

Influencia de la Frecuencia y Tiempo de Inyección en el Funcionamiento de Inyectores CRDi

Influence of Injection Frequency and Time on the Operation of CRDi Injectors

Carlos Mafla-Yépez^{a,b} , César Morales-Bayetero^{a,b} , Jorge Melo-Obando^{a,b} , Paúl Hernández-Rueda^{a,b} , Jesús Mafla-Ortiz^c

^a Grupo de Investigación de Ciencias en RED (eCIER), Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador

^b Grupo de Investigación de Ingeniería Automotriz (GIIA), Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador

^c Independiente, Ibarra, Ecuador

Recibido: XX/XX/2024, Aceptado: XX/XX/2025

Autor de correspondencia: Carlos Mafla: cnmafla@utn.edu.ec

DOI: <https://doi.org/10.53358/ideas.v7i2.1095>



PALABRAS CLAVE

Inyectores CRDi,
Frecuencia, Tiempo de Inyección,
Entrega de Combustible,
Alta Presión

RESUMEN

El artículo analiza la influencia de la frecuencia y el tiempo de inyección en el funcionamiento de inyectores electrónicos. En el proceso experimental, se controlaron dos variables independientes y tres dependientes, obteniendo la cantidad de entrega, retorno de combustible y presión en el riel mediante el uso de un equipo de simulación de pulsos de inyección. Se realizaron pruebas con diferentes combinaciones de tiempo y frecuencia. Los resultados mostraron que la frecuencia tiene una influencia significativa en la cantidad de inyección y retorno de combustible, siendo la variable más relevante. Se encontró que la entrega de combustible aumenta en función del tiempo y la frecuencia, siendo 1.5 ms el punto donde se obtuvo la mayor entrega al variar de 5 a 20 Hz. Además, la presión en el riel mostró una relación inversa con el tiempo de inyección y frecuencia, reduciéndose en un 17.5 %, 11.1 %, 11.4 % y 11.7 % en los valores de 5, 10, 15 y 20Hz, respectivamente. El análisis estadístico reveló que los modelos ajustados explican de manera efectiva la variabilidad de entrega de combustible y la presión del riel.

KEYWORDS

CRDi Injectors,
Frequency,
Injection Timing,
Fuel Delivery,
High Pressure

ABSTRACT

The article analyzes the influence of injection frequency and duration on the performance of electronic injectors. In the experimental process, two independent variables and three dependent variables were controlled, measuring the amount of delivery, fuel return, and rail pressure using an injection pulse simulation device. Tests were conducted with different combinations of time and frequency. The results showed that frequency has a significant influence on the amount of injection and fuel return, being the most relevant variable. It was found that fuel delivery increases as a function of time and frequency, with 1.5 ms being the point at which the highest delivery was achieved when varying from 5 to 20 Hz. In addition, rail pressure showed an inverse relationship with injection time and frequency, decreasing by 17.5 %, 11.1 %, 11.4 %, and 11.7 % at 5, 10, 15, and 20 Hz, respectively. Statistical analysis revealed that the fitted models effectively explain the variability in fuel delivery and rail pressure.

1. Introducción

La inyección de combustible es un proceso complejo que requiere mucho trabajo. Se han realizado muchos estudios sobre el impacto de la variación en la presión de inyección de combustible en el rendimiento y las emisiones de los motores de combustión interna [1], el intervalo de inyección puede alterar el momento de la colisión y la posición de las columnas de rociado, que son muy importantes para la ignición de diésel [2]. Además, el consumo de combustible varía dependiendo del régimen del motor. Por un lado, se reduce la pérdida de calor, lo que aumenta la temperatura y la presión dentro del cilindro. Por otro lado, la alta presión de inyección a régimen más altas también contribuye a la atomización y evaporación del combustible [3]. Cuando se trata de la carga y la velocidad del motor, el consumo de combustible aumenta a medida que aumenta la carga y la velocidad del motor, para producir más potencia [4]. A alta presión, se inyectará una gran cantidad de combustible en la cámara de combustión, lo que puede provocar un rápido aumento de la tasa de liberación de calor en la etapa inicial de la combustión. Por lo tanto, es necesario ajustar la cantidad de combustible en la combustión premezclada a través de un control efectivo de la dosificación de combustible [5].

1.1. Inyectores CRDi

Una de las soluciones más viables para combatir los problemas ambientales y socioeconómicos que generan los combustibles fósiles es mejorar el funcionamiento del sistema de inyección y en especial de los inyectores, ya que estos poseen una serie de características que ayudan a solventar dicha problemática [1]. Para la utilización de combustibles alternativos se realizó pruebas con diferente número de orificios en los inyectores, así como con diferentes formas de la cámara de combustión [6]. Se han propuesto varios ideales para reducir en gran medida las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) y material particulado (PM), siendo estos los más perjudiciales para el medio ambiente, la reducción del tamaño del motor, el retardo de la sincronización de la inyección o la dilución mediante gases de escape se postulan como posibles soluciones viables ante la problemática planteada [7]. Se prueban dos tipos de inyecciones, retardadas y divididas que funcionan en conjunto con la recirculación de gases (EGR), el primer tipo de inyección esta dado por una sola inyección principal a diferentes parámetros, mientras que la segunda está compuesta por una inyección piloto y una principal a parámetros preestablecidos [8].

