



# Comprobación de las variables de estado de diagnóstico para determinar el estado técnico o condición de inyección de una instalación motriz diésel

Luis García  
Sergio J. Fernández

Recibido: Enero del 2008  
Aprobado: Marzo del 2008

## Resumen / Abstract

Se presenta un análisis desde el punto de vista experimental de las variables de estado de diagnóstico (opacidad de los gases, temperatura de los gases de escape y consumo de combustible) para determinar el estado técnico o condición del aparato de inyección de una instalación motriz diésel.

Palabras clave: Instalación diésel, opacidad de los gases, aparato de inyección, temperatura de los gases, consumo de combustible

Presently article is carried out an analysis from the experimental point of view of the variables of diagnosis state (opacity of the gases, temperatura of the gases of the escape, consumption of fuel) for the determination of the technical state or condition the injection apparatus of a diesel motive installation.

Key words: Diesel motive installation, opacity of the gases, injection apparatus, temperature of the gases, consumption of fuel

## INTRODUCCIÓN

Una vez caracterizado el sistema de diagnóstico y mantenimiento actual, y diseñado el nuevo,<sup>1,2</sup> a partir de las variables de estado de diagnóstico se hace necesario una comprobación de las mismas por métodos experimentales, de forma tal, de corroborar su efectividad.

En este trabajo los autores presentan la comprobación experimental de las variables de estado de diagnóstico que caracterizan el estado técnico del equipo de inyección, para lo cual fue utilizado un laboratorio de ensayos de motores (estación experimental). Los resultados arrojaron que no se pueden tomar decisiones provenientes simplemente de los análisis

teóricos ya que pueden conducir a errores que significarían costos excesivos en el sistema de diagnóstico y apariciones de fallas imprevistas o de alarmas no justificadas.

## DESARROLLO

Para determinar el estado técnico del equipo de inyección, y posteriormente, los valores de los parámetros que lo caracterizan, se comprobó el comportamiento de las variables de estado de diagnóstico: Consumo de combustible ( $G_f$ ), la opacidad ( $K$ ) y la temperatura de los gases de escape ( $T_{ge}$ ); en función de la cantidad de inyectores fuera de regulación y la posición que estos ocupan en el bloque de cilindros. Para esto, se tomó como base un

motor B-2 reparado y con la certificación de que el comportamiento de sus parámetros, corresponde a los establecidos por el fabricante para un motor en buen estado técnico, además, la presión al finalizar el tiempo de compresión, se encontraba entre los límites establecidos, como se muestra en la tabla 1. La bomba de alta presión de combustible y los inyectores fueron regulados para realizar los experimentos.

#### Planificación de experimentos

Para el estudio de las variables independientes  $X_1$  y  $X_2$ , caracterizadas por la cantidad de inyectores fuera de regulación y la posición que estos ocupan en el bloque de cilindros, respectivamente, se creó un diseño factorial multinivel que consiste en 36 ejecuciones. El diseño se ejecutó en nueve bloques y el orden de los experimentos fue aleatorio totalmente, para protegerlo contra los efectos de las variables ocultas. El plan se muestra en la tabla 2.

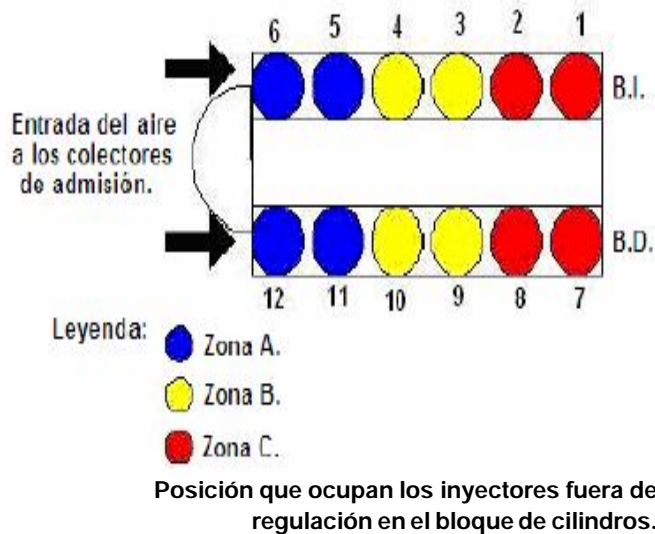
<b>Tabla 1</b> <b>Valor de la presión al finalizar el tiempo de compresión (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>												
Cilindros	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Pc	26	27	26	26	26	27	26	26	27	27	26	27

