

## VARIACIÓN DE LA RUGOSIDAD Y MICROESTRUCTURA DE LA AGUJA Y TOBERA DEL INYECTOR CRDI AL UTILIZAR DIÉSEL SURFACTANTE COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVO.

### CHANGING THE RUGOSITY AND MICROSTRUCTURE OF THE NEEDLE AND TOWEL OF THE CRDI INJECTOR WHEN USING DIESEL SURFACTANT AS A FUEL ALTERNATIVE.

Julietta Bassante Barberán<sup>1</sup>, Santiago Díaz Vivanco<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Fuerzas Armadas ESPE – Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica  
e – mail :jmbassante@espe.edu.ec<sup>1</sup>, asdiaz@espe.edu.ec<sup>2</sup>

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, VIII Edición 2019, No. 10 (12)

#### Resumen

La investigación presenta el análisis del desgaste de la microestructura de la aguja y tobera del inyector DENSO 6521 utilizando una mezcla combustible diésel - surfactante de agua al 20%. La mezcla combustible es la emulsión de dos sustancias tensoactivas no iónicas. Se trabajó durante 200 horas, con inspecciones cada 50 horas. La mezcla combustible mejora los parámetros de funcionamiento del motor. A través de la balanza analítica se detecta una reducción de 0.0514 g en la masa de la tobera y 0.0059 g en la aguja, con el rugosímetro digital se determina la rugosidad en la superficie con un aumento de 0.197  $\mu\text{m}$ . Se realiza una inspección de la superficie de la aguja y de los agujeros de la tobera, mediante un microscopio donde se visualiza la presencia de desgaste, estableciendo que el uso de la mezcla combustible diésel surfactantes agua en el inyector genera desgastes prematuros en sus superficies.

**Palabras Clave:** Rugosidad, emulsión de combustible CRDI, surfactante.

#### Abstract

*The research presents the analysis of the wear of the microstructure of the needle and nozzle of the DENSO 6521 injector using a diesel fuel-water-20% surfactant mixture. The fuel mixture is the emulsion of two nonionic surfactants. Worked for 200 hours, with inspections every 50 hours. The fuel mixture improves the operating parameters of the engine. Through the analytical balance a reduction of 0.0514 g in the mass of the nozzle and 0.0059 g in the needle is detected, with the digital rugosimeter the roughness in the surface is determined with an increase of 0.197  $\mu\text{m}$ . An inspection of the surface of the needle and of the holes of the nozzle is made by means of a microscope where the presence of wear is visualized; establishing that the use of the mixture diesel fuel surfactants water in the injector generates premature wear on its surfaces*

**Keywords:** Roughness, fuel emulsion, CRDI, surfactants, wear.

## 1. INTRODUCCIÓN

El sistema Common Rail proporciona una elevada flexibilidad a la adaptación de la inyección al motor, permitiendo una alta presión de inyección desde 1600 bar hasta 1800 bar, es el sistema más actual en los vehículos de inyección diésel [1]. Estas elevadas presiones de funcionamiento permiten un mejor desempeño del motor de combustión. Los elementos responsables de la inyección a una alta presión, son la bomba de alta presión, el conducto común y los inyectores. Los inyectores son los elementos responsables del suministro de combustible a los cilindros, trabajan a elevadas presiones y a conmutaciones de elevada frecuencia, accionados por una unidad de alta potencia que excita a la bobina, requieren para su correcto funcionamiento un combustible de alta calidad. Este sistema además permite la reducción del consumo de combustible y de la emanación de gases contaminantes al medio ambiente [2]. Debido a los grandes efectos contaminantes que produce el diésel a pesar de sus innovaciones, se busca medidas alternativas para reducir su impacto en el medio ambiente, una de ellas es la búsqueda de combustibles alternativos [3].

