

Modelado enfocado a control de motor diésel para usar hidrógeno en modo dual

Guillermo Becerra¹, Romeli Barbosa², Jorge O. Aguilar²,
Victor M. Sanches²

¹CONACYT - Universidad de Quintana Roo,

²Universidad de Quintana Roo,

Boulevard bahía S/N, esq. Ignacio Comonfort, Col. del Bosque,

Chetumal, Quintana Roo CP 77019, Mexico

guillermobec@gmail.com, romelix1@gmail.com, ovidio@uqroo.edu.mx,

vicsan.huerta@gmail.com

Resumen

Se describe el modelo de un motor de combustión diésel junto con el análisis de la mezcla diésel con hidrógeno que se combina para funcionar en modo dual. El motor de combustión interna además de quemar hidrocarburos puede utilizar otros combustibles e incluso operar con la mezcla. En este trabajo se pretende un bajo porcentaje de hidrógeno para aumentar el rendimiento y reducir las emisiones basadas en carbono. Esto se consigue ya que el poder calórico del hidrógeno es mayor al diésel y reduce la cantidad de carbono quemado por el diésel. Sin embargo, el hidrógeno en la presente propuesta entra en el colector de admisión para ser mezclado con aire y luego a la cámara de combustión, para mezclarlo y detonarlo junto con el diésel. La cantidad de gas que se va a ingresar depende de la potencia a la que se debe accionar el motor.

Keywords: Modelo del motor de combustión interna diésel, Mezcla diésel con hidrógeno, reducción de emisiones contaminantes.

1. INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista de movilidad, cada vez hay más investigaciones dirigidas al reemplazo de combustibles fósiles, ahorro de combustible y reducción de contaminantes como se menciona en Caliskan (2017), Becerra et al. (2016, 2017). La motivación principal de los estudios y elaboración de nuevas propuestas, están enfocadas a mejorar los vehículos, ayudar al medio ambiente y la transición energética.

Se han desarrollado diferentes trabajos con motores de combustión diésel, del enfoque de modelado y control (Outbib et al. (2006), Mendoza-Soto y Alvarez-Icaza (2013) Guzman et al. (2014)), en los que se busca documentar la cantidad adecuada de combustible para obtener la velocidad y potencia demandadas por el operador.

Por otro lado, se ha utilizado el hidrógeno como combustible para motores de combustión, principalmente en modo dual, al sustituir un porcentaje del combustible usual por hidrógeno o gas oxihidrógeno (*HHO*). De los trabajos para motores de combustión interna con enriquecimiento de combustible en modo dual se pueden mencionar Falahat et al. (2014), Ji y Wang (2009); Ji et al. (2010), donde se aplica un porcentaje de gas oxihidrógeno, producido mediante un electrolizador de la electrólisis del agua, y se analiza como respuesta la potencia incrementada y los principales gases contaminantes. También se han desarrollado investigaciones al utilizar hidrógeno en modo dual, en Tsujimura y Suzuki (2017),

Chintala y Subramanian (2016), nuevamente se analizan como principal punto de interés los gases contaminantes. Sin embargo, la producción del hidrógeno que se ingresa al motor de combustión puede producir emisiones, pero como se menciona en la mayoría de trabajos, se puede producir mediante energías limpias.

En el presente trabajo se describe el planteamiento del modelo, por un lado del motor de combustión y la dinámica de velocidad, para acoplar este con la inyección de hidrógeno que en el futuro se pretende cambie de acuerdo a la velocidad del motor. Se cuantifica en términos de energía la entrada y salida de acuerdo a los parámetros del modelo, que en los trabajos mencionados no se hace.

El documento está dividido como sigue; la siguiente sección presenta el modelo del motor diésel con las dinámicas de velocidad como salida y presión en el múltiple de admisión; en la sección posterior la representación de la mezcla diésel hidrógeno con aire; la sección de análisis de datos describe algunos detalles de la energía entrada - salida del motor y por último se presentan las conclusiones del trabajo.