1.2. Ancho de pulso de inyección

El ancho de pulso de inyección (API) es un parámetro importante en la inyección electrónica de combustible (EFI) en los motores de combustión interna. Según [9], el API influye en la cantidad de combustible inyectado y, por lo tanto, en el rendimiento del motor. Por otro lado, [10] mencionan que el API también afecta la emisión de gases de escape, especialmente en motores diésel. Una API demasiado corta puede provocar una combustión incompleta y un exceso de emisiones, mientras que una API demasiado larga puede reducir la eficiencia del motor y aumentar la emisión de óxidos de nitrógeno (NOx). En cuanto a la selección óptima de API, algunos estudios sugieren que puede variar según las condiciones de conducción. Según [11], un API más corto puede mejorar la eficiencia del combustible en condiciones de carga baja, mientras que un API más largo puede ser beneficioso para la aceleración y la velocidad máxima. Además, [12] encontraron que un API más largo puede reducir la vibración del motor, especialmente en bajas rpm. En la actualidad, la mayoría de los sistemas EFI utilizan algoritmos de control automático para ajustar el API en tiempo real. Según [13], estos algoritmos se basan en múltiples factores, como la velocidad del motor, la carga del acelerador, la temperatura del aire de admisión y la posición del cigüeñal. Además, algunos investigadores han propuesto métodos para optimizar el API utilizando técnicas de aprendizaje automático [14], [15] o modelos de simulación numérica.

1.3. Tiempo de inyección y caudal

En comparación con el modo de inyección de elevación alta, el inyector en el modo de inyección de elevación baja tiene una mayor precisión de control en la cantidad de inyección, y esta cambia casi linealmente con el IPW [16]. El flujo dentro de la boquilla del inyector de combustible diésel está directamente asociado con la posterior atomización del chorro y el rendimiento de la mezcla aire-combustible [17]. Los parámetros de mezcla son el inicio de la inyección, curva de inyección y duración de la inyección, presión de inyección, número de inyecciones. Los parámetros de inyección (preinyección, inyección principal, cantidad de combustible inyectada, presión de inyección y comienzo de la inyección). La ECU calcula los parámetros de inyección en función de otros parámetros externos como: temperatura, velocidad

del motor, carga, altitud, dwell time (DT) en el retraso hidráulico y la masa de combustible inyectada, los tiempos de energización correspondientes a la masa constante de combustible de 70 mg + 40 mg y valores fijos de $p_{rail} = 80$ MPa y $p_{back} = 5$ MPa para los valores de DT empleados desde 1.15 ms hasta 3 ms, el retraso hidráulico de la segunda inyección aumenta en el intervalo de 1.15 ms \leq DT \leq 1.5 ms y disminuye para valores de DT mayores a 1.5 ms [18].

1.4. Frecuencia de inyección

La investigación relaciona el proceso de diagnóstico de los elementos eléctricos y electrónicos que son utilizados como componentes del sistema de control electrónico de inyección diésel riel común CRDi mediante el uso de una interfaz gráfica multifunción que relaciona el voltaje y corriente precisos del sistema CRDi [19]. Influencia de las estrategias de inyección múltiple en la caracterización del chorro diésel empleando inyectores diésel tipo solenoide y piezoeléctrico se centra en profundizar en el conocimiento de la influencia de las estrategias de inyección múltiple en el comportamiento del chorro diésel, utilizando un inyector diésel piezoeléctrico y un solenoide, específicamente evaluando los parámetros macroscópicos del chorro diésel, tales como el área, el ángulo y la penetración, bajo diferentes estrategias de inyección [20]. La simulación de grandes remolinos (LES) de combustión por pulverización de inyección múltiple en condiciones similares a las de un motor se realiza utilizando un modelo acoplado de una función de densidad de probabilidad transportada por un campo estocástico euleriano (ESF T-PDF) y un colector generado por flamelet (FGM) [21].

2. Materiales y Métodos

En la investigación se utiliza un sistema de inyección diésel CRDi instalado en un banco de pruebas de bombas de inyección, a través del cual se controla el giro de la bomba, tiempo de prueba y se obtiene la cantidad de combustible inyectado y su retorno desde un inyector electrónico. Además, se dispone de un equipo simulador de pulsos de inyección que permitirá controlar el tiempo del pulso de inyección y la frecuencia en la señal de activación hacia el inyector. En la Fig. 1 se indica los materiales y equipos utilizados en la investigación.