La mezcla combustible utilizada en la investigación es una emulsión de combustible permite la mezcla de agua en aceite de manera que la mezcla sea lo más homogéneamente posible, para lo cual se utilizan tensoactivos, con el fin de evitar una separación de fases. [5] Al trabajar con la mezcla combustible es posible reducir la temperatura de funcionamiento del motor, rebajar las emisiones contaminantes y aumentar el rendimiento térmico, elevando el torque y potencia debido a microexplosiones generadas por las partículas de agua en el cilindro. [6] Los valores de BHL de los surfactantes permite clasificarlos de acuerdo a su mayor o menor solubilidad, sea en aceite o en agua. Desde luego, es importante mencionar que los emulsificantes con alto grado de BHL son más solubles en agua y son recomendables para una emulsión aceite/agua y viceversa.

El funcionamiento de los componentes del sistema CRDI al estar trabajando a elevadas presiones y en constante contacto, genera desgastes en las superficies de sus elementos. [7] En general, los sistemas de ingeniería implican el movimiento relativo entre componentes fabricados a partir de metales y no metales. Existen agentes externos tales como contaminación por sustancias químicas que comprometen el tiempo de vida útil de los componentes, así mismo la selección del tipo de materiales de fabricación y tipos

de acabados superficiales permiten obtener un mayor factor de seguridad del elemento.

Los diferentes tipos de desgaste dependen de las condiciones de trabajo a las que el elemento está sometido, el estudio del desgaste se volvió indispensable cuando se convirtió en un problema para la durabilidad y fiabilidad de funcionamiento de máquinas y sistemas [8] [9]. El desgaste adhesivo está presente dentro del inyector debido al constante contacto deslizante que posee la aguja juntamente con la tobera. Los puntos de contacto entre los componentes, mediante proyecciones microscópicas o la aspereza de la unión en la interfase donde ocurre el deslizamiento debido a los altos esfuerzos localizados, llevan a que las fuerzas de deslizamiento fracturen la unión, desgarrando al material de una superficie [9].

El desgaste por corrosión [10] se produce por las reacciones químicas a los que están sometidos la aguja y la tobera al trabajar con la mezcla combustible, debido a los tensoactivos utilizados para la preparación de la mezcla y al uso mismo del agua en la mezcla, contribuye significativamente en la velocidad del desgaste. En algunas ocasiones, las reacciones químicas ocurren primero y son seguidas por una remoción de los productos de la corrosión mediante una acción mecánica (abrasión), de otra manera, la acción mecánica podría preceder a la acción química dando como resultado la creación de pequeñas partículas de desperdicio. [11] La superficie de la aguja cuenta con un acabado superficial de carbón de gran calidad debido a las condiciones en las que va a trabajar, con una composición química y ordenamiento atómico especial. [8] La rugosidad analizada en la superficie de la aguja permite establecer la condición de su superficie, su durabilidad y el efecto que se genera al trabajar con distintos tipos de biocombustibles.

## 2. Materiales y Métodos

### Mezcla combustible

La mezcla combustible ecológica elaborada en [12], es la mezcla de diésel Premium, agua destilada y tenso activos que estabilizan las dos sustancias a una concentración del 20%. La Tabla 1 presenta los valores de BHL de los tenso activos, la mezcla de los emulsionantes en las cantidades indicadas permiten obtener una mezcla con un BHL (Balance Hidrofílico Lipofílico) de 4 que permite la combinación entre agua y aceite.

Tabla 1 Balance Hidrofílico Lipofílico (BHL) de tenso activos

Tenso activo	BHL	Cantidad (g)
Ácido oleico	1	66.7
Kolliphor	14	20
Nonil fenol de 6 moles	10.9	33.3

Se combina las cantidades de las sustancias para elaborar un kilogramo de mezcla [13], mezclando los tensoactivos por separado, luego se añadió el agua destilada y finalmente el diésel. La Tabla 2 detalla las cantidades necesarias de cada componente.

Tabla 2 Cantidades necesarias de cada sustancia

Sustancia	Cantidad (g)	Porcentaje (%)
Ácido oleico	66.7	6.67
Kolliphor	33.3	3.33
Nonil fenol de 6 moles	20	2
Agua destilada	200	20
Diésel	680	68

Para preparar la mezcla combustible, se requiere el equipo de agitación para la correcta homogeneización [13]. En la Fig. 1 se muestra el agitador mecánico BOECO el cual permite la mezcla de las sustancias, proceso realizado a 600 rpm.



