

# MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE LOS INYECTORES HEUI DE UN MOTOR CAT C7

## MODELING AND SIMULATION OF THE HEUI INJECTORS OF A CAT C7 ENGINE

Esteban Ramiro Chamorro Yandún <sup>1</sup>, Omar Santiago Lara Gudiño <sup>2</sup>

### Resumen

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. La utilización del scanner ayuda a verificar los parámetros de funcionamiento del motor, a diferentes revoluciones como en ralentí, 1000 rpm y 2000rpm. Esto identifica la cantidad de inyección de  $10 \text{ mm}^3$ , la cual, se procede a introducir en simulink para observar la curva que este valor gráfica. El osciloscopio obtiene el voltaje que ingresa al solenoide y el tipo de curva que 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 existe una toma de datos donde permita introducir algún dato que permita cambiar esta señal, por lo que se concluye que el movimiento de estas partes es igual para todos los inyectores HEUI.

**Palabras Clave:** Componentes, inyectores HEUI, matlab, modelación, simulación, señales

### 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 . The use of the scanner helps verify the engine's operating parameters, at different revolutions such as idle, 1000 rpm and 2000 rpm. This identifies the amount of injection, which, we proceed to introduce in simulink to observe the curve that this graphic value. The oscilloscope obtains the voltage that enters the solenoid and the type of curve that 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 made because there is not a data collection where it allows to introduce some data that allows to change this signal, by what is concluded that the movement of these parts is the same for all HEUI injectors.

**Keywords:** Components, HEUI injectors, matlab, modeling, simulation, signals

## 1. 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.

## 2. 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.

### 2.1 El Solenoide

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 1, la línea de presión no permite el paso, es decir, obstaculiza la apertura de la válvula solenoide.

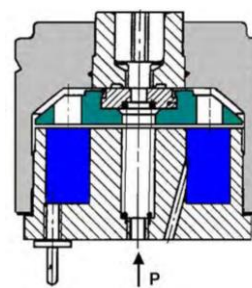


Figura 1. Esquema del solenoide HEUI [1]

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 1.

$$m_1 \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = K_f \cdot i + m_1 g - P_L S_1 - k_1 \cdot (x + x_0) - f_1 \cdot \frac{dx}{dt} \quad (1)$$

*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

## 2.2 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, comprensible 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.

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 esto 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 supera la fuerza del resorte, esta 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 2.

$$S_p = \pi \cdot z \cdot \sin \alpha (d - z \cdot \sin \alpha \cos \alpha) \quad (2)$$

*Dónde:*

$S_p$  = Área de la sección transversal

$z$  = Desplazamiento de la HDV

$d = \text{Diámetro}$

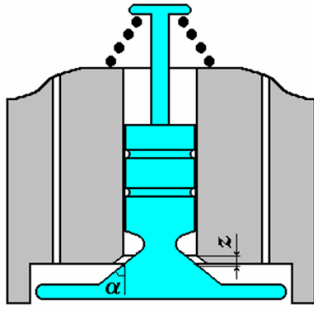


Figura 2. Válvula de asiento HEUI. [1]

Entonces, la fuerza del flujo del chorro se expresa en la Ecuación 3.

$$F_1 = \frac{q^2}{K_j S_j} \quad (3)$$

Dónde:

$F = \text{Fuerza}$

$q = \text{Taza de flujo de inyección}$

$S = \text{Área de la sección transversal}$

El flujo a través de la válvula de disco se calcula mediante la ecuación 4.

$$q = K_j S_j \sqrt{P_L - P_W} \quad (4)$$

Dónde:

$q = \text{Taza de flujo de inyección}$

$S = \text{Área de la sección trasversal}$

$P = \text{Presión}$

En la ecuación 5 se expresa todas las fuerzas que actúan sobre el disco de válvula de vástago.