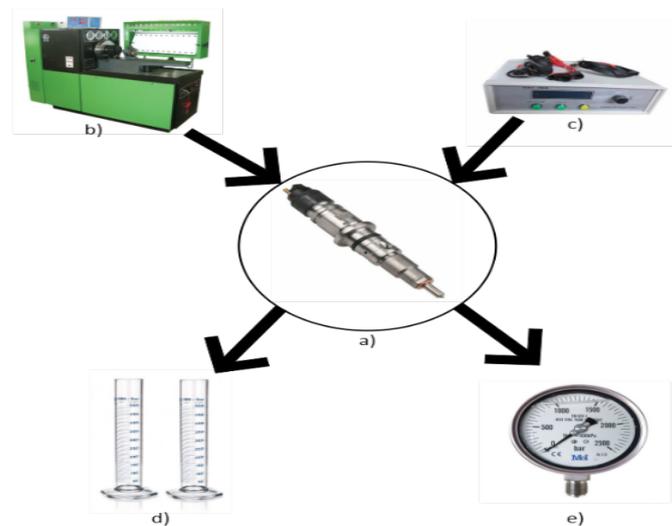


Figura 1: Equipos y materiales: a) Inyector electrónico, b) Banco de inyección diésel, c) Simulador de pulsos de inyección, d) Entrega y retorno de combustible, e) Manómetro alta presión.

2.1. Materiales

2.1.1. Inyectores sistemas CR

Los inyectores con sistema CR que se utilizaron en esta investigación son de marca Bosch tipo CRIN2-16-BL, principalmente utilizados en camiones, cuentan con una alimentación de 12 voltios y una presión máxima de 600 bares por inyector.



Figura 2: Inyector CRIN2.

2.1.2. Inyectores sistemas CR

La función del probador CRI200 es simular los pulsos de trabajo que son enviados desde el computador del vehículo hacia los inyectores. Los parámetros de la señal pueden ser ejecutados según la necesidad de la investigación, también se puede agrupar información con el fin de facilitar el análisis de fallas en varias disposiciones de trabajo del inyector.



Figura 3: Inyector CRIN2.

2.2. Diseño experimental

Para el proceso experimental se establecen las condiciones generales para las diferentes pruebas, como: 1000 RPM de giro de la bomba de inyección diésel de alta presión y 300 strongers (ciclos) para el tiempo de muestreo. Además, se establecen dos variables independientes y tres dependientes para cumplir con los objetivos planteados, las cuales se indican en la Tabla 1.

Tabla 1: Variables de estudio.

| Tipo Variable | Variable | Unidad | Niveles |
|---------------|---------------------|--------|---------------|
| Dependiente | Tiempo inyección | ms | 1, 1.5, 2 |
| | Frecuencia | Hz | 5, 10, 15, 20 |
| Independiente | Entrega combustible | ml | - |
| | Retorno combustible | c | - |
| | Presión riel | Bar | - |

De esta manera se obtiene la cantidad de entrega, retorno de combustible desde el inyector y la presión en el riel con los diferentes valores de tiempo de inyección y frecuencia que son controlados a través del equipo de simulación de pulsos de inyección. En la Fig. 4 se muestra el flujograma del método aplicado.

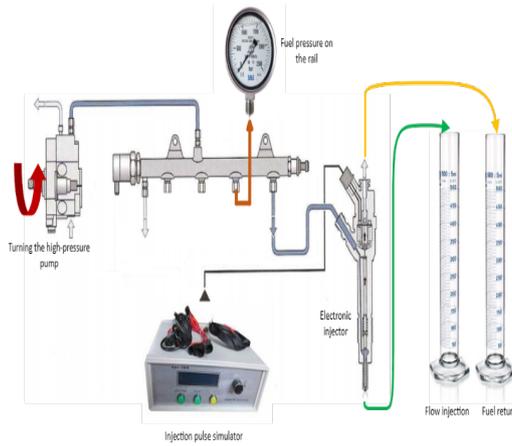


Figura 4: Flujograma del método aplicado.

Los valores obtenidos en cada una de las pruebas aplicadas permitirán realizar un análisis estadístico para conocer la influencia de las variables dependientes en el funcionamiento del inyector y el sistema de alta presión.

2.2.1. Procedimiento pruebas de entrega y retorno de combustible

El funcionamiento del inyector se controla a través del equipo simulador de pulsos de inyección, con el cual se controla el tiempo del pulso de inyección y la frecuencia del trabajo del inyector, además se programa el giro de la bomba a 1000 RPM y 300 strongers en el banco de pruebas de bombas de inyección diésel. De esta manera se obtiene la cantidad de entrega y retorno de combustible en los diferentes parámetros asignados en el diseño experimental de 1, 1.5 y 2 milisegundos de tiempo del pulso de inyección, además de 5, 10, 15 y 20 Hz de frecuencia. Con los valores obtenidos se analiza la influencia de estos dos parámetros en el funcionamiento del inyector y el sistema de alta presión.