<b>Tabla 2</b> <b>Matriz del plan factorial multinivel</b>							
No.	Bloque	$X_1$	$X_2$	No.	Bloque	$X_1$	$X_2$
1	1	4	C	19	5	4	C
2	1	2	C	20	5	2	C
3	1	4	A	21	6	2	A
4	1	2	A	22	6	4	C
5	2	2	A	23	6	2	C
6	2	4	A	24	6	4	A
7	2	2	C	25	7	2	A
8	2	4	C	26	7	4	C
9	3	4	A	27	7	2	C
10	3	4	C	28	7	4	A
11	3	2	C	29	8	2	A
12	3	2	A	30	8	2	C
13	4	2	C	31	8	4	C
14	4	2	A	32	8	4	A
15	4	2	A	33	9	2	C
16	4	4	C	34	9	4	A
17	5	2	A	35	9	4	C
18	5	4	A	36	9	2	A

Para la selección de la cantidad de inyectores fuera de regulación a utilizar, se tomó el criterio expuesto en trabajos anteriores,<sup>3</sup> a partir de los cuales se seleccionó como límite superior cuatro inyectores regulados a una presión de 170 kgf/cm<sup>2</sup>, el cual representa el 33,3% del total de los inyectores del motor. Para el límite inferior, se utilizaron dos inyectores, lo que representa un 16,6% del total posible.

Para determinar la posición que ocupan los inyectores fuera de regulación en el bloque de cilindros se dividió el motor en tres partes como se muestra en la figura 1, utilizando para el experimento las zonas A y C, que son las zonas ubicadas en los extremos del motor, en las cuales fueron montados los inyectores según el plan diseñado.

La ejecución del plan de experimentos se realiza a partir de una base experimental que responde a las exigencias planteadas.



1

### Metodología general de la investigación

A partir de la base experimental disponible y del conocimiento a priori de los valores de las variables a controlar se estableció la metodología general de la investigación que responde al plan de experimentos descrito con anterioridad. Esta metodología comprende: La caracterización del motor analizado, para la obtención de la respuesta de las variables de estado de diagnóstico y la obtención de los valores límites de los parámetros que la caracterizan. Esto permite comprobar la relación existente entre los parámetros de diagnóstico y los estructurales, la valoración del comportamiento de las características de humeaje y el consumo de combustible en función de la cantidad de inyectores fuera de regulación y la posición que estos ocupan en el bloque de cilindros.

### Comportamiento de los parámetros de diagnóstico

Primeramente se determinó el comportamiento de los parámetros de diagnóstico a controlar durante las pruebas para una presión de inyección uniforme de los inyectores a 210 kgf/cm<sup>2</sup>, posteriormente se realizó una medición con el cambio de este valor de presión en los inyectores a 170 kgf/cm<sup>2</sup> uniforme, en todos los cilindros, para de esta forma, acotar el rango de variación de los parámetros de diagnóstico, al ser introducidas las alteraciones referidas con anterioridad. El valor de los parámetros obtenidos se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3**  
**Valor de los parámetros de diagnóstico**

Presión de los inyectores (kgf/cm <sup>2</sup> )	k (%)	G <sub>i</sub> (ml/s)	T <sub>ge</sub> (°C)
210	71,8	12,42	98,5
170	98,5	16,33	142,3

Del análisis de estos resultados se puede concluir que los valores de K se encuentran en el rango de 71,8- 98,5 % los de G<sub>i</sub> entre 12,42-16,33 ml/s y la T<sub>ge</sub> entre 98,5-142,3 °C.

Posteriormente se procede a montar los inyectores regulados a una presión de 170 kgf/cm<sup>2</sup> sobre una base de inyectores regulados a 210 kgf/cm<sup>2</sup>, según el plan de experimentