar varios parámetros, que se obtienen con el motor encendido a un estado de ralentí. Entre estos parámetros que se obtiene consta la cantidad de combustible que se entrega a la cámara de combustión en el momento de la inyección. Este valor de 10 mm^3 que nos indica como la cantidad de combustible que se inyecta, es tomado para graficar en el entorno gráfico de Matlab la señal que este toma al momento de la inyección como se puede apreciar en la Figura 4.7.

Descripción	Valor	Unidad	Mín	Máx	ECM
Velocidad del vehículo	0	km/h	0	0	Camión C7 [WVG2204]
Velocidad del motor	639	RPM	630	721	Camión C7 [WVG2204]
Posición del pedal del acelerador - J1939/55	3	%	3	3	Camión C7 [WVG2204]
Entrega de combus	11.29	mm3	9.68	12.14	Camión C7 [WVG2204]
Presión de refuerzo	0	KPa	0	0	Camión C7 [WVG2204]
Temperatura del refrigerante del motor	68	°C	68	68	Camión C7 [WVG2204]
Modalidad de accionador de freno de escape	Sin instalar				Camión C7 [WVG2204]

Figura 4.8 Parámetros del motor en ralentí

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- La tecnología Acert implementada en los motores Caterpillar, tiene una gran acogida como un nuevo sistema capaz de reducir las emisiones de los gases contaminantes provocados por los motores diésel en la actualidad.
- Con la realización de este proyecto, se pudo lograr obtener la simulación del funcionamiento de cada componente que conforma el inyector HEUI y además conocer de una manera más detallada como opera el sistema de inyección HEUI dentro de un motor CAT C7.
- Con la obtención de los datos gráficos, se hizo el análisis correspondiente de acuerdo a las señales que cada componente emite en su respectivo funcionamiento, y de una manera detallada explicar las etapas de cada una de las señales.
- En el análisis del accionamiento del solenoide se dedujo que el voltaje de accionamiento con el motor en ralentí es de 40V y el valor máximo operando a una revolución de 2000 rpm es de 70 V, siendo este el voltaje más alto con el que puede accionar el solenoide.
- De acuerdo a la simulación del accionamiento del émbolo, el tiempo en que este permanece accionado es de 5 ms con una altura de 0.6 mm.
- La ECM es la encargada de comandar a todos los dispositivos electrónicos del motor, siendo esta la que permite controlar la cantidad de combustible que puede ser entregada a la cámara de combustión en el momento de la inyección.
- La utilización del Scanner (NEXIQ) fue muy importante al momento de ver la cantidad de combustible que es utilizada por el inyector y de un osciloscopio OTC, al momento de ver el voltaje de accionamiento del solenoide.

5.2 Recomendaciones

- Para obtener señales más cercanas a la realidad es aconsejable tomar en cuenta el tamaño del programa y la velocidad del ordenador, esto evita fallos al momento de ejecutar la simulación.
- El estudio del sistema de inyección HEUI permite entender de una mejor manera el comportamiento que cada elemento tiene dentro del inyector y así mismo comprender la señal que este emite.
- Antes de manipular dispositivos electrónicos como un scanner o un osciloscopio, se debe leer detenidamente las instrucciones de uso para evitar algún daño en los dispositivos y por otra parte lograr obtener buenos resultados en la toma de datos.
- Un estudio más práctico y más detallado en los componentes permite tener unas graficas más reales que especifiquen el funcionamiento real de cada una de las partes del inyector.
- Para futuros estudios es aconsejable hacer pruebas con diferentes lubricantes y de igual manera con combustibles para estudiar si la densidad de cada uno de estos fluidos permite tener una variación de las señales de los componentes.
- Otro punto que se debe tomar en cuenta es realizar la toma de datos con el motor sometido a carga, para verificar el comportamiento que toman las señales de voltaje y la cantidad de combustible inyectado.

BIBLIOGRAFÍA

1. Areny Pallás, R. (2003). Sensores y acondicionadores de señal. (1ra ed.). Barcelona, España: Marcombo.
2. Barone, M. (2014). Sistema de Inyección HEUI [Scribd]. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/210385500/Sistema-de-Inyeccion-HEUI-Inyeccion-Unitaria-Electronica-Hidraulica.pdf> (Marzo, 2014)
3. Bartsch, C. (2005). Revolución del Motor Diésel: desarrollo de la inyección directa. (1ra ed.). Madrid, España: Grupo Planeta.
4. Bennett, S. (2011). Modern Diésel Technology. (1ra ed.). New York, Estados Unidos: Delmar.
5. Bosch. (01 de 04 de 2009). Bosch Automóvil. Obtenido de http://es.bosch-automotive.com/es/internet/parts/parts_and_accessories/motor_and_systems/diesel/unit_injector_system/unit_injector_system_diesel_motorsys_parts.html
6. Casimiro Quispe, H. (2011). Constitución y funcionamiento del sistema EUI. Recuperado de: <https://es.slideshare.net/afirstxtrem/838356.pdf> (Mayo 2011)
7. Caterpillar. (2012). Recuperado de: <http://www.cat.com/cda/files/87775/7/pehp9526.pdf>. (Agosto 2012)
8. Corral, A., Guayanlema, V., & Izurieta, F. (2013). Identificación de las necesidades de eficiencia energética en el transporte. Recuperado de: http://www.iner.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2015/04/SEREE_Identificaci%C3%B3n-de-las-necesidades-de-EE-en-transporte.pdf. (Abril, 2013).

9. Delgado, J., Valle, F., Loaiza, P., y Lopez, R. (2014). Sistema de inyección EUI y HEUI. Mexico.
10. Escudero, S., Gonzáles, J., y Rivas, J. (2009). Motores. (1ra ed.). Madrid, España: Macmillan Iberia, S.A.
11. García Gimeno, J. (2012). Estudio de la inyección diésel mediante la medida del flujo de cantidad de movimiento del chorro. (1ra ed.). Barcelona, España: Reverté.
12. Ibañez, S. P. (2012). Mantenimiento de sistemas auxiliares del motor ciclo Diesel. (1ra ed.). Málaga, España: IC, Editorial.
13. Martí Parera, A. (1996). Inyección electrónica en motores diésel. (1ra ed.). Barcelona, España: Marcombo.
14. MathWorks. (Febrero de 2013). Modelizacion y simulacion. Obtenido de www.mathworks.com
15. Merdech, O. (2013). Inyector Bomba, EUI y HEUI [Scribd]. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/129241613/Inyector-Bomba-EUI-HEUI.pdf> (Marzo 2013)
16. Milton, B. (2003). Modelling HEUI injector in Matlab Simulink. IEEE, 383 - 387.
17. Morales Alanuca, W. B., y Sangucholeines, C. M. (2013). Sistemas de alimentación de combustible para inyector diesel electrónicos H.E.U.I. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Automotriz). Escuela Superior Politécnica del Ejercito, Latacunga, Ecuador.

18. More, H. (2000). Matlab para Ingenieros. (1ra ed.). California, Estados Unidos: Pearson.
19. Navarro Esbrí, S. (2014). Componentes HEUI [Scribd]. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/36968742/COMPONENTES-HEUI.pdf> (Agosto, 2014)
20. Olermann, E. (2006). CATERPILLAR. (1ra ed.). New York, Estados Unidos: MBI Publishing Company.
21. Orozco, C., Perez, A., Gonzales, M., Rodriguez, F., y Alfayate, J. (2003). Contaminación Ambiental. (1ra ed.). Madrid, España: Paraninfo.
22. Romero, A. (2011). Curso de Inyección Dir. EUI y HEUI Caterpillar. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/53254599/Curso-de-Inyeccion-Dir-EUI-HEUI-CATERPILLAR.pdf> (Abril, 2011)
23. Rovira, A., y Muñoz, M. (2015). Motores de Combustión Interna. (1ra ed.). Madrid, España: UNED.
24. Royston, A. (2008). Calentamiento Global. (1ra ed.). Minesota, Estados Unidos: Capstone PressInc.
25. Saenz Acebes, S. (2011). Motor: Transporte y Mantenimiento de Vehículos. (1ra ed.). Madrid, España: Editex.
26. Salvador, J. (2007). Influencia de la cavitación sobre el desarrollo del chorro diésel. (1ra ed.). Barcelona, España: Reverte.
27. Sanchez García, G. F., Velasco Chacón, J. L., y Guerrero Chávez, A. (2013). Modelling of combustion in Diesel engines. (1ra ed.). Santiago, España: Scielo.

28. Secretaria Nacional de Planificación y Desarrollo, S. (2013-2017). Plan Nacional del Buen Vivir. Quito.
29. Torres Álvarez, G. (2005). Metodología para el diagnóstico del Sistema de inyección de Motores Diesel a partir de las líneas de inyección. Recuperado de: <http://studylib.es/doc/7665288/metodolog%C3%ADa-para-el-diagn%C3%B3stico-del-sistema-de-inyecci%C3%B3n.pdf> (Abril, 2005)
30. Tran, X. (2003). Modelling and simulation of electronically controlled diesel injectors. (Tesis presentada para el requisito de Master en Ingeniería). Universidad de Nueva Gales del Sur, Sydney, Australia.

ANEXOS

ANEXO I

PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR

The figure consists of two screenshots of the Caterpillar Electronic Technician (ET) software interface. Both screenshots show the 'Prueba de presión activación de amiento inyectores' (Injector Activation Pressure Test) window. The top screenshot shows the engine running at 1026 RPM, and the bottom screenshot shows it running at 2066 RPM. Both tests are currently in the 'Apagado(a)' (Off) state.

Descripción	Condición necesaria	Valor real
Velocidad del motor	Motor encendido	1026 RPM

Descripción	Valor	Unidad
Presión de activación de inyección	14788	kPa
Salida de activación de inyección	34	%
Presión deseada de activación de inyección	14315	kPa

Prueba de presión activación de amiento inyectores Estado: Apagado(a)
 Botones: Iniciar, Parar(O), Aumentar de uno en uno (E), Disminuir de uno en uno (W)

Descripción	Condición necesaria	Valor real
Velocidad del motor	Motor encendido	2066 RPM

Descripción	Valor	Unidad
Presión de activación de inyección	21490	kPa
Salida de activación de inyección	32	%
Presión deseada de activación de inyección	21675	kPa

Prueba de presión activación de amiento inyectores Estado: Apagado(a)
 Botones: Iniciar, Parar(O), Aumentar de uno en uno (E), Disminuir de uno en uno (W)

Figura AI.1. Prueba de presión y activación de inyectores a 1000 y 2000 rpm

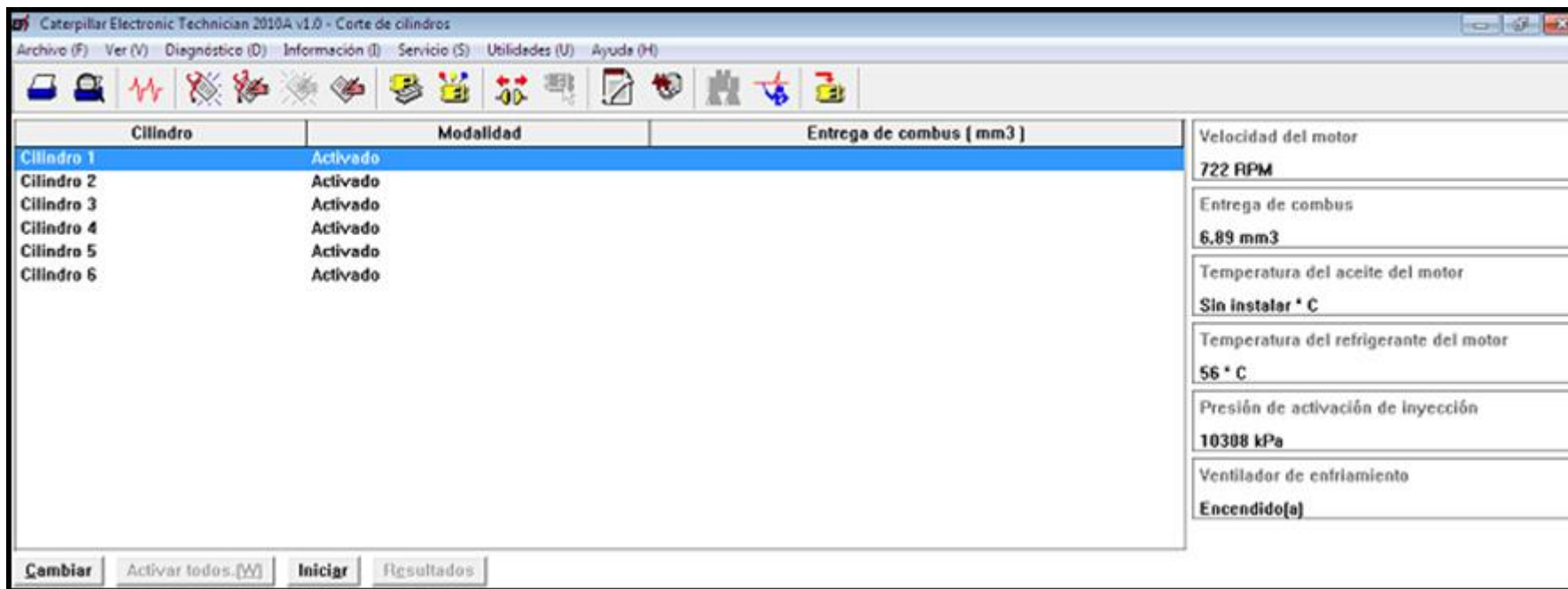


Figura AI.2. Prueba de corte de cilindros

The image displays two screenshots of the Caterpillar Electronic Technician 2010A v1.0 software interface, showing the results of a cylinder cut test. The interface is divided into a main data table and a right-hand panel displaying engine parameters.

Top Screenshot:

Cilindro	Modalidad	Entrega de combus [mm3]
Cilindro 1	Corte	
Cilindro 2	Activado	
Cilindro 3	Activado	
Cilindro 4	Activado	
Cilindro 5	Activado	
Cilindro 6	Activado	

Engine Parameters (Right Panel):

- Velocidad del motor: 696 RPM
- Entrega de combus: 11.84 mm3
- Temperatura del aceite del motor: Sin instalar * C
- Temperatura del refrigerante del motor: 57 * C
- Presión de activación de inyección: 10065 kPa
- Ventilador de enfriamiento: Encendido(a)

Bottom Screenshot:

Cilindro	Modalidad	Entrega de combus [mm3]
Cilindro 1	Corte	
Cilindro 2	Corte	
Cilindro 3	Activado	
Cilindro 4	Activado	
Cilindro 5	Activado	
Cilindro 6	Activado	

Engine Parameters (Right Panel):

- Velocidad del motor: 700 RPM
- Entrega de combus: 19.34 mm3
- Temperatura del aceite del motor: Sin instalar * C
- Temperatura del refrigerante del motor: 58 * C
- Presión de activación de inyección: 9823 kPa
- Ventilador de enfriamiento: Encendido(a)

Figura AI.3. Prueba de corte de cilindros en 1 y 2

Caterpillar Electronic Technician 2010A v1.0 - Estado

Archivo (F) Ver (V) Diagnóstico (D) Información (I) Servicio (S) Utilidades (U) Ayuda (H)

Camión C7 [WAX62204]

- ✖ Grupo de estado 1
- ✖ **Grupo de estado 2**
- ✖ Grupo de estado 3
- ✖ Grupo de estado 4
- ✖ Grupo de estado 5
- ✖ Grupo de estado 6
- ✖ Grupo de estado 7
- ✖ Grupo de estado 8
- ✖ Grupo de estado 9
- ✖ Grupo de estado 10
- ✖ Grupo de estado 11
- ✖ Grupo de estado 12
- ✖ <GRUPO TEMPORAL>
- ✖ fr

Descripción	Valor	Unidad	Mín	Máx	ECM
Velocidad del motor	695	RPM	690	2061	Camión C7 [WAX62204]
Velocidad deseada del motor	700	RPM	700	700	Camión C7 [WAX62204]
Presión de activación de inyección	10308	kPa	9703	10308	Camión C7 [WAX62204]
Presión deseada de activación de inyección	10003	kPa	10003	10003	Camión C7 [WAX62204]
Salida de activación de inyección	33	%	32	33	Camión C7 [WAX62204]
Entrega de combus	12,15	mm3	0,00	39,79	Camión C7 [WAX62204]
Límite de combustible FRC	76,54	mm3	76,54	77,08	Camión C7 [WAX62204]
Límite nominal de combustible	122,89	mm3	122,91	124,70	Camión C7 [WAX62204]
Interruptor de llave de encendido del motor	Encendido[a]				Camión C7 [WAX62204]

Grupos... Pantalla completa Aumentar[Z] Mantener[O]