2.2.2. Procedimiento pruebas de alta presión

Las pruebas en el riel de alta presión se realizan con las mismas condiciones de 1000 RPM del giro de la bomba y es controlada a través de un manómetro instalado en una de las salidas hacia los inyectores en el riel común. El valor de presión se obtiene en cada uno de los parámetros de funcionamiento del inyector variando el tiempo del pulso de inyección y la frecuencia, para de esta manera determinar la influencia del trabajo del inyector en los valores de alta presión en el riel.

3. Resultados

3.1. Entrega de combustible

Los resultados de entrega de combustible relacionados con las variables de frecuencia y tiempo del pulso de inyección indican que los dos parámetros tienen gran influencia en la variación de la cantidad de inyección de combustible con cada una de las combinaciones realizadas en las diferentes pruebas, siendo la frecuencia la de mayor importancia en los resultados obtenidos, como se puede observar en la Fig. 5 del diagrama de Pareto.

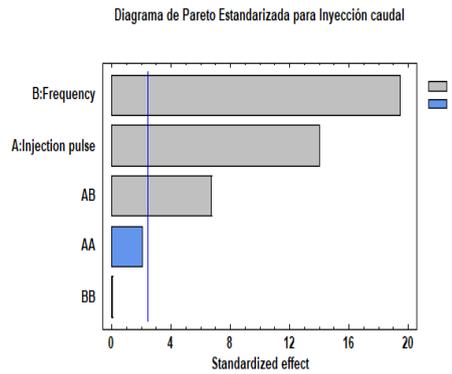


Figura 5: Diagrama de Pareto estandarizada para entrega de combustible.

En la Tabla 2, se muestra los resultados del análisis de varianza para la entrega de combustible en partes separadas para cada uno de los efectos, por lo que prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso existen 3 valores que tienen un valor P menor al 0.05 indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0

Tabla 2: Análisis de varianza para entrega de combustible.

| Fuente | Suma de Cuadrados | G1 | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|------------------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| A: Pulso inyección | 567.845 | 1 | 567.845 | 195.15 | 0.0000 |
| B: Frecuencia | 1105.96 | 1 | 1105.96 | 380.08 | 0.0000 |
| AA | 12.615 | 1 | 12.615 | 4.34 | 0.0825 |
| AB | 133.225 | 1 | 133.225 | 45.78 | 0.0005 |
| BB | 0.0133333 | 1 | 0.0133333 | 0.00 | 0.9482 |
| Error total | 17.459 | 6 | 2.90983 | | |
| Total (corr.) | 1837.12 | 11 | | | |
| R-cuadrada = 99.0497 % | | | | | |

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 98.2577 %

Error estándar del est. = 1.70582

Error absoluto medio = 0.966389

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 99.0497% de la variabilidad en entrega de combustible. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 98.2577%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar es 1.70582 y el error medio absoluto (MAE) de 0.966389 es el valor promedio de los residuos. En la Fig. 6 de superficie de respuesta estimada se presenta la relación de la entrega de combustible con las variables independientes de frecuencia y pulso de inyección, donde se puede observar que la cantidad de inyección de combustible incrementa de 6.6 ml a 46 ml como su valor máximo a medida que se aumenta el pulso de inyección y la frecuencia, siendo la más significativa a 20 Hz y 2 ms.

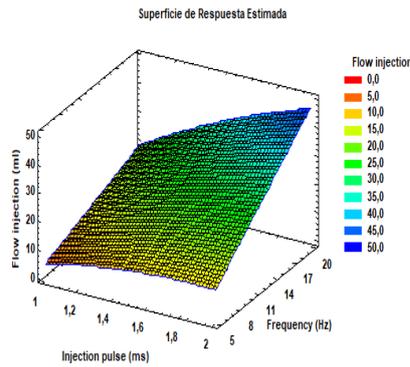


Figura 6: Superficie de respuesta estimada para entrega de combustible.

Se puede evidenciar que a 1ms de tiempo de inyección se obtiene un aumento del 65.2% cuando se cambia de 5Hz a 20 Hz, a 1.5ms existe un incremento del 80.5%, mientras que en 2ms se obtiene una variación del 75.6%, donde se observa que la mayor entrega de combustible se obtiene a 1.5ms cuando la frecuencia cambia de 5 a 20Hz. La Tabla 3 indica los coeficientes de regresión para la variable entrega de combustible con intervalos de confianza del 95.0%, a través de los cuales se obtiene el modelo ajustado relacionando el pulso de inyección y la frecuencia.

Tabla 3: Coeficientes de regresión para entrega de combustible.

| Coefficiente | Estimado |
|--------------------|-------------|
| Constante | -16.4583 |
| A: Pulso inyección | 24.7 |
| B: Frecuencia | -0.439333 |
| AA | -8.7 |
| AB | 1.46 |
| BB | -0.00133333 |

A continuación, se muestra la ecuación del modelo ajustado con los valores obtenidos:

$$\text{Entrega de combustible} = -16.4583 + 24.7 \times \text{Pulso inyección} - 0.439333 \times \text{Frecuencia} - 8.7 \times \text{Pulso inyección}^2 + 1.46 \times \text{Pulso inyección} \times \text{Frecuencia} - 0.00133333 \times \text{Frecuencia}^2 \tag{1}$$

3.2. Retorno de combustible

Para la cantidad de retorno de combustible como se indica en la Fig. 7 de Pareto, se puede observar que la frecuencia es la variable con mayor influencia en los resultados de las pruebas realizadas a comparación de los valores obtenidos al variar el pulso de inyección.