Fig. 1 Agitador mecánico OSD -20 BOECO

En la Fig. 2 se presenta el agitador magnético BOECO que agita la mezcla para evitar la separación posterior.



Fig. 2 Agitador magnético MSH 420 BOECO

### Banco de pruebas CRDI

En la Fig. 3 está el banco de pruebas de inyección diésel CRDI, en el cual se instala la bomba de alta presión HP3 [14], así como el módulo activador de inyectores.



Fig. 3 Banco de pruebas CRDI

La Tabla 3 presenta los parámetros ajustados para las pruebas en el banco.

Tabla 3 Parámetros de funcionamiento del banco de pruebas CRDI

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad de giro de bomba HP3	900	RPM
Presión en el riel	5000	psi
Periodo de inyección	48	ms
Tiempo de inyección	1.6	ms
Voltaje de activación del inyector	80	V
Amperaje de activación del inyector	15	A

### Módulo activador

Para la activación de inyectores CRDI, se utiliza el módulo de la Fig. 4, dispone de la etapa de control y potencia para ajustar la velocidad, tiempo de activación y retención; a través de un convertor de 1500 W, que eleva el voltaje a 90 voltios y proporciona hasta 20A de

corriente [1], conmutando los valores necesarios para la investigación.



Fig. 4 Módulo de activación de inyectores

En la Fig. 5 se presenta el inyector DENSO 6521 CRDI electromagnético, objeto del análisis que se instala en el banco de pruebas CRDI, es accionado por el modulo activador de inyectores con un periodo ajustable de 12ms a 48ms y un ciclo de trabajo de 0% a 100% [15].



Fig. 5 Inyector DENSO 6521

### Medición de la superficie de la aguja y tobera

Para el análisis del desgaste producido por el uso de la mezcla combustible ecológica diésel - surfactante, el tiempo para el desarrollo de la prueba es de 200 horas, sin embargo, se analiza los resultados en intervalos de 50 horas para inspeccionar el estado de las caras de la leva anular y el desgaste presentado en sus superficies mediante equipo especializado [16].

En la Fig. 6 la balanza analítica ADAM, es un equipo de alta precisión con 0,0001 g, verifica la pérdida de masa que sufrió la aguja y la tobera al trabajar con la mezcla combustible durante cada intervalo pruebas.



Fig. 6 Pesaje de la leva anular

En la Fig. 7 el rugosímetro digital CMSRT210, genera la medida de rugosidad del desgaste en la superficie de la aguja, posee un menú de calibración y de configuración de los parámetros a analizar, según [17] el valor de rugosidad a inspeccionar se encuentra de 0.1 a 2  $\mu\text{m}$ , por lo que se configura el rugosímetro mediante la Tabla 4 un cut off de 0.8 mm y una longitud de medición de 4 mm, de acuerdo a la norma DIN 4768.



Fig. 7 Rugosímetro CMSRT210

Tabla 4. Correspondencia para la rugosidad media Ra

Ra $\mu\text{m}$	$\lambda_c$ Mn	Lo Mm	Lm mm
Hasta 0,1	0,25	0,25	1,25
> 0,1 – 2	0,8	0,8	4
> 2 – 10	2,5	2,5	12,5
> 10	8	8	40

En la Fig. 8 se presenta el microscopio digital invertido XJL-17AT, el cual permite observar la microestructura de la aguja y tobera, mediante una interfase con la computadora para obtener una mejor calidad de imagen.





Fig. 8 Microscopio XJL-17AT

### 3. Resultados

Considerando [15] se detalla la estimación de los kilómetros recorridos por el vehículo en referencia a las horas de funcionamiento, generando las siguientes consideraciones:

- Régimen motor: 2500 rpm
- Relación caja: 4ta (1:1)
- Relación diferencial: 6.14
- Rin neumático: 17.5 in.

#### Análisis de peso

La Tabla 5 presenta los valores obtenidos del peso de la aguja en la balanza analítica de precisión al finalizar cada período de pruebas, con la estimación de recorrido en kilómetros.

Tabla 5. Desgaste de la aguja

Elemento	0	50	100	150	200	Horas
	0	340	700	102	136	s
		0	0	00	00	Km
Aguja	3.3032	3.2981	3.2979	3.2976	3.2973	gramos

En la Fig. 9, se representa el desgaste de la aguja del inyector, en donde se obtuvo una reducción de 0.0059 g entre el valor máximo y mínimo que representa el 0.178 % del peso inicial. Se puede observar que el desgaste presentado es regular sin variaciones significativas. El punto de mayor desgaste se produjo entre 0 y 50 horas.

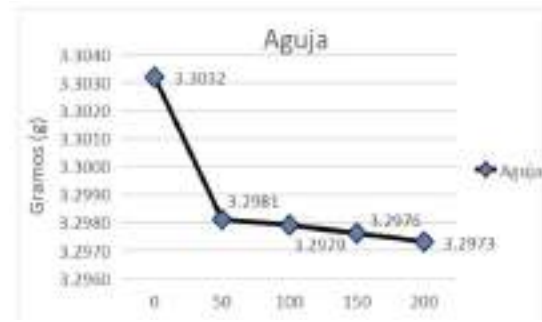


Fig. 9 Desgaste de la aguja

La Tabla 6 presenta los valores obtenidos del peso de la tobera al finalizar cada período de pruebas, con la estimación de recorrido en kilómetros.

Tabla 6 Desgaste de la Tobera

Elemento	0	50	100	150	200	Horas
	0	3400	7000	1020	1360	as
		0	0	0	0	Km
Tobera	22.8263	22.7981	22.7818	22.7752	22.7748	gramos

En la Fig. 10, se observa el desgaste de la tobera del inyector, en donde se generó una reducción de 0.0514 g de masa entre el valor máximo y mínimo que representa el 0.225 % del peso inicial. El punto donde se presentó la mayor reducción fue al trabajar entre 0 y 150 horas.

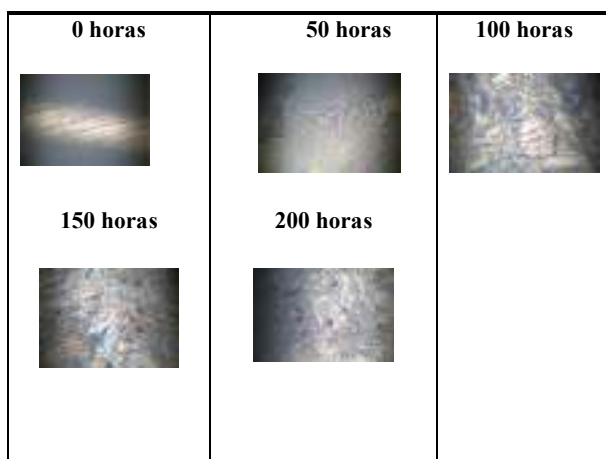


Fig. 10 Desgaste de la tobera

#### Inspección visual

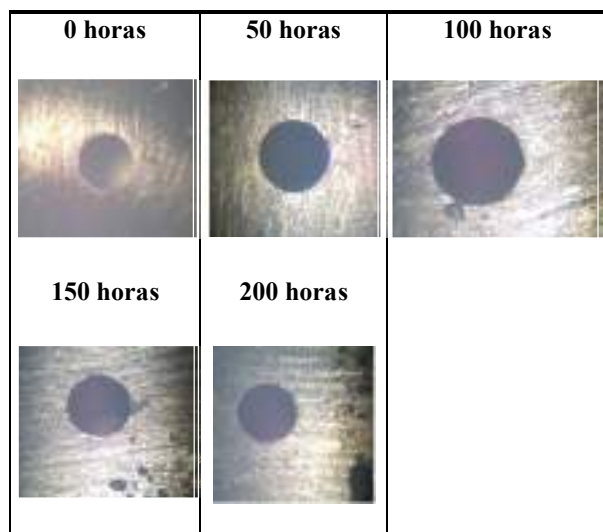
En la Tabla 7 se puede observar el análisis microscópico de la estructura de la aguja del inyector, en donde se puede visualizar que a partir de las 50 horas de funcionamiento la estructura comenzó a presentar un cambio de coloración por la contaminación con la mezcla combustible, cabe recalcar que este componente posee un recubrimiento de carbono para aumentar su dureza superficial, sin embargo a partir de las 150 horas se comenzó a evidenciar la presencia de desgaste abrasivo y cavitación en su superficie.