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

Dónde:

$m = \text{Masa de la válvula HDV}$

$d = \text{Diámetro}$

$z = \text{Desplazamiento}$

$t = \text{Tiempo}$

$P = \text{Presión}$

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

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

$g = \text{Aceleración gravitacional}$

$k_2 = \text{Rigidez del resorte}$

$z_0 = \text{Precarga del resorte de la HDV}$

$F = \text{Fuerza}$

$f = \text{Coeficiente de fricción}$

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 6.

$$m_3 \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} = P_N \cdot S_{22} + k_3 \cdot (y - y_0) - m_3 g - S_{31} \cdot P_W - f_3 \cdot \frac{dy}{dt} \quad (6)$$

Dónde:

$m$  = Masa del intensificador

$d$  = Diámetro

$y$  = Desplazamiento del intensificador

$P$  = Presión

$S_{32}$  = Área trasversal 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 trasversal 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 7.

$$S_{31} \cdot \frac{dy}{dt} - \frac{V_{30}}{\beta} \cdot \frac{dP_W}{dt} = K_0 \cdot S_0 \cdot \frac{x}{x_{max}} \cdot \sqrt{P_W - P_R} - K_j \cdot S_j \cdot \frac{z}{z_{max}} \cdot \sqrt{P_L - P_W} \quad (7)$$

Dónde:

$S_{31}$  = Área trasversal 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) *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 8 define el movimiento de la aguja mediante el equilibrio de fuerzas.

$$m_4 \cdot \frac{d^2 \mu}{dt^2} = P_N \cdot S_4 - m_4 g - k_4 \cdot (\mu + \mu_0) - f_4 \cdot \frac{d\mu}{dt} \quad (8)$$

Dónde:

$m$  = Masa de la aguja

$d$  = diámetro

$t$  = Tiempo

$u$  = Desplazamiento de la aguja

$\mu_0$  = Precarga del muelle de la aguja

$f$  = Coeficiente de fricción

La Ecuación 9 interpreta la conservación de la masa para la cámara de la aguja.

$$S_{31} \cdot \frac{dy}{dt} - \frac{V_{30}}{\beta} \cdot \frac{dP_N}{dt} = q_U \quad (9)$$

Dónde:

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

$d$  = Diámetro

$y$  = Desplazamiento del intensificador

$V$  = Volumen

$q_U$  = taza 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 9,  $q_u$  es la tasa de flujo de inyección causada por el combustible comprimido en la cámara de la aguja. En la ecuación 10 se representa el flujo a través de los orificios de la boquilla.

$$q_U = K_2 \cdot S_5 \cdot \frac{u}{U_{max}} \cdot \sqrt{P_N - P_C} \quad (10)$$

Dónde:

- $q_U$  = tasa de flujo de inyección
- $K_2$  = 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 11.

$$S_5 \cdot \frac{u}{U_{max}} \quad (11)$$

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 tasa 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 12, la cantidad de inyección es la integral de la tasa de flujo de inyección para el período de tiempo de  $t_0$  a  $t$ .

$$Q = \int_{t_0}^t q_I \quad (12)$$

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) [1]

### 3. 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.

[3.11]

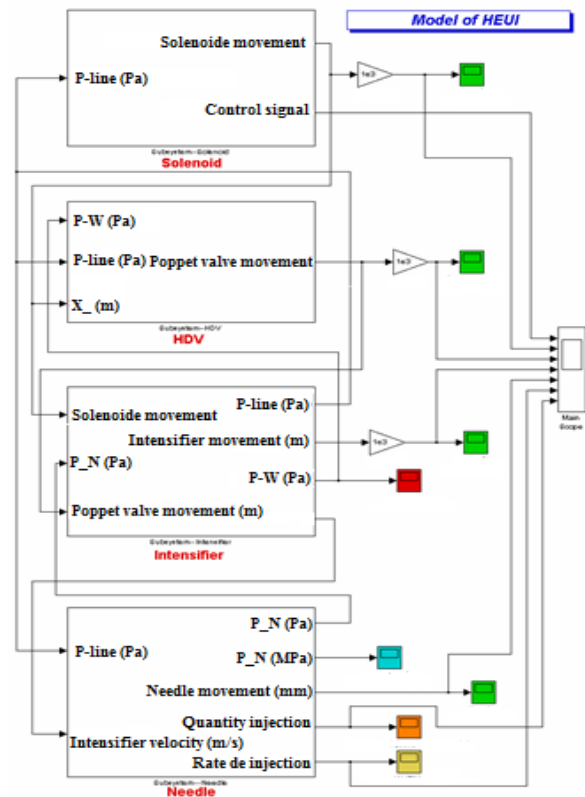


Figura 3. Diagrama de bloques del modelo HEUI

### 3.1 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 4, 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.

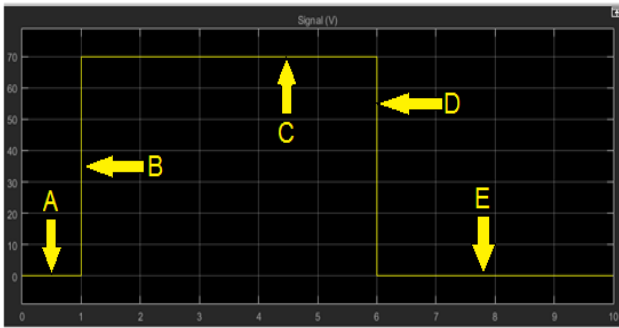


Figura 4. Señal de control del solenoide

En la Tabla 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 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.

1) *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.

2) *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.

### 3.2 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 5, 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.

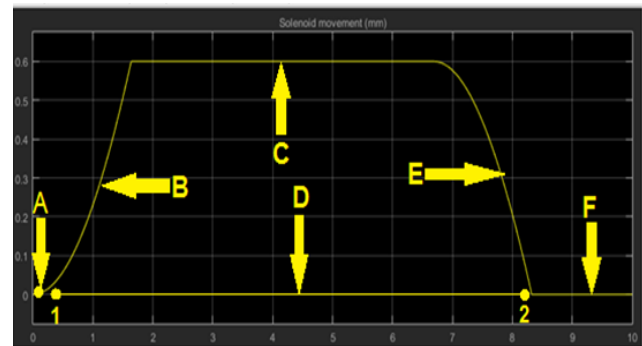


Figura 5. Señal de accionamiento del émbolo del solenoide

En la Tabla 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 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.

### 3.3 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 6, indica la señal de apertura que tiene la válvula HDV, al momento que es atraída por el émbolo del solenoide accionado por los 70V.

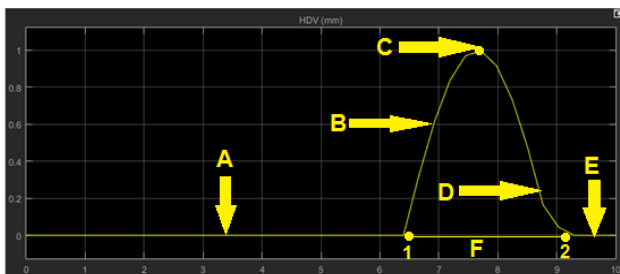


Figura 6. Señal de apertura de la válvula HDV

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, 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. 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	Etapas cuando la válvula HDV comienza a descender para proceder a cerrarse.
E	Etapas 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 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 7, 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.



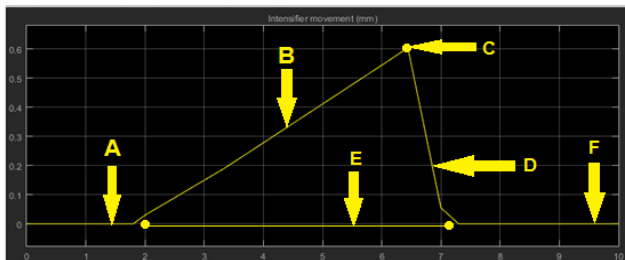


Figura 7. Señal del movimiento del intensificador

En la Tabla 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 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.