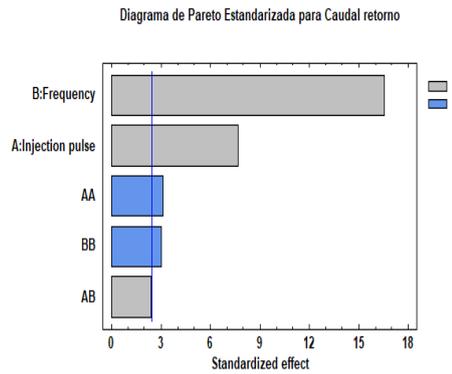


Figura 7: Diagrama de Pareto estandarizada para retorno de combustible.

El análisis de varianza indica que existen 4 valores que tienen un valor P menor al 0.05 indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0 %, luego de las pruebas de estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. Los resultados obtenidos en este análisis se indican en la Tabla 4.

Tabla 4: Análisis de varianza para retorno de combustible.

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|------------------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| A: Pulso inyección | 8.0 | 1 | 8.0 | 58.78 | 0.0003 |
| B: Frecuencia | 37.446 | 1 | 37.446 | 275.11 | 0.0000 |
| AA | 1.30667 | 1 | 1.30667 | 9.60 | 0.0212 |
| AB | 0.784 | 1 | 0.784 | 5.76 | 0.0533 |
| BB | 1.20333 | 1 | 1.20333 | 8.84 | 0.0248 |
| Error total | 0.81666 | 6 | 0.136111 | | |
| Total (corr.) | 49.5567 | 11 | | | |
| R-cuadrada = 98.3521 % | | | | | |

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 96.9788 %

Error estándar del est. = 0.368932

Error absoluto medio = 0.203333

A través del estadístico R-cuadrada ajustada, indica el 96.9788 % de la variabilidad en retorno de combustible al comparar modelos con diferente número de variables independientes. El error estándar en el promedio de los residuos muestra una desviación de 0.368932 y el error medio absoluto (MAE) de 0.203333. En el diagrama de superficie de respuesta estimada de la Fig. 8 se indica la relación del retorno de combustible con el pulso de inyección y la frecuencia. En esta se puede observar que existe una variación significativa al pasar de 1ms a 2ms en cada uno de los niveles de frecuencia, obteniendo un aumento del 50 % a 5Hz, 38.4 % a 10Hz, 34.7 % en 15 Hz y un incremento del 35.8 % a 20Hz, siendo a 5Hz en el nivel que mayor variación presenta en el retorno de los inyectores.

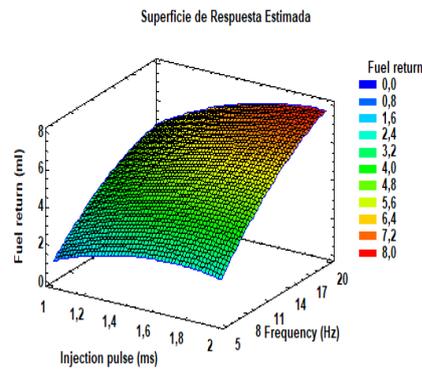


Figura 8: Superficie de respuesta estimada para retorno de combustible.

Además, se puede evidenciar que se obtiene un aumento en el retorno de combustible del 80 %, 67.5 % y 74.3 % con un tiempo del pulso de inyección de 1ms, 1.5ms, 2ms respectivamente, cuando la frecuencia varía de 5 a 20Hz, donde se puede observar que la menor variación en la cantidad de retorno se obtiene a 1.5 ms. En la Tabla 5 se presenta los coeficientes de regresión con intervalos del 95.0 % de confianza, a través de los cuales se obtiene el modelo ajustado relacionando el pulso de inyección y la frecuencia.

Tabla 5: Coeficientes de regresión para retorno de combustible.

| Coefficiente | Estimado |
|--------------------|------------|
| Constante | -7.68333 |
| A: Pulso inyección | 9.0 |
| B: Frecuencia | 0.464667 |
| AA | -2.8 |
| AB | 0.112 |
| BB | -0.0126667 |

A continuación, se muestra la ecuación del modelo ajustado con los valores obtenidos para la variable retorno de combustible:

$$\begin{aligned} \text{Retorno de combustible} = & -7.68333 + 9.0 \times \text{Pulso inyección} + 0.464667 \\ & \times \text{Frecuencia} - 2.8 \times \text{Pulso inyección}^2 \\ & + 0.112 \times \text{Pulso inyección} \times \text{Frecuencia} - 0.0126667 \times \text{Frecuencia}^2 \end{aligned} \quad (2)$$

3.3. Presión del riel

La Fig. 9 del diagrama de Pareo estandarizada para presión en el riel indica que las variables de frecuencia y tiempo del pulso de inyección tienen gran influencia en cada una de las combinaciones de las pruebas realizadas, pero a diferencia de la entrega y retorno de combustible, en este caso se obtiene una relación en sentido inverso, es decir, cuanto mayor sea la frecuencia y el pulso de inyección los valores de alta presión descenden.