Figura AI.4. Prueba de estado 2 en ralentí

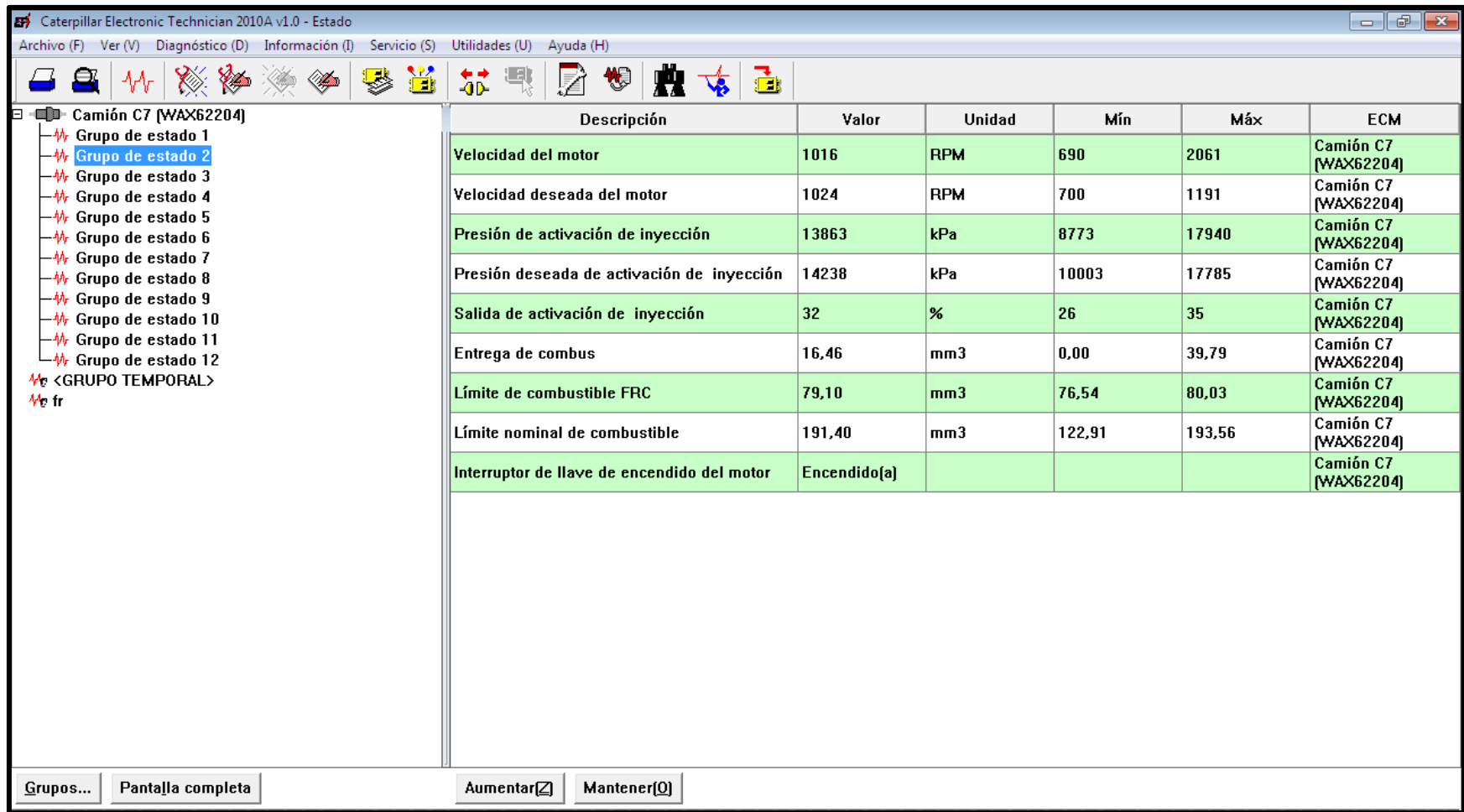


Figura AI.5. Pruebas de estado 2 a 1000 rpm

Caterpillar Electronic Technician 2010A v1.0 - Estado

Archivo (F) Ver (V) Diagnóstico (D) Información (I) Servicio (S) Utilidades (U) Ayuda (H)

Camión C7 [WAX62204]

- Grupo de estado 1
- Grupo de estado 2**
- Grupo de estado 3
- Grupo de estado 4
- Grupo de estado 5
- Grupo de estado 6
- Grupo de estado 7
- Grupo de estado 8
- Grupo de estado 9
- Grupo de estado 10
- Grupo de estado 11
- Grupo de estado 12
- <GRUPO TEMPORAL>
- fr

Descripción	Valor	Unidad	Mín	Máx	ECM
Velocidad del motor	2021	RPM	686	2061	Camión C7 [WAX62204]
Velocidad deseada del motor	2068	RPM	700	2068	Camión C7 [WAX62204]
Presión de activación de inyección	22178	kPa	8773	23268	Camión C7 [WAX62204]
Presión deseada de activación de inyección	22885	kPa	10003	22995	Camión C7 [WAX62204]
Salida de activación de inyección	32	%	26	35	Camión C7 [WAX62204]
Entrega de combus	34,93	mm3	0,00	39,79	Camión C7 [WAX62204]
Límite de combustible FRC	84,38	mm3	76,54	84,32	Camión C7 [WAX62204]
Límite nominal de combustible	167,35	mm3	122,91	193,56	Camión C7 [WAX62204]
Interruptor de llave de encendido del motor	Encendido[a]				Camión C7 [WAX62204]

Grupos... Pantalla completa Aumentar[M] Mantener[O]

Figura AI.6. Pruebas de estado 2 a 2000 rpm

Caterpillar Electronic Technician 2010A v1.0 - Estado

Archivo (F) Ver (V) Diagnóstico (D) Información (I) Servicio (S) Utilidades (U) Ayuda (H)

Camión C7 [WAX62204]

- Grupo de estado 1
- Grupo de estado 2
- Grupo de estado 3**
- Grupo de estado 4
- Grupo de estado 5
- Grupo de estado 6
- Grupo de estado 7
- Grupo de estado 8
- Grupo de estado 9
- Grupo de estado 10
- Grupo de estado 11
- Grupo de estado 12
- <GRUPO TEMPORAL>
- fr

Descripción	Valor	Unidad	Mín	Máx	ECM
Velocidad del motor	705	RPM	683	2176	Camión C7 [WAX62204]
Temperatura del refrigerante del motor	62	° C	60	62	Camión C7 [WAX62204]
Presión de refuerzo	0	kPa	0	23	Camión C7 [WAX62204]
Presión atmosférica	78	kPa	78	78	Camión C7 [WAX62204]
Temperatura del aire de múltiple de admisión	35	° C	35	36	Camión C7 [WAX62204]
Relación de combustible estimada	1,66	L/h	1,54	1,54	Camión C7 [WAX62204]
Presión de aceite del motor	300	kPa	238	383	Camión C7 [WAX62204]
Temperatura del aceite del motor	Sin instalar	° C			Camión C7 [WAX62204]
Luz de cambio de aceite	Sin instalar				Camión C7 [WAX62204]
Iniciando salida de ayuda	Sin instalar				Camión C7 [WAX62204]
Sensor de temperatura exterior	No disponible	° C			Camión C7 [WAX62204]

Grupos... Pantalla completa Aumentar[M] Mantener[O]

Figura AI.7. Pruebas de estado 3 a ralentí

Caterpillar Electronic Technician 2010A v1.0 - Estado

Archivo (F) Ver (V) Diagnóstico (D) Información (I) Servicio (S) Utilidades (U) Ayuda (H)

Camión C7 [WAX62204]

- Grupo de estado 1
- Grupo de estado 2
- Grupo de estado 3**
- Grupo de estado 4
- Grupo de estado 5
- Grupo de estado 6
- Grupo de estado 7
- Grupo de estado 8
- Grupo de estado 9
- Grupo de estado 10
- Grupo de estado 11
- Grupo de estado 12
- <GRUPO TEMPORAL>
- fr

Descripción	Valor	Unidad	Mín	Máx	ECM
Velocidad del motor	1068	RPM	683	2176	Camión C7 [WAX62204]
Temperatura del refrigerante del motor	62	° C	60	62	Camión C7 [WAX62204]
Presión de refuerzo	0	kPa	0	23	Camión C7 [WAX62204]
Presión atmosférica	78	kPa	78	78	Camión C7 [WAX62204]
Temperatura del aire de múltiple de admisión	34	° C	33	36	Camión C7 [WAX62204]
Relación de combustible estimada	3,43	L/h	0,00	5,68	Camión C7 [WAX62204]
Presión de aceite del motor	315	kPa	220	398	Camión C7 [WAX62204]
Temperatura del aceite del motor	Sin instalar	° C			Camión C7 [WAX62204]
Luz de cambio de aceite	Sin instalar				Camión C7 [WAX62204]
Iniciando salida de ayuda	Sin instalar				Camión C7 [WAX62204]
Sensor de temperatura exterior	No disponible	° C			Camión C7 [WAX62204]

Grupos... Pantalla completa Aumentar[Z] Mantener[O]

Figura AI.8. Pruebas de estado 3 a 1000 rpm

Caterpillar Electronic Technician 2010A v1.0 - Estado

Archivo (F) Ver (V) Diagnóstico (D) Información (I) Servicio (S) Utilidades (U) Ayuda (H)

Camión C7 [WAX62204]

- Grupo de estado 1
- Grupo de estado 2
- Grupo de estado 3
- Grupo de estado 4
- Grupo de estado 5
- Grupo de estado 6
- Grupo de estado 7
- Grupo de estado 8
- Grupo de estado 9
- Grupo de estado 10
- Grupo de estado 11
- Grupo de estado 12
- <GRUPO TEMPORAL>
- fr

Descripción	Valor	Unidad	Mín	Máx	ECM
Velocidad del motor	2056	RPM	683	2176	Camión C7 [WAX62204]
Temperatura del refrigerante del motor	62	° C	60	62	Camión C7 [WAX62204]
Presión de refuerzo	20	kPa	0	23	Camión C7 [WAX62204]
Presión atmosférica	78	kPa	78	78	Camión C7 [WAX62204]
Temperatura del aire de múltiple de admisión	34	° C	33	36	Camión C7 [WAX62204]
Relación de combustible estimada	10,17	L/h	0,00	11,00	Camión C7 [WAX62204]
Presión de aceite del motor	300	kPa	220	403	Camión C7 [WAX62204]
Temperatura del aceite del motor	Sin instalar	° C			Camión C7 [WAX62204]
Luz de cambio de aceite	Sin instalar				Camión C7 [WAX62204]
Iniciando salida de ayuda	Sin instalar				Camión C7 [WAX62204]
Sensor de temperatura exterior	No disponible	° C			Camión C7 [WAX62204]