### 3.5 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 8, 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).

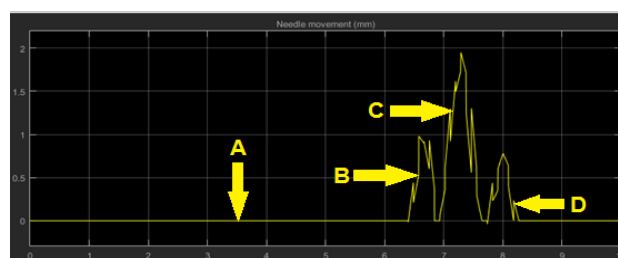


Figura 8. Simulación de la señal del movimiento de la aguja

La Tabla 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 5. Parámetros 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

### 3.6 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 9 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.

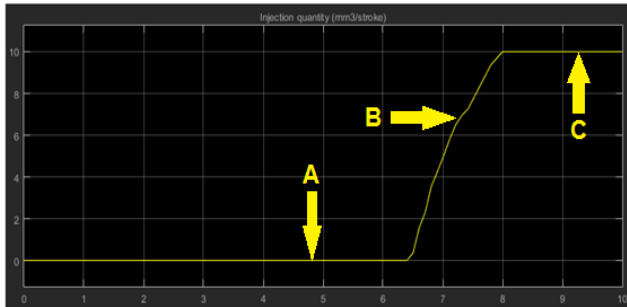


Figura 9. Simulación de la cantidad de inyección

La Tabla 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 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.

## 4. Conclusiones

- 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.

## Reconocimiento

La realización de este Trabajo de Grado fue posible, gracias a la cooperación y ayuda brindada por el Ing. Carlos Mafla Msc, Docente de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Automotriz de la Universidad Técnica del Norte.



## Referencias

- [1] Barone, M. (2014). Sistema de Inyección HEUI [Scribd]. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/210385500/Sistema-de-InyeccionHEUI-Inyeccion-Unitaria-Electronica-Hidraulica.pdf> (Marzo, 2014).
- [2] Casimiro Quispe, H. (2011). Constitución y funcionamiento del sistema EUI. Recuperado de: <https://es.slideshare.net/afirstxtrem/838356>. Pdf. (Mayo 2011).
- [3] Caterpillar. (2012). Recuperado de: <http://www.cat.com/cda/files/87775/7/pehp9526.pdf>. (Agosto 2012).
- [4] Ibañez, S. P. (2012). Mantenimiento de sistemas auxiliares del motor ciclo Diesel. (1ra ed.). Málaga, España: IC, Editorial.
- [5] Morales Alanuca, W., 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.
- [6] Merdech, O. (2013). Inyector Bomba, EUI y HEUI [Scribd]. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/129241613/Inyector-Bomba-EUI-HEUI.pdf>.(Marzo 2013)
- [7] Navarro Esbrí, S. (2014). Componentes HEUI [Scribd]. Recuperado de: <https://es.scribd.com/doc/36968742/COMPONENTES-HEUI.pdf>. (Agosto, 2014)
- [8] Romero, A. (2011). Curso de Inyección Dir. EUI y HEUI Caterpillar. Recuperado de [https://es.scribd.com/doc/53254599/Curso-de Inyeccion-Dir](https://es.scribd.com/doc/53254599/Curso-de-Inyeccion-Dir)

EUI-HEUI-CATERPILLAR.pdf  
(Abril,2011).

- [9] 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).
- [10] 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.

## Biografía de autores

Esteban Ramiro Chamorro Yandún

### Estudios.

**Primaria:** Escuela Cristóbal Colón

**Secundaria:** Instituto Tecnológico “Vicente Fierro”

**Superior:** Universidad Técnica del Norte

Omar Santiago Lara Gudiño

### Estudios.

**Primaria:** Escuela Rafael Larrea Andrade

**Secundaria:** Unidad Educativa Evangélica 4 de Julio

**Superior:** Universidad Técnica del Norte