Tabla 7 Microestructura de la aguja de la tobera



En la Tabla 8 se puede visualizar el análisis microscópico de la estructura del perfil del agujero de pulverización del inyector, en donde se puede visualizar que no existe una deformación o destrucción del perfil, se puede visualizar la existencia de desgaste abrasivo en el área alrededor del agujero a partir de las 100 horas de funcionamiento.

Tabla 9. Valores de rugosidad en la aguja del inyector



### Análisis de rugosidad

Según el trabajo realizado por [18], para el análisis de rugosidad se considera el modelo matemático de análisis de regresión para proyectar el desgaste a futuro.

La Tabla 9 presenta los valores de rugosidad obtenidos en la aguja del inyector.

Tabla 8 Microestructura del agujero de pulverización de la tobera

Aguja					
Horas	0	50	100	150	200
Ra(μm)	0.208	0.213	0.308	0.361	0.405

La Fig. 11 presenta el cambio de rugosidad que sufrió la superficie de contacto de la aguja del inyector, en la cual se puede observar que la rugosidad aumento conforme aumentaron las horas de funcionamiento, se generó una variación de 0.197 μm entre el valor mínimo y máximo, aumentando su rugosidad en 94.71 % con un máximo de 0.405 μm.

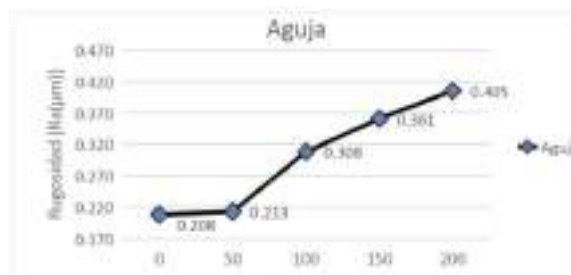


Fig. 11 Desgaste de la tobera

### 4. Conclusiones

En el análisis de la microestructura mediante un microscopio, permitió visualizar la contaminación que presentaron los elementos de principal desgaste en el inyector, la presencia de desgaste abrasivo y cavitación fue evidente en la aguja y pulverizador, el orificio del pulverizador de la tobera no presento deformación, pero si cavitación en sus alrededores.

La masa de la aguja obtuvo una reducción de 0.0059 g valor que representa el 0.178 % del peso inicial. En la tobera se generó una reducción de 0.0514 g en su masa que representa el 0.225 % del peso inicial.

La rugosidad en la aguja aumento conforme aumentaron las horas de funcionamiento, se generó una variación de 0.197 μm entre el valor mínimo y máximo, aumentando su rugosidad en 94.71 % con un máximo de 0.405 μm, según la norma DIN 4768 la rugosidad de la aguja pertenece al grado N5 donde las marcas de mecanizado no se aprecian ni con el tacto ni con la vista pero si con aumento.

La mezcla combustible a una concentración del 20% genera beneficios en la reducción de gases contaminantes como óxidos nitrosos y monóxido de carbono, sin embargo la presencia de agua y químicos generan desgaste prematuros en los componentes del inyector CRDI DENSO 6521 por la falta de lubricidad.

### 5. Referencias

[1] Denso Corporation. (2004). Manual de servicio.