Grupos... Pantalla completa Aumentar[M] Mantener[O]

Figura AI.9. Prueba de estado a 2000 rpm

Caterpillar Electronic Technician 2010A v1.0 - Estado

Archivo (F) Ver (V) Diagnóstico (D) Información (I) Servicio (S) Utilidades (U) Ayuda (H)

Camión C7 (WAX62204)

- Grupo de estado 1
- Grupo de estado 2
- Grupo de estado 3
- Grupo de estado 4**
- Grupo de estado 5
- Grupo de estado 6
- Grupo de estado 7
- Grupo de estado 8
- Grupo de estado 9
- Grupo de estado 10
- Grupo de estado 11
- Grupo de estado 12
- <GRUPO TEMPORAL>
- fr

Descripción	Valor	Unidad	Mín	Máx	ECM
Velocidad del motor	706	RPM	683	2176	Camión C7 [WAX62204]
Relación de combustible estimada	1,66	L/h	0,00	12,66	Camión C7 [WAX62204]
Consumo de combustible	0,00	km/L	0,00	0,00	Camión C7 [WAX62204]
Entrada del ventilador de aire acond	Encendido(a)				Camión C7 [WAX62204]
Ventilador de enfriamiento	Encendido(a)				Camión C7 [WAX62204]
Temperatura del refrigerante del motor	63	° C	60	63	Camión C7 [WAX62204]
Nivel de refrigerante	Desactivado				Camión C7 [WAX62204]
Porcentaje de salida del ventilador	0	%	0	0	Camión C7 [WAX62204]
Porcentaje de velocidad de ventilador solicitado por la transmisión	0	%	0	0	Camión C7 [WAX62204]

Grupos... Pantalla completa Aumentar[M] Mantener[O]

Figura AI.10. Pruebas de estado 4 en ralentí

Caterpillar Electronic Technician 2010A v1.0 - Estado

Archivo (F) Ver (V) Diagnóstico (D) Información (I) Servicio (S) Utilidades (U) Ayuda (H)

Camión C7 [WAX62204]

- Grupo de estado 1
- Grupo de estado 2
- Grupo de estado 3
- Grupo de estado 4**
- Grupo de estado 5
- Grupo de estado 6
- Grupo de estado 7
- Grupo de estado 8
- Grupo de estado 9
- Grupo de estado 10
- Grupo de estado 11
- Grupo de estado 12
- <GRUPO TEMPORAL>
- fr

Descripción	Valor	Unidad	Mín	Máx	ECM
Velocidad del motor	1073	RPM	683	2176	Camión C7 [WAX62204]
Relación de combustible estimada	3,43	L/h	0,00	12,66	Camión C7 [WAX62204]
Consumo de combustible	0,00	km/L	0,00	0,00	Camión C7 [WAX62204]
Entrada del ventilador de aire acond	Encendido(a)				Camión C7 [WAX62204]
Ventilador de enfriamiento	Encendido(a)				Camión C7 [WAX62204]
Temperatura del refrigerante del motor	63	° C	60	63	Camión C7 [WAX62204]
Nivel de refrigerante	Desactivado				Camión C7 [WAX62204]
Porcentaje de salida del ventilador	0	%	0	0	Camión C7 [WAX62204]
Porcentaje de velocidad de ventilador solicitado por la transmisión	0	%	0	0	Camión C7 [WAX62204]

Grupos... Pantalla completa Aumentar[M] Mantener[O]

Figura AI.11. Prueba de estado 4 a 1000 rpm

Caterpillar Electronic Technician 2010A v1.0 - Estado

Archivo (F) Ver (V) Diagnóstico (D) Información (I) Servicio (S) Utilidades (U) Ayuda (H)

Camión C7 (WAX62204)

- Grupo de estado 1
- Grupo de estado 2
- Grupo de estado 3
- Grupo de estado 4**
- Grupo de estado 5
- Grupo de estado 6
- Grupo de estado 7
- Grupo de estado 8
- Grupo de estado 9
- Grupo de estado 10
- Grupo de estado 11
- Grupo de estado 12
- <GRUPO TEMPORAL>
- fr

Descripción	Valor	Unidad	Mín	Máx	ECM
Velocidad del motor	2021	RPM	683	2243	Camión C7 [WAX62204]
Relación de combustible estimada	11,24	L/h	0,00	19,52	Camión C7 [WAX62204]
Consumo de combustible	0,00	km/L	0,00	0,00	Camión C7 [WAX62204]
Entrada del ventilador de aire acond	Encendido(a)				Camión C7 [WAX62204]
Ventilador de enfriamiento	Encendido(a)				Camión C7 [WAX62204]
Temperatura del refrigerante del motor	63	° C	60	63	Camión C7 [WAX62204]
Nivel de refrigerante	Desactivado				Camión C7 [WAX62204]
Porcentaje de salida del ventilador	0	%	0	0	Camión C7 [WAX62204]
Porcentaje de velocidad de ventilador solicitado por la transmisión	0	%	0	0	Camión C7 [WAX62204]

Grupos... Pantalla completa Aumentar[M] Mantener[O]

Figura AI.12. Prueba de estado 4 a 2000 rpm

ANEXO 2

DOCUMENTO DE LA CONFERENCIA IEEE

Proceedings of the 2003 IEEE/ASME
International Conference on
Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003)

Modelling HEUI injector in MATLAB Simulink

Xuan-Thien Tran, Brian Milton, Tim White, Michal Tordon*

School of Mechanical and Manufacturing Engineering
University of New South Wales
Sydney, NSW 2052, Australia

Abstract

The present work describes the development and partial validation of a mathematical model of an Hydraulically actuated Electronically controlled Unit Injector (HEUI). The HEUI analyses include submodels of the solenoid, hydraulic differential valve (HDV), intensifier and injector subsystems. It has been implemented using the MATLAB/SIMULINK graphical software environment. The modelled HEUI is a compact, flexible diesel injector developed at the University of New South Wales in conjunction with local industry. The work undertaken is part of a wider study aimed at optimization of the design of the HEUI for dual-fuel systems.

INTRODUCTION

Achieving targets for greenhouse gas reduction requires practical, easily implemented alternative fuels for vehicles. One alternative solution to achieve greenhouse gas reduction is to convert existing truck/bus diesel engines to full or partial natural gas (NG) operation. Full NG requires a change to spark system with high conversion costs and loss of route flexibility due to the inadequate NG fuelling infrastructure. Partial NG requires dual-fuelling (DF) where the gas fuel is ignited by a pilot diesel spray. To date, the gas has been generally introduced in the inlet manifold. While this overcomes the cost and route problems, some combustion problems exist. These can be overcome by direct injection of NG and diesel into the engine cylinder more or less simultaneously.

Such dual-fuel systems require fast acting injectors with precise control of the combined dual-fuel (DF) injectors. Processes in modern high pressure electronically controlled diesel injectors are complex and involve interactions of electrical, mechanical and hydraulic systems. Development of the combined dual-fuel injector is a complex processes requiring detailed understanding of both the diesel and gas components of the dual fuel injector.

At the University of New South Wales, (UNSW), a compact, flexible HEUI diesel injector has been under-

going development, in conjunction with local industry. The unique feature of the UNSW HEUI is the fact that it uses diesel fuel as the driver for pressure amplification within the unit injector. The HEUI under development has been tested in an engine to an injection pressure of 230 MPa. The characteristics of this injector make it a good candidate for the diesel components of a DF (diesel-gas) injector. Work is in progress to develop such a DF (diesel-gas) injector based on the UNSW HEUI [1].

Further work is required to modify the HEUI for its use in the dual-fuel system. As part of the effort to explore dual-fuel combustion systems, work has been undertaken to develop a detailed mathematical model of the HEUI injector. In addition, the more common, modern high pressure injector, the Common Rail Injector (CRI) is also being studied.

A number of CRI models have been developed. Wermann et al. [2] report development of a real-time model of a common rail diesel engine. The model simulates the pump, rail, control valve and injector. The simulation has been carried out using the real-time simulator CARTS (Computer Aided Real-time Test System). Arcoumanis et al. [3] present results of an one-dimensional, transient and compressible flow model for advanced high-pressure fuel injection system. The system includes a model of the CRI.

Gavaises et al. [4] describe a model simultaneously simulating the flow inside the fuel injection system and the subsequent spray development. The model of the flow inside the fuel injection system is again one-dimensional with the flow direction coinciding with the mean pressure variation along the fuel injection system. The model is based on the mass and the momentum conservation equations for the calculation of the flow in pipes, on the equilibrium of forces for the calculation of displacement of the valves and on the mass conservation for the calculation of the pressure within the major discrete volumes of the system.