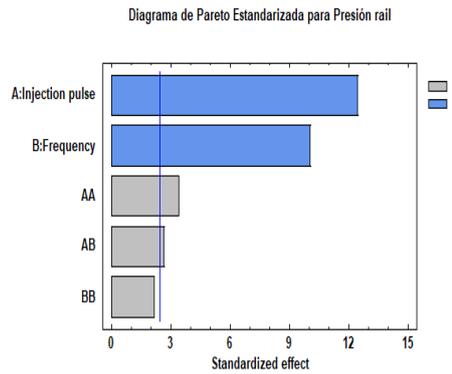


Figura 9: Diagrama de Pareto estandarizada para presión en el riel.

En la Tabla 6, se muestra los resultados del análisis de varianza donde el estadístico R-cuadrada ajustada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 96.1529%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar es 10.7755 y el error medio absoluto (MAE) de 6.02778 en el valor promedio de los residuos. Además, en este caso existen 4 efectos que tienen un valor P menor al 0.05 indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%.

Tabla 6: Análisis de varianza para presión en el riel.

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|------------------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| A: Pulso inyección | 18050.0 | 1 | 18050.0 | 155.45 | 0.0000 |
| B: Frecuencia | 11760.0 | 1 | 11760.0 | 101.28 | 0.0001 |
| AA | 1350.0 | 1 | 1350.0 | 11.63 | 0.0143 |
| AB | 810.0 | 1 | 810.0 | 6.98 | 0.0385 |
| BB | 533.333 | 1 | 533.333 | 4.59 | 0.0758 |
| Error total | 696.667 | 6 | 116.111 | | |
| Total (corr.) | 33200.0 | 11 | | | |
| R-cuadrada = 97.9016 % | | | | | |

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 96.1529 %

Error estándar del est. = 10.7755

Error absoluto medio = 6.02778

En la Fig. 10 se presenta la relación de la presión del riel con las variables independientes de frecuencia y pulso de inyección, donde se puede evidenciar que la máxima presión de 800 bares se obtiene a 1ms y 5 Hz de frecuencia, mientras que a 2ms y 20Hz la presión disminuye a 600 bares, siendo el valor más bajo en las pruebas realizadas. De los valores obtenidos se analiza que a 1ms de tiempo de inyección se obtiene una disminución del 15%, 11.4% a 1.5ms, mientras que en 2ms se obtiene la mínima variación reduciendo en un 9% la presión de combustible cuando la frecuencia cambia de 5 a 20Hz.

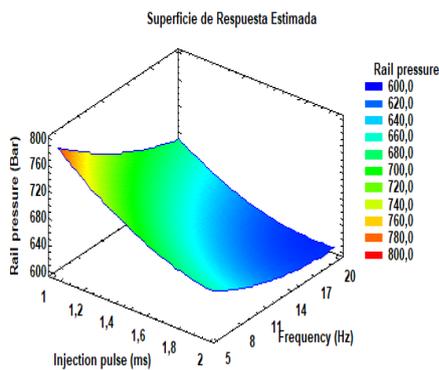


Figura 10: Superficie de respuesta estimada para presión en el riel.

Además, se puede observar que existe una variación significativa al pasar de 1ms a 2ms en cada uno de los niveles de frecuencia, obteniendo una reducción del 17.5 %, 11.1 %, 11.4 % y 11.7 % en los valores de 5Hz, 10Hz, 15Hz y 20 Hz, respectivamente, obteniendo la máxima reducción a 5Hz de frecuencia en el trabajo del inyector. En la Tabla 7 se indica los coeficientes de regresión para presión en el riel con intervalos de confianza del 95.0 %, a través de los cuales se obtiene el modelo ajustado relacionando el pulso de inyección y la frecuencia.