- Japón: Denso Corporation.
- Alptekin, E. (2017). Evaluation of ethanol and isopropanol as additives with diesel fuel in a CRDI diesel engine. *Fuel*, 161 - 172.
- [2] Vivek W., K., & V.M., K. (2016). Effect of nanofluid additives on performances and emissions of emulsified diesel and biodiesel fueled stationary CI engine: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1338–1348.
- [3] Ahmad et al, M. (2018). Emulsifier-free Water-in-Diesel emulsion fuel: Its stability behaviour, engine performance and exhaust emission. *Fuel*, 454-462.
- [4] Holmberg, K., Jönsson, B., Kronberg, B., & Lindman, B. (2003). *Surfactants and polymers in aqueous solution*. Inglaterra: John Wiley & Sons, Ltd.
- [5] Eliezer, A. (s.f.). Caracterización del comportamiento de un motor mono-cilíndrico de encendido por compresión usando combustible emulsionado. Tesis de maestría. Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, La Habana .
- [6] Sivakumar, S., Raju, B., & Rajulapati, K. (2018). Influence of ZrB<sub>2</sub> hard ceramic reinforcement on mechanical and wear properties of aluminum. *Ceramics International*, 1-54.
- [7] Kotia, A., Borkakoti, S., & Kumar, S. (2017). Wear and performance analysis of a 4-stroke diesel engine employing nanolubricants. *Particuology*, 1 - 10.
- [8] Hiroshi, M., & Alan, H. (2013). Wear equation for adhesive wear established through elementary process of wear. *Wear*, 186 - 192.
- [9] Xian-man, Z., & Wei-ping, C. (2015). Review on corrosion-wear resistance performance of materials in molten aluminum and its alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 1715–1731.
- [10] Ospina, G., Mohamed, Y., Salah, A. A., Mohamed, I. H., & Adel, M. H. (2018). Engine roughness and exhaust emissions of a diesel engine fueled with three biofuels. *Renewable Energy*, 1 - 8.
- [11] Pucuji, D. (2016). Investigación del potencial energético de la emulsión diésel -agua al 5-10-15 Y 20 % con el uso de surfactante para determinar su influencia en los parámetros mecánicos y térmicos del motor de combustion interna. Tesis de Pregrado. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Latacunga.
- [12] Carrillo, H., Taco, C. & Erazo, G. (2018). Análisis termográfico y control de emisiones de la mezcla combustible diésel – surfactantes del agua en el motor MZR-D 2.5. Tesis de pregrado. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Latacunga.
- [13] Salinas, C., & Villavicencio, R. (2013). “Diseño y construcción mecánica de un banco de comprobación de inyectores diesel: Denso, Delphi, Bosch del sistema CRDI.”. Tesis de pregrado. Univerdidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Latacunga.
- [14] Bassante, J., Díaz, S. & Erazo, G. (2019). análisis del desgaste del pulverizador y comportamiento electrónico de inyectores crdi y bomba de alta presión cp al utilizar la mezcla combustible diesel surfactantes de agua”. Tesis de pregrado. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Latacunga.
- [15] Analuisa, R., & Vizcaino, E. (2016). Análisis de durabilidad de los materiales de fabricación del inyector denso 6521 del sistema de inyección crdi al trabajar con la mezcla combustible obtenido a partir del aceite de motor reciclado. Tesis de Pregrado. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Latacunga.
- [16] B, B., & M, K. (2018). Submicron-scale experimental and theoretical analyses of multi-asperity contacts with different roughnesses. *Tribology International*.
- [17] Weiwei, X., Konghao, Z., Jianjun, W., Yajun, L., & Qiang, L. (2019). Modeling and numerical analysis of the effect of blade roughness on particle deposition in a flue gas turbine. *Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.02.033>

## 6. Biografías



<sup>1</sup>Julieta Bassante. -, Ingeniera Automotriz, Gestor técnico de la Unidad de Educación Continua de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE.



<sup>2</sup>Santiago Díaz. - Ingeniero Automotriz, Docente Tiempo Completo de nivelación SII 2019, del Departamento de Ciencias exactas, Mejor egresado de la carrera de Ingeniería Automotriz promoción 2019 de la Universidad de Fuerzas

Armadas ESPE.

Autor para correspondencia:  
jmbassante@espe.edu.ec

REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN	
Fecha recepción	20 octubre 2019
Fecha aceptación	20 diciembre 2019