The aim of the present study is to build a one-dimensional model of the UNSW HEUI. The model should include all electrical, mechanical and hydraulic subsystems present in the injector and should be based on the principles stated in [4]. It should provide better understanding of the issues and limitations of the injector. The model will provide a tool to evaluate the

*m.tordon@unsw.edu.au

Figura AII.1 Modelling HEUI injector in MATLAB Simulink

(Tran X. , Brian Milton, White, & Tordon, 2003, p. 383)

suitability of the UNSW HEUI for the DF system.

The simulation structure of the model will be implemented in MATLAB/SIMULINK graphical software environment. This software provides a high degree of flexibility and allows simulation of both linear and non-linear elements.

HEUI INJECTOR

The description of the HEUI presented here is compiled from [5]. HEUI injectors use hydraulic rather than mechanical energy to raise the pressure of the fuel to a level suitable for direct injection. This is achieved with a differential piston inside the unit injector. The injection timing, duration and thus quantity is controlled by a solenoid. The HEUI injectors are fed by a common rail. However, since the injector contains its own pressure-amplifier, the rail pressure is significantly lower than the injection pressure.

Caterpillar has manufactured HEUI injectors since the mid-1990s. Pressure intensification in these injectors is achieved by using the engine's lubricating oil. Thus they require a supply of fuel as well as oil. This makes them physically much larger than conventional mechanical injectors and difficult to fit to new engines that are not purposely designed to receive them. A particular benefit of the UNSW HEUI is that it also exhibits a very high turndown ratio to less than 2% of the maximum delivery [5] whilst maintaining high injection pressure.

The design of the UNSW HEUI also allows high injection pressures and better control of the fuel flow since the solenoid control valve is subjected to a much lower fluid pressure. Injection pressures of up to 230MPa have been achieved whilst the solenoid may have to cope with only a little over 20MPa from the accumulator. Figure 1 shows how this HEUI uses diesel fuel as the driver for the amplification instead of an alternative oil supply.

The HEUI consists of a solenoid valve, hydraulic differential valve (HDV), intensifier and needle. A simplified description of working of HEUI follows.

In the initial position, solenoid valve (2) is not energized and the connection via throttling hole (5) from the control chamber (7) to the return line (1) is closed. The hydraulic differential valve (HDV) (3) is closed and the line pressure in the control chamber (7) forces the intensifier (8) into its bottom position. The pressure in the needle chamber (14) combined with the force of the spring (10) keeps the non-return valve (9) closed. This prevents leakage into the combustion chamber of the engine, which could otherwise occur due to worn nozzles.

When the solenoid is energized, it opens the port and allows the fuel to flow from the control chamber (7) to the return line (1). The flow of the fuel is restricted by

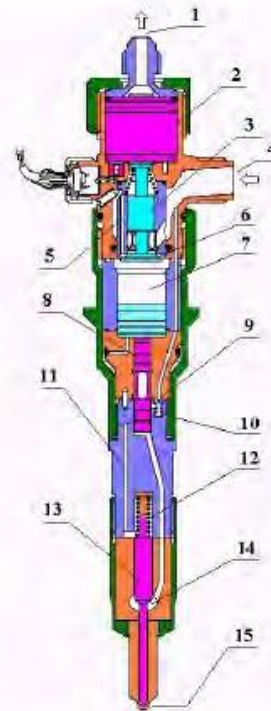


Figure 1: Diagram of HEUI [5]

the poppet valve (6). When the pressure in the control chamber (7) has decreased to a specific level, the intensifier (8) will start to move upwards, driven by the pressure difference between top and bottom of the intensifier. This intensifier movement causes pressure to decrease in the needle chamber (14), thus initiating the opening of the non-return valve (9). This is the fuel metering phase of the operation, called preliminary metering (PM).

The fuel metering phase is terminated by the de-energizing (closure) of the solenoid. After this closure the pressure difference between the inlet line (4) and control chamber (7) forces the HDV to move downwards. This allows the fuel to enter the control chamber. The pressure in the control chamber increases and causes the intensifier to move down, thereby compressing the fuel in the needle chamber (14). The compressed fuel overcomes the force of the needle spring (12), opens the nozzles (15) and initiates the injection of the fuel into the combustion chamber.

Figura AII.2 Injector HEUI

(Tran et al., 2003, p. 384)

MATHEMATICAL MODEL

Model of the solenoid valve

Based on standard magnetic circuit principles [6], the force of the solenoid can be expressed as :

$$F(x, i) = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A \cdot i^2}{x^2} \quad (1)$$

The basic equations describing the solenoid model are as follows:

$$e_b = K_b \cdot \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

$$e = i \cdot R + K_b \cdot \frac{dx}{dt} + L \cdot \frac{di}{dt} \quad (3)$$

$$m_1 \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = K_f \cdot i - P_L \cdot S_1 - k_1 \cdot (x + x_0) - f_1 \cdot \frac{dx}{dt} \quad (4)$$

Equation 2 represents back emf voltage generated by the movement of the plunger. Equation 3 is a generic electrical equation of the solenoid model consisting of back emf and the voltage drop across the equivalent inductance and resistance. Equation 4 is the motion equation of the solenoid plunger and includes the force generated by the line pressure.

Model of the hydraulic components

Because of the relatively short length of the valve, the effect of pressure waves can be neglected and the model is then based on components with lumped parameters. The pipe and injector wall flexibility is neglected in the model. It is also assumed that the fuel leakage between the injector parts is negligible. Hydraulic parts of the HEUI consist of HDV, pressure intensifier, and the injector needle. One part of the HDV is the poppet valve, which acts as flow control valve. The dynamic characteristics of the poppet valve determine the rate of pressure increase in the working chamber and therefore, the injection delay.

HDV

Equation 5 is the equation of motion of the hydraulic differential valve and includes the poppet valve:

$$m_2 \cdot \frac{d^2z}{dt^2} = P_L \cdot S_{21} - k_2 \cdot (z + z_0) - S_{22} \cdot P_W - f_2 \cdot \frac{dz}{dt} \quad (5)$$

Pressure intensifier

The movement of the intensifier generates the injection pressure. The pressure gain is proportional to the ratio of the two ends of the intensifier. Equation 6 is the equation of motion of the intensifier and equation 7 represents the mass conservation of the working chamber[7]:

$$m_3 \cdot \frac{d^2y}{dt^2} = P_N \cdot S_{32} + k_3 \cdot (y + y_0) - S_{31} \cdot P_W - f_3 \cdot \frac{dy}{dt} \quad (6)$$

$$\frac{V_{w0}}{\beta} \cdot \frac{dP_W}{dt} + S_{31} \cdot \frac{dy}{dt} = K_I \cdot S_I \cdot \frac{z}{Z_{max}} \cdot \sqrt{P_L - P_W} - K_O \cdot S_O \cdot \frac{x}{X_{max}} \cdot \sqrt{P_W - P_R} \quad (7)$$

Injection needle

High pressure generated by the intensifier overcomes the force of needle spring and lifts the needle. The fuel is injected through the nozzle orifices until the pressure drops to a sufficiently low level for the spring to force the needle down and close the nozzles. Equations 8 and 9 represent the mass conservation of the needle chamber. Equation 10 is the motion equation of the needle:

$$S_{32} \cdot \frac{dy}{dt} - \frac{V_{n0}}{\beta} \cdot \frac{dP_N}{dt} = q_U \quad (8)$$

$$q_U = K_Z \cdot S_Z \cdot \frac{u}{U_{max}} \cdot \sqrt{P_N - P_C} \quad (9)$$

$$m_4 \cdot \frac{d^2u}{dt^2} = P_N \cdot S_4 - k_4 \cdot (u + u_0) - f_4 \cdot \frac{du}{dt} \quad (10)$$

MODEL IMPLEMENTATION

Based on the equations presented in the previous Section , the model of the HEUI was implemented in a Matlab Simulink environment.

The implementation follows the basic structure of the mathematical model in that it consists of four individual blocks namely: Solenoid, HDV, Intensifier, and Needle.

The advantage of this structure is that it allows observation (using scopes) of inputs and outputs of individual blocks, which helps in the debugging stage of the program development. It also allows independent evaluation and modification of individual blocks without changing the structure of the whole model. The use of strategically placed scopes allows tracing of individual signals and thus gives a valuable graphical insight into the internal working of the HEUI.

The block representation of the model is shown in Figure 2.

Figura AII.3 Mathematical Model

(Tran et al., 2003, p. 385)

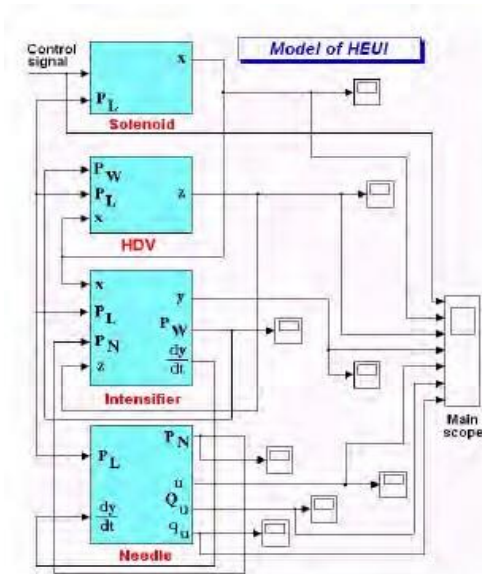


Figure 2: Block representation of the HEUI model

It is known that a number of parameters in the model are temperature dependent. The Matlab/Simulink environment allows easy modification of parameters and introduction of temperature dependence. Functions for the temperature dependence of the various parameters were implemented for bulk modulus of the fuel and the resistance of the solenoid.