Tabla 7: Coeficientes de regresión para presión en el riel.

| Coefficiente | Estimado |
|--------------------|----------|
| Constante | 1170.83 |
| A: Pulso inyección | -410.0 |
| B: Frecuencia | -17.6667 |
| AA | 90.0 |
| AB | 3.6 |
| BB | 0.266667 |

A continuación, se muestra la ecuación del modelo ajustado con los valores obtenidos:

$$\begin{aligned}
 \text{Presión riel} = & 1170.83 - 410.0 \times \text{Pulso inyección} - 17.6667 \times \text{Frecuencia} + 90.0 \times \text{Pulso} \\
 & \text{inyección}^2 + 3.6 \times \text{Pulso inyección} \times \text{Frecuencia} \\
 & + 0.266667 \times \text{Frecuencia}^2
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

4. Conclusiones

La inyección de combustible tiene una influencia significativa en la entrega del mismo, y esta influencia está directamente relacionada con la frecuencia a la que trabaja el inyector. Según el estudio realizado, se observó que, al aumentar la frecuencia y el tiempo de inyección, se logró un aumento del 85 % en la cantidad de combustible entregado en tan solo 2 ms. Los análisis estadísticos de la varianza muestran que hay un 95 % de confianza en los resultados obtenidos. Además, se utilizó el R-cuadrado para comparar los modelos con diferentes números de variables independientes, y se obtuvo un valor de 98 %, lo que indica una alta precisión en las mediciones. En resumen, el estudio demostró que la frecuencia y tiempo de inyección son factores cruciales en la entrega de combustible, y los resultados obtenidos cuentan con un alto nivel de confianza y precisión. Durante el análisis del retorno de combustible, se destacó que la frecuencia juega un papel crucial en este aspecto. Se observó una variación significativa al aumentar el tiempo de inyección de 1 ms a 2 ms en cada nivel de frecuencia estudiado. Los resultados muestran que, a 5 Hz, se logró un incremento del 50 % en el retorno de combustible, mientras que, a 10 Hz, este aumento fue del 38.4 %. A 15 Hz, se registró un aumento del 34.7 %, y finalmente, a 20 Hz, el retorno de combustible se incrementó en un 35.8 %. De estos valores, se aprecia que la frecuencia de 5 Hz presenta la mayor variación en el retorno de los inyectores. Además, se identificó que el tiempo del pulso de inyección también afecta significativamente el retorno de combustible. Cuando la frecuencia varía de 5 a 20 Hz, se observó un aumento del 80 %, 67.5 % y 74.3 % en el retorno de combustible con tiempos

de pulso de inyección de 1 ms, 1.5 ms y 2 ms, respectivamente. Notablemente, el tiempo de pulso de inyección de 1.5 ms mostró la menor variación en la cantidad de retorno. En conclusión, tanto la frecuencia como el tiempo de pulso de inyección tienen un impacto significativo en el retorno de combustible, y los resultados demuestran claramente cómo estos factores influyen en el comportamiento de los inyectores en distintas situaciones. Durante el análisis de presión en el riel, se determinó que tanto la frecuencia como el tiempo de inyección ejercen una influencia significativa, pero en este caso, se observa una relación inversa con respecto a la entrega y retorno de combustible. En otras palabras, a medida que aumenta la frecuencia y el pulso de inyección, los valores de alta presión tienden a disminuir. Al analizar los valores obtenidos, se destaca que, con un tiempo de inyección de 1 ms, se obtuvo una disminución del 15% en la presión de combustible, mientras que con un tiempo de 1.5 ms, esta reducción fue del 11.4%. Por otro lado, al utilizar un tiempo de inyección de 2 ms, se registró la mínima variación, con una reducción del 9% en la presión de combustible al cambiar la frecuencia de 5 a 20 Hz. En resumen, el análisis revela que tanto la frecuencia como el tiempo de inyección tienen un impacto inverso en la presión en el riel, mostrando cómo estos factores influyen en el comportamiento del sistema de inyección de combustible en términos de la presión generada en el riel.

Agradecimientos. El presente trabajo forma parte de las actividades desarrolladas en el proyecto titulado “Implementación de una metodología de mantenimiento predictivo en motores de encendido por compresión basada en la industria 4.0”, financiado por la convocatoria Investiga 2022 de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad Técnica del Norte (UTN). Los autores expresan su agradecimiento a la UTN por permitir el acceso a las instalaciones del Laboratorio de Motores Diesel y permitir el uso de sus equipos. Además, los autores agradecen al personal de la universidad por su apoyo técnico esencial en la realización de los experimentos descritos en este artículo.