2. MODELO DEL MOTOR

El modelo de Outbib et al. (2006) se detalla a continuación mediante algunas características relevantes para el modo dual diésel - *HHO*.

1. **Combustión.** Mediante la combustión se obtiene la potencia para el movimiento del vehículo, por lo

tanto la dinámica del cigüeñal se describe mediante la ecuación de potencia mecánica,

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}J\omega^2\right) = P_i - P_b, \quad (1)$$

donde P_i es la potencia química suministrada por el combustible y P_b es la potencia de frenado total, por fricción, carga, etc. P_i se expresa de la forma

$$P_i = \eta_i p_{th} \dot{m}_f, \quad (2)$$

donde η_i es la eficiencia de conversión de energía química a mecánica, p_{th} la cantidad de energía proporcionada por unidad de masa por la combustión total del combustible y $\dot{m}_f$ es el flujo de combustible.

El poder calórico p_{th} se modifica por la cantidad de gas H₂ o HHO que ingresa al múltiple de admisión, ya que en la cámara de combustión se mezclará con diésel para detonar y proporcionar la potencia mecánica en el cigüeñal.

La eficiencia se genera a partir del producto de dos términos; el primero integra las pérdidas por la fricción de la pared y efectos que dependen de la velocidad del motor; y el segundo las pérdidas debidas a los productos no quemados. Para η_i , se toma la función polinomial,

$$\eta_i = a_\lambda + b_\lambda \lambda + c_\lambda \lambda^2, \quad \lambda = \frac{\dot{m}_{ao}}{\dot{m}_f}, \quad (3)$$

con $a_\lambda, b_\lambda > 0$, $c_\lambda < 0$ y λ como la relación aire combustible.

De sustituir la ec. (3) en (2) se obtiene

$$P_i = [a_\lambda + b_\lambda \left(\frac{\dot{m}_{ao}}{\dot{m}_f}\right) + c_\lambda \left(\frac{\dot{m}_{ao}}{\dot{m}_f}\right)^2] p_{th} \dot{m}_f \quad (4)$$

La dinámica de velocidad ec. (1), con (4) queda

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J\omega} \{ [a_\lambda + b_\lambda \left(\frac{\dot{m}_{ao}}{\dot{m}_f}\right) + c_\lambda \left(\frac{\dot{m}_{ao}}{\dot{m}_f}\right)^2] p_{th} \dot{m}_f - P_b \} \quad (5)$$

De las ecuaciones anteriores, el modelo completo queda

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= p_{th} a_\lambda \frac{1}{J\omega} \dot{m}_f + \frac{1}{J} b_\lambda \left(\frac{p_{th} V_d n}{4r T_a \pi} \right) \eta_v p_a \\ &+ \frac{1}{J} c_\lambda \left(\frac{p_{th} V_d^2 n^2}{16r^2 T_a^2 \pi^2} \right) \frac{p_a^2 \eta_v^2 \omega}{\dot{m}_f} - \frac{1}{J\omega} (P_b) \end{aligned} \quad (6a)$$

$$\frac{dp_a}{dt} = \frac{T_a r}{V_a} \dot{m}_{ai} - \frac{V_d n \eta_v}{4V_a \pi} \omega p_a \quad (6b)$$

También es posible obtener la representación del mapa estático al no considerar cambios en las dinámicas del modelo ec. 6 y analizar el sistema entrada - salida. Del análisis mencionado $\frac{d\omega}{dt} = 0$ y con las ecs. (1), (4)

$$\eta_i = \frac{P_b}{p_{th} \dot{m}_f} \quad (7)$$

2. Múltiple de admisión. De la ley de la conservación de masa es posible analizar en el múltiple de admisión, la masa de aire m_a ,

$$\frac{dm_a}{dt} = \dot{m}_{ai} - \dot{m}_{ao} \quad \text{con} \quad m_a = \frac{p_a V_a}{r T_a} \quad (8)$$