The motion of the mechanical parts is limited by mechanical stops. This required implementation of a number of nonlinear constraint functions for the Solenoid Plunger, HDV, Intensifier and Needle displacement. The implemented limit functions also resolve the problem of discontinuity of the movement and flow.

MODEL VALIDATION

At this early stage, model validation and experimental apparatus are still being developed. The modified Volvo 7B230 engine (in Dynamometer Cell No.1 in the IC engines Laboratory UNSW) is being used for the validation of the model.

As part of work with the HEUI, Yudanov [12] modified this engine so that it is suitable for testing new injection technology. The engine has been modified in such a way that cylinder No.1 of the engine can be tested

independently of the other five cylinders. Cylinder No.1 has its own inlet and exhaust manifolding, fuel supply, pressurized air and instrumentation. The test engine is equipped with a separate fuel pump which supplies pressure up to 25 MPa for the separate HEUI fuel accumulator. A PC based controller was used to control the injection process based on operational signals from the engine.

The preliminary experiment shows a good match between simulated and experimental results. Figure 3 shows a comparison between the experimental result from the engine and the computer simulation. The experimental result was recorded on a digital oscilloscope. Only partial validation of the model has been achieved at this stage. Further experiments will be performed for a number of different working conditions of the engine.

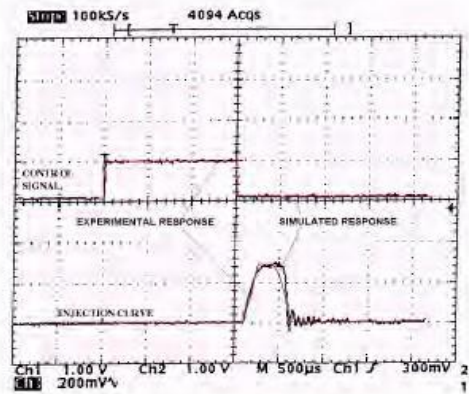


Figure 3: Result comparison of HEUI

SIMULATION RESULTS

A number of simulations were performed for different engine conditions. Simulated results indicate the contribution of the separate parts of the model to the overall timing sequence of the injection process. Simulated results will form a basis for the design modifications and improvements of the HEUI injector.

Figure 4 shows an example of the simulated injector responses with the line pressure set at 20 MPa. A control signal of 7.5 ms length applied to the solenoid is shown in Figure 4A. Figure 4B shows the displacement of the solenoid plunger in mm. Figure 4C shows the displacement of the HDV, also in mm. Figure 4D shows the displacement of the intensifier in mm and the metering phase of the injection, which determines the

Figura AII.4 Model Validation

(Tran et al., 2003, p. 386)

volume to be injected. Figure 4E shows the injection rate curve in mm³/ms.

CONCLUSION

The present work describes the development and partial validation of a mathematical model of a HEUI (hydraulically actuated electronically controlled unit injector). The model allows the simulation and investigation of the internal signals of the injector and an exploration of its design limitations.

The HEUI model includes submodels of solenoid, hydraulic differential valve, pressure intensifier and needle subsystems. It has been implemented in a MATLAB/SIMULINK graphical software environment which provides a high degree of flexibility and allows simulation of both linear and nonlinear elements.

Preliminary results from the simulation, as shown in Figure 4, give a good indication of the contributions of the separate parts of the model to the overall timing sequence of the injection. They also indicate that the speed of the solenoid will be a significant factor if faster injection is required. Detailed analysis of the HEUI model shows that, in the current arrangement, the force generated by the solenoid is counteracted by the force of compressed spring and the frictional force as well as the force from the opposing line pressure. Changing the arrangement of the valve and the magnetic circuit of the solenoid could result in a much faster acting HEUI.

At this early stage, model validation and experimental apparatus are still being developed. Further experiments are planned which will provide a full validation of the model under different working conditions of the engine. It is also planned to test the HEUI with different nozzle tips. This should aid further refinement of the model.

The work undertaken is part of a wider study aimed at the optimisation of the design of the HEUI for dual-fuel systems.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank our laboratory staff namely George Otvos, Timothy Anderson and John Dodds for their assistance with the experimental part of the work.

REFERENCES

- [1] White T., Milton B., Behnia M. *Mixing of Co-axial Natural Gas / Liquid Diesel Fuel Sprays*. Proceedings of Fourth International Colloquium "Fuel 2003" pp 307-309, Germany, 2003.

- [2] Woermann R.J., Theuerkanf H.J. and Heinrich A. *A Real-Time Model of a Common Rail Diesel Engine*. SAE Paper 1999-01-0862, 1999.
- [3] Arcoumanis C., Gavaises M., Abdul-Wahab E. and Moser V. *Modeling of Advanced High Pressure Fuel Injection Systems for Passenger Car Diesel Engines*. SAE Paper 1999-01-0910, 1999.
- [4] Gavaises M., Yamanishi M., Yamada S., Nakahira T. *Modeling the effect of an in-line Pump based Fuel Injection System Characteristics for Small Industrial DI Diesel Engines on Spray Development*. Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress. June 12-15, 2000, Seoul, Korea.
- [5] Yudanov S.V. *Development of the Hydraulically Actuated Electronically Controlled Unit Injector for Diesel Engines*. SAE Paper 952057, 1995.
- [6] Cheung N.C. *A nonlinear, short stroke proportional solenoid*. PhD thesis. UNSW, 1995.
- [7] Roberson J., Crowe C. *Engineering fluid mechanics. Sixth edition*. John Wiley & sons, Inc. 1997.
- [8] Brater E., King H., Lindell J., Wei C. *Handbook of hydraulics. Seventh Edition*. McGraw-Hill. 1996.
- [9] Stringer J. *Hydraulics Systems Analysis. An Introduction*. The Macmillan Press Ltd., 1976.
- [10] Challen B, Baranescu R. *Diesel engine. Reference book*. Butterworth-Heinemann, 1999.
- [11] Edwards S.P., Pillay A.D., Michon S. and Fournier G. *The optimisation of common rail FIE equipped engines through the use of statistical experimental design, mathematical modeling and genetic algorithm*. SAE Paper 970346, 1997.
- [12] Milton B., Casey R., Yudanov S. and Mitchell W. *Development of a tuneable diesel engine injection system for engine calibration and optimisation*. ARC collaborative research project report, 1998.

NOMENCLATURE

A - effective cross sectional area of the solenoid
 e - control voltage of the solenoid
 e_b - back emf voltage
 f_1, f_2, f_3, f_4 - equivalent coefficient of friction of solenoid, HDV, intensifier and needle respectively
 i - current through the coil
 K_I - flow coefficient from inlet line to working chamber
 K_O - flow coefficient from HDV to return line
 K_Z - flow coefficient of the injection flow

387

Figura AII.5 Conclusions

(Tran et al., 2003, p. 387)