Referencias

- [1] M. M. Khan, A. Kumar Kadian, and R. P. Sharma, "Investigation of high fuel injection pressure variation on compression ignition engines powered by jatropha oil methyl ester-heptanol-diesel blends," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 65, pp. 675–688, 2023.
- [2] Q. Wang, F. Wei, P. Dong, G. Xiao, Z. Cui, J. Tian, X. Shi, and W. Long, "Visualization study on combustion characteristics of direct-injected hydrous methanol ignited by diesel in a constant volume combustion chamber," *Fuel*, vol. 335, p. 127063, 2023.
- [3] P. Ni, H. Xu, Z. Zhang, and X. Zhang, "Effect of injector nozzle parameters on fuel consumption and soot emission of two-cylinder diesel engine for vehicle," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 34, p. 101981, 2022.
- [4] P. Wai, P. Kanokkhanarat, B. S. Oh, V. Wongpattharaworakul, N. Depaiwa, W. Po-Ngaen, N. Chollacoop, C. Srisurangkul, H. Kosaka, M. Yamakita, C. Charoenphonphanich, and P. Karin, "Experimental investigation of the influence of ethanol and biodiesel on common rail direct injection diesel engine's combustion and emission characteristics," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 39, p. 102430, 2022.
- [5] L. Zhou, K. Yang, Z. Ping, T. Nie, X. Biao, and L. Huang, "Experimental study on the effect of post-injection parameters on performance of extra-high pressure common-rail diesel engine," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 152–160, 2022.
- [6] K. M. V. Ravi Teja, P. Issac Prasad, K. Vijaya Kumar Reddy, N. R. Banapurmath, M. E. M. Soudagar, T. M. Yunus Khan, and I. A. Badruddin, "Influence of combustion chamber shapes and nozzle geometry on performance, emission and combustion characteristics of crdi engine powered with biodiesel blends," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 17, 2021.
- [7] R. Sindhu, G. Amba Prasad Rao, and K. Madhu Murthy, "Effective reduction of nox emissions from diesel engine using split injections," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 57, no. 3, pp. 1379–1392, 2018.
- [8] G. Edara, Y. V. V. Satyanarayana Murthy, J. Nayar, M. Ramesh, and P. Srinivas, "Combustion analysis of modified light duty diesel engine under high pressure split injections with cooled egr," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 22, no. 3, 2019.
- [9] X. Xu, G. Li, and Z. Jiang, "Injection strategy optimization of a gasoline engine based on a multi-objective genetic algorithm," *Energies*, vol. 12, no. 12, p. 2354, 2019.
- [10] J. Zhang, X. Zhang, L. Yu, H. Wang, and X. Cui, "Multi-parameter optimization of fuel injection strategy for marine diesel engines based on an improved nsga-ii algorithm," *Energies*, vol. 12, no. 8, p. 1529, 2019.
- [11] L. Yu, Z. Zhou, Y. Cui, H. Wang, and X. Cui, "A fuzzy control method for optimizing the injection parameters of a common rail diesel engine," *Energies*, vol. 10, no. 9, p. 1429, 2017.
- [12] J. Liu, Z. Chen, Z. Zheng, and Y. He, "Optimization of fuel injection parameters based on a comprehensive engine model and improved genetic algorithm," *Energies*, vol. 13, no. 22, p. 5993, 2020.
- [13] C. Zhang, Y. Zhang, C. Chai, and M. Zhou, "Terminal sliding mode control of rail pressure for gasoline direct injection engines," *Control Theory and Technology*, vol. 17, no. 2, pp. 183–189, 2019. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9239250/>
- [14] Y. Jang, M. Kim, H. Kim, and K. Lee, "Injection pulse width control of common-rail direct injection diesel engines using a recursive least squares identifier," *Energies*, vol. 10, no. 1, p. 20, 2017.
- [15] Y. Zhang, X. Wang, J. Liu, and C. Li, "Effects of injection pulse width on combustion and emissions characteristics of diesel engines at different exhaust gas recirculation rates," *Energies*, vol. 13, no. 22, p. 6038, 2017. [Online]. Available: <https://www.hindawi.com/journals/jc/2017/9702625/>
- [16] J. Xu, Q. Lan, L. Fan, Y. Wu, Y. Wei, and Y. Gu, "Research on injection performance of the double-lift electronically controlled injector for marine diesel engine," *Fuel*, vol. 337, p. 126878, 2023.
- [17] C. Li, Z. He, W. Guan, G. Guo, T. Bai, and B. Hu, "Investigations of string cavitation and air back suction during injection duration in the scaled-up diesel fuel injection nozzle," *Fuel*, vol. 339, p. 126760, 2023.

- [18] R. Martínez-Carrillo, M. Ángel García, O. A. de La Garza, M. García-Yera, and R. Hernández-Altamirano, “Efectos de la estrategia de post inyección sobre el proceso de inyección empleando un inyector diésel tipo piezo-eléctrico,” 2021.
- [19] G. M. Erazo, “Infociencia. diagnóstico por imagen de control electrónico de inyección diésel riel común crdi,” *Infociencia*, pp. 63–69, 2016. [Online]. Available: <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/Infociencia/article/view/1001/pdf>
- [20] M. Barrera-Martínez, M. M. Ángel García, L. F. Rúa-Mujica, O. A. De La Garza, and S. Martínez-Martínez, “Influencia de las estrategias de inyección múltiple en la caracterización del chorro diésel empleando inyectores diésel tipo solenoide y piezoeléctrico,” n.d. [Online]. Available: http://somim.org.mx/memorias/memorias2020/articulos/A4_120.pdf
- [21] A. Hadadpour, S. Xu, K. M. Pang, X. S. Bai, and M. Jangi, “Effects of pre-injection on ignition, combustion and emissions of spray under engine-like conditions,” *Combustion and Flame*, vol. 241, p. 112082, 2022.