donde los subíndices i, o son para el flujo de masa de aire que entra y sale del múltiple, respectivamente; p_a es la presión; V_a el volumen; r la constante del gas ideal para el aire y T_a la temperatura que

se considera constante por que varía lentamente. Además la expresión $\dot{m}_{ao}$ es función de la velocidad del motor y presión del múltiple de admisión

$$(\dot{m}_{ao}) = \eta_v (\dot{m}_{ao})_{calc} \quad \text{con} \quad (\dot{m}_{ao})_{calc} = \frac{n V_d \omega p_a}{4\pi r T_a}$$

donde n es el número de cilindros; V_d es el volumen de desplazamiento del cilindro; ω la velocidad y η_v la eficiencia volumétrica. La eficiencia puede ser evaluada por la función polinomial siguiente

$$\eta_v = \alpha_0 + \alpha_1 \omega + \alpha_2 \omega^2 \quad (9)$$

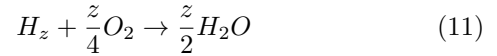
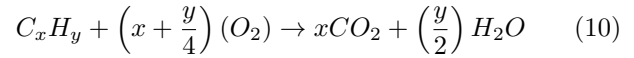
los coeficientes deben cumplir $\alpha_0, \alpha_2 > 0$ y $\alpha_1 < 0$.

El análisis anterior se requiere para la cantidad de gas HHO que se considera agregar en el múltiple de admisión, el cual será un porcentaje del aire que entra a la cámara de combustión.

3. MEZCLA DIÉSEL - OXIHIDRÓGENO

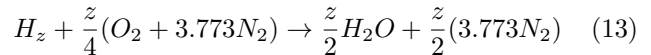
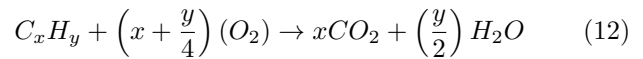
En la presente sección se analiza la relación aire combustible para los porcentajes de gas que se pretende ingresar como combustible secundario en la cámara de combustión, además del líquido a base de petróleo Chintala y Subramanian (2016). La relación aire - combustible se determina por la estructura molar de los componentes en $\frac{mol}{cm^3}$.

Para el análisis de los productos, si se considera que para la mezcla se utiliza solo oxígeno (O_2), primero para diésel ($C_y H_z$) ec. (10) e hidrógeno (H_z) ec. (11) por separado, se tiene¹

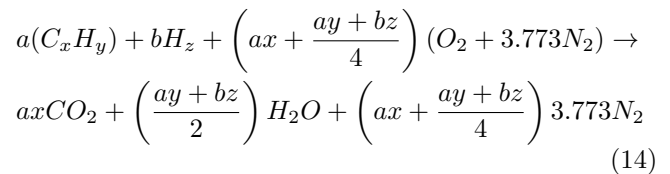


De las ecs. (10), (11) se puede notar que al utilizar oxígeno para la combustión de hidrógeno, de residuo se obtiene agua, mientras que para el diésel además de agua se tiene dióxido de carbono.

Por otro lado, el aire del ambiente contiene gran porcentaje de nitrógeno y el siguiente componente es oxígeno. Por el uso de los motores de combustión para movilidad, se emplea aire del ambiente. En el siguiente análisis se considera el aire con los componentes principales, nuevamente para diésel ec. (12) e hidrógeno ec. (13) por separado



Se puede analizar la mezcla diésel con hidrógeno y los principales componentes del aire, de la forma,



¹ x=12, y=26, z=2. Se menciona que el $p_{th} = 120 MJ/kg$ para el H_z

donde $0 < a < 1$ es la cantidad en porcentaje de diésel y $0 < b < 1$ de hidrógeno para la mezcla, ($a+b=1$).