ANEXO 3 MODELO HEUI

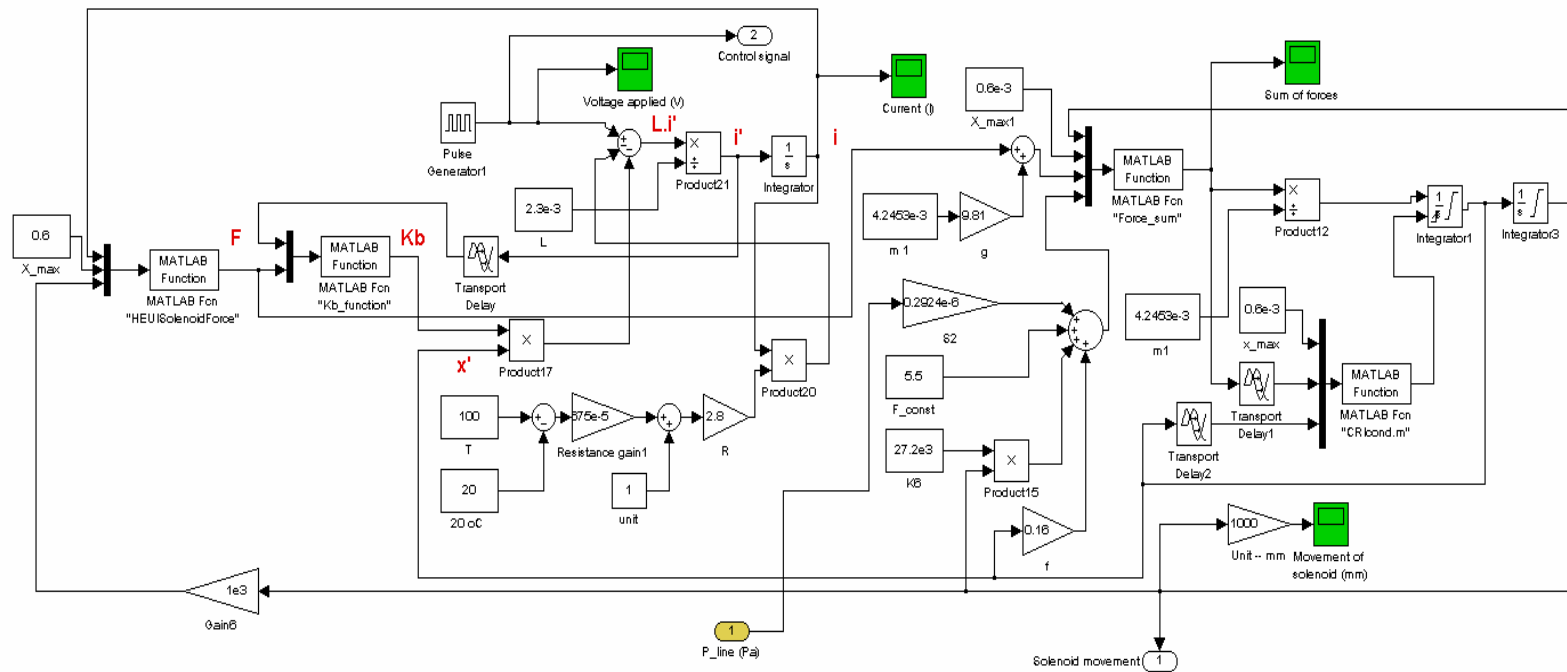


Figura AIII.1. Subistema Solenoide

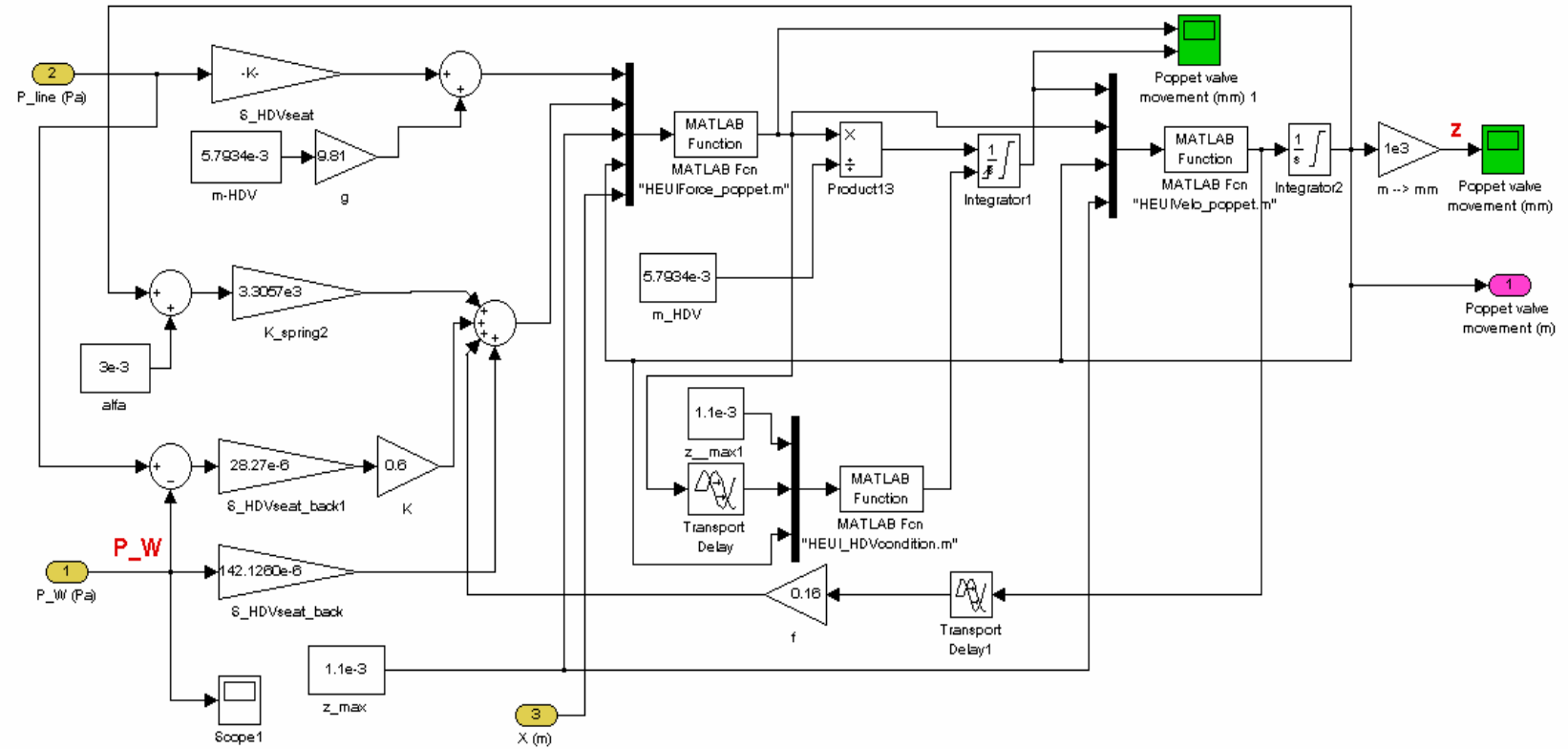


Figura AIII.2. Subsistema HDV

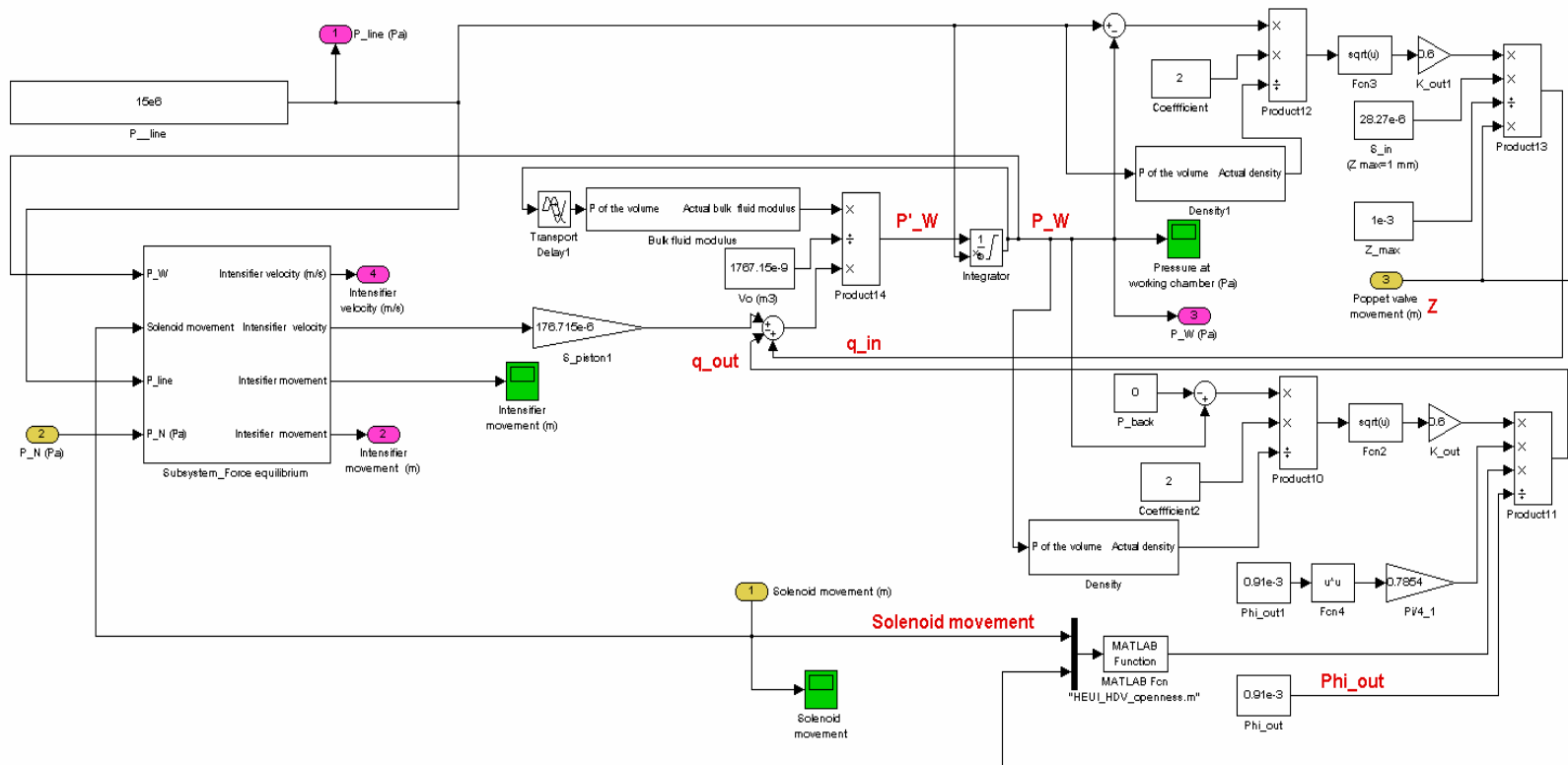


Figura AIII.3. Subsistema Intensificador

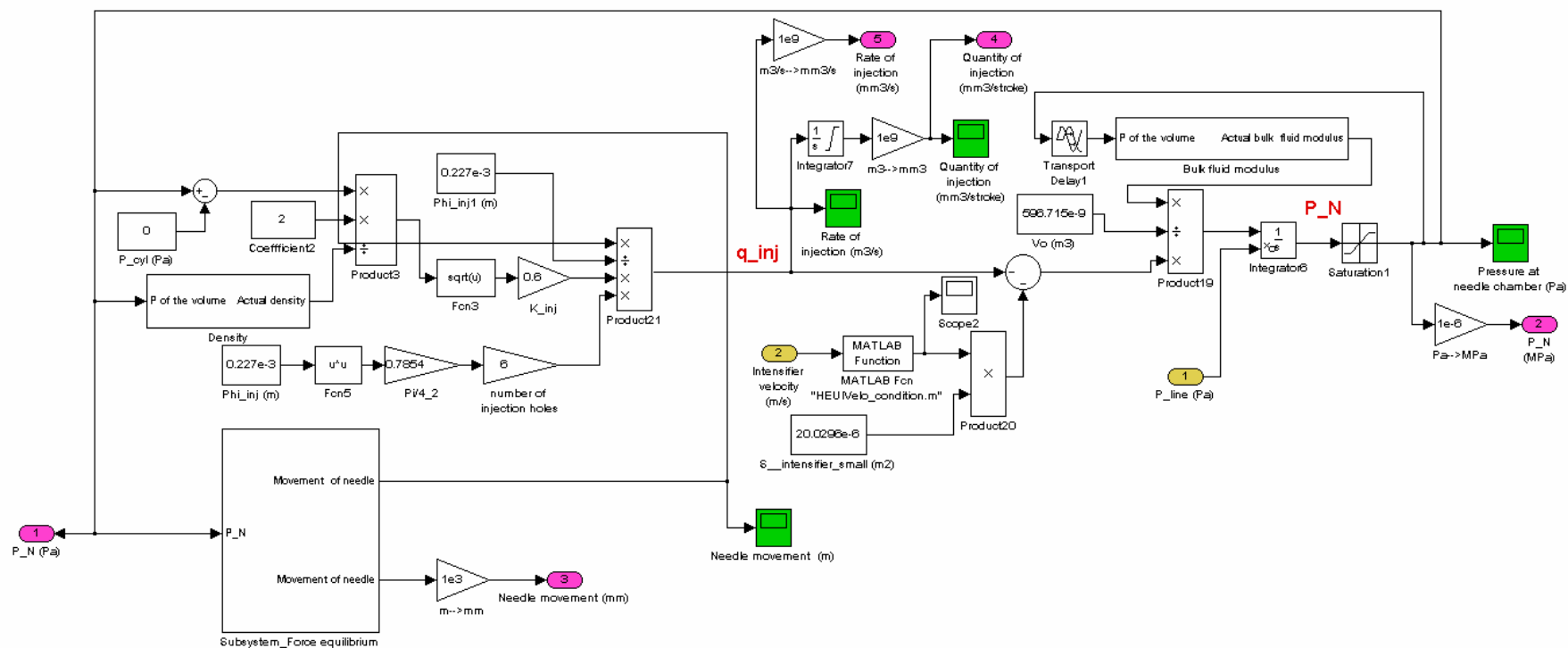


Figura AIII.4. Subsistema de la aguja del inyector

ANEXO 4

FUNCIONES EN MATLAB 2014

```
function C= CRIcond(u)
global m
y_max=u(1);
force=u(2);
y=u(3);
if (force==0)
C=1;
elseif (y==y_max)
C=1;
else
C=0;
end
C=C;

function FF = Force_sum(u)
global m
x=u(1);
x_max=u(2);
Fp=u(3);
Fn=u(4);
if (Fp>=Fn && x==x_max)
Fn=Fp;
FF=0;
elseif (Fp<=Fn && x==0)
Fn=Fp;
FF=0;
else
FF=Fp-Fn;
end
FF=FF;

function O = HEUI_HDV_openness(u)
global m
x=u(1);
z=u(2);
if (x>0)
O=x+z;
else
O=x+z;
end
O=O;

function C = HEUI_HDVcondition(u)
global m
y_max=u(1);
force=u(2);
y=u(3);
if (force==0)
C=1;
elseif (y==y_max)
C=1;
else
C=0;
end
C=C;
```

Figura IV.1 Funciones generales del sistema HEUI

```

function P_N = HEUI_Pneedle_chamber(u)
global m
Pline = u(1);
P = u(2);
velo = u(3);
if (velo > 0)
    P = Pline;
else
    P = P;
end
P_N = P;

function F_t = HEUIForce_needle(u)
global m
Froom = u(1);
Fneg = u(2);
t = u(3);
tmax = u(4);
if(Froom <= Fneg && t == 0)
    ForceT = 0;
else
    ForceT = Froom-Fneg;
end
F_t = ForceT;

function Fp = HEUIForce_poppet(u)
global m
FdownZ=u(1);
FupZ=u(2);
z_max=u(3);
z=u(4);
x=u(5);
if (FdownZ<=FupZ && z==0)
    ForceZ=0;
elseif (FdownZ>=FupZ && z==z_max)
    ForceZ=0;
elseif (FdownZ<=FupZ && z==z_max)
    ForceZ=FdownZ-FupZ;
elseif (x>0)
    ForceZ=0;
else
    ForceZ=FdownZ-FupZ;
end
Fp=ForceZ;

function F = HEUIForce_W(u)
global m
Fdown = u(1);
Fup = u(2);
y_max = u(3);
y = u(4);
if (Fdown >= Fup && y == 0)
    Force = 0;
else
    Force = Fup-Fdown;
end
F = Force;

```

Figura IV.2 Funciones de los componentes del inyector HEUI

```

function C = HEUIneedle_cond(u)
global m
force = u (1);
if (force == 0)
C = 1;
else
C = 0;
end
C = C;

function F = HEUISolenoidForce(u)
global m
i=u(1);
Max_x=u(2);
x=u(3);
if (i<=0)
F=0;
elseif (i>=0 && i<=1)
xx=Max_x-x;
F=(-83.333*xx*xx*xx*xx-7.4074*xx*xx*xx+86.389*xx*xx-60.958*xx+25.008)*i;
elseif (i>1 && i<=2)
xx=Max_x-x;
F=(-125*xx*xx*xx*xx+13.889*xx*xx*xx+97.083*xx*xx-68.437*xx+33.512)*i/2;
elseif (i>2 && i<=3)
xx=Max_x-x;
F=(-62.5*xx*xx*xx*xx-92.13*xx*xx*xx+161.6*xx*xx-85.009*xx+44.014)*i/3;
elseif (i>3 && i<=4)
xx=Max_x-x;
F=(-812.5*xx*xx*xx*xx+726.39*xx*xx*xx-109.79*xx*xx-64.258*xx+56.03)*i/4;
elseif (i>4 && i<=5)
xx=Max_x-x;
F=(-604.17*xx*xx*xx*xx+471.76*xx*xx*xx-2.1528*xx*xx-
82.446*xx+66.026)*i/5;
else
xx=Max_x-x;
F=(-604.17*xx*xx*xx*xx+471.76*xx*xx*xx-2.1528*xx*xx-
82.446*xx+66.026)*i/5;
end
F=F;

function V_YT = HEUIVelo_condition(u)
global m
v = u (1);
if (v >= 0)
V_YT = 0;
else
V_YT = v;
end
V_YT = V_YT;

function V_T = HEUIVelo_needle(u)
global m
v = u(1);
tmax = u(2);
t = u(3);
Force_T = u(4);
if (Force_T == 0 && t == 0)
V_T = 0;
elseif (Force_T == 0 && t == tmax)

```

Figura IV.3 Funciones de los parámetros de los componentes del inyector HEUI

```

V_T = 0;
else
V_T = v;
end
V_T = V_T;

function V = HEUIVelo_poppet(u)
global m
v=u(1);
force=u(2);
z=u(3);
zmax=u(4);
if (force==0 && z==0)
v=0;
elseif (force==0 && z==zmax)
v=0;
else
v=v;
end
V=v;

function V = HEUIVelo_W(u)
global m
v=u(1);
ymax=u(2);
force=u(3);
x=u(4);
y=u(5);
if (force==0 && x==0)
v=0;
elseif (force==0 && y==0)
v=0;
else
v=v;
end
V=[v];

function Kb = Kb_function(u)
global m
deri_i=u(1);
F=u(2);
if (deri_i==0)
K=0;
else
K=F/deri_i;
end
Kb=K;

```

Figura IV.4 Funciones de los parámetros del inyector HEUI