4. ANÁLISIS CON DATOS ESTÁTICOS

Al utilizar la relación ideal aire combustible en el motor diésel, el combustible no se quema por completo y da como resultado menor eficiencia, junto con emisiones considerables. Por lo anterior se emplean motores turbocargados para incrementar la relación aire combustible y con ello, mejorar la quema del combustible, lo que por otro lado, ocasiona que en la cámara de combustión haya aire en exceso (Mendoza-Soto y Alvarez-Icaza, 2013).

En el presente trabajo se pretende utilizar el aire en exceso para cambiar una porción por gas oxihidrógeno (producido mediante un electrolizador), gracias a esto se mejora la combustión y se utiliza menos combustible diésel.

Se toman los datos de Outbib et al. (2006) (ver Cuadro 1), de un BMW 524 TD con motor diésel de 2443 cm^3 .

Tabla 1. Parámetros de simulación.

$\alpha_\lambda = 0.072$	$b_\lambda = 0.018$	$c_\lambda = -0.00017$
$p_{th} = 40000000$	$J = 0.15$	$V_d = 0.0024$
$n = 6$	$r = 0.287$	$Ta = 315$
$\alpha_0 = 0.773$	$\alpha_1 = -0.00154$	$\alpha_2 = 0.00000249$
$V_a = 0.0014$		

En el mismo trabajo se muestran los datos de potencia de salida de la tabla 2, velocidad y par, sin embargo, el flujo de entrada de aire se incrementa como en la tabla 3, de acuerdo a Mendoza-Soto y Alvarez-Icaza (2013); Mendoza-Soto (2013) para mejorar la eficiencia y lograr usar el excedente para hidrógeno.

Tabla 2. Parámetros de simulación.

$T_b [Nm]$	$\omega [rpm]$	$P_b [W]$
500	800	41,888
500	1400	73,304
500	1900	99,484
800	800	67,021
800	1400	117,286
800	1900	159,174

Tabla 3. Propuesta de datos.

$\dot{m}_{ai}$ [$\frac{Kg}{s}$]	$\dot{m}_{ao}$ [$\frac{Kg}{s}$]	λ	$\dot{m}_f$ [$\frac{Kg}{s}$]	$\dot{m}_f p_{th}$ [KW]	η
0.128	0.083	41.5	$1.9e^{-3}$	77.4	0.54
0.247	0.135	37.5	$3.6e^{-3}$	144	0.51
0.370	0.173	33.7	$5.1e^{-3}$	204	0.49
0.205	0.132	41.5	$3.2e^{-3}$	128	0.52
0.395	0.216	37.5	$5.8e^{-3}$	232	0.51
0.592	0.276	33.7	$8.2e^{-3}$	328	0.49

Con estos valores propuestos en estado estable se calcula el flujo de combustible ($\dot{m}_f$) y con este multiplicado con el poder calórico del combustible (p_{th}), da como resultado la potencia a la entrada del motor ($\dot{m}_f p_{th}$) para que proporcione la potencia a la salida (P_b).

Para evitar esfuerzos elevados en la cámara de combustión, camisa, pistón, anillos, válvulas, ventilación, aceite de lubricación y demás elementos, se pretende solo el

enriquecimiento del 5 % al 15 %, para mejorar en cierto porcentaje el rendimiento y con ello ayudar a reducir las emisiones, sin mayores modificaciones al sistema original Rojas-Mena (2006). Además, por la densidad del gas oxihidrógeno y la forma de producción mediante el electrolizador.

La tabla 4 corresponde al dimensionamiento del electrolizador para el motor mencionado: potencia de salida del electrolizador (P_{sElec}) al 5 % y 15 %, así como la potencia eléctrica necesaria a la entrada del electrolizador ($P_{eElec}[W]$), para los dos porcentajes, considerando que este tiene una eficiencia fija (entrada - salida) del 80 %, respectivamente.

Tabla 4. Propuesta de datos.

P_{sElec}	[W]	P_{eElec}	[W]
15 %	5 %	15 %	5 %
11,603	3,868	14,504	4,835
21,600	7,200	27,000	9,000
30,600	10,200	38,250	12,750
19,200	6,400	24,000	8,000
34,800	11,600	43,500	14,500
49,200	16,400	61,500	20,500

5. CONCLUSIONES

Hasta el momento se cuantificó la cantidad de aire que ingresa al motor, así como el porcentaje que se puede cambiar por hidrógeno para que el combustible se combustione adecuadamente.

Las conclusiones hasta el momento con los cálculos realizados mediante los datos del motor de combustión interna diésel, indican que es posible mejorar la eficiencia del motor alrededor del 10 % al sustituir el 15 % de la potencia química a la entrada, esto aunado a la reducción del CO_2 con porcentaje similar y que solo produce vapor de agua como residuo, lo cual, es un porcentaje significativo que en cierto periodo de tiempo ayuda al medio ambiente y a la economía del usuario, por los precios del combustible.

Por otro lado, en el mercado es posible encontrar electrolizadores de diferente material, sin embargo, no se menciona un análisis correspondiente para probar el desempeño, es decir, la energía necesaria a la entrada para producir que cantidad a la salida.

Como trabajo a futuro se pretende controlar la cantidad de hidrógeno a ingresar de acuerdo a la velocidad del motor.

REFERENCIAS

- Becerra, G., Alvarez-Icaza, L., y Pantoja-Vazquez, A. (2016). Power flow control strategies in parallel hybrid electric vehicles. *Journal of Automobile Engineering*, 230(14), 1873–1890.
- Becerra, G., Alvarez-Icaza, L., De La Mota, I.F., y Mendoza-Soto, J.L. (2017). Simulation and optimization applied to power flow in hybrid vehicles. In *Applied Simulation and Optimization 2*, 185–224. Springer International Publishing.
- Caliskan, H. (2017). Environmental and enviroeconomic researches on diesel engines with diesel and biodiesel fuels. *Journal of Cleaner Production*, 154(1), 125–129.

- Chintala, V. y Subramanian, K. (2016). Cfd analysis on effect of localized in-cylinder temperature on nitric oxide (no) emission in a compression ignition engine under hydrogen-diesel dual-fuel mode. *Energy*, 116(1), 470–488.
- Falahat, A., Hadman, M., y Yamin, J. (2014). Engine performance powered by a mixture of hydrogen and oxygen fuel obtained from water electrolysis. *International Journal of Automotive Technology*, 15(1), 97–101.
- Guzman, E., Becerra, G. Moreno, J., y Alvarez-Icaza, L. (2014). Controladores para motores diésel con incertidumbres paramétricas. In *XVI Congreso Latinoamericano de Control Automatico*, 965–970. Cancun, Q Roo, Mexico.
- Ji, C. y Wang, S. (2009). Effect of hydrogen addition on the idle performance of a spark ignited gasoline engine at stoichiometric condition. *International Journal of Hydrogen Energy*, 8(34), 3546–3556.
- Ji, C., Wang, S., y Zhang, B. (2010). Combustion and emissions characteristics of a hybrid hydrogen–gasoline engine under various loads and lean conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 11(35), 5714–5722.
- Mendoza-Soto, J. (2013). Control de un sistema de propulsión híbrido diésel-eléctrico. In *PhD Thesis*. Mexico City; Mexico.
- Mendoza-Soto, J. y Alvarez-Icaza, L. (2013). Passivity based control of a turbocharger-diesel engine system with exhaust gas recirculation. In *10th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, CCE*. Mexico City; Mexico.
- Outbib, R., Dovifaaz, X., Rachid, A., y Ouladsine, M. (2006). A theoretical control strategy for a diesel engine. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 128, 453–457.
- Rojas-Mena, M. (2006). Estudio de factibilidad del uso de hidrogeno como combustible en máquinas de combustión interna para generación de electricidad. In *Master's thesis*. Mexico City; Mexico.
- Tsujimura, T. y Suzuki, Y. (2017). The utilization of hydrogen in hydrogen/diesel dual fuel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(1), 14019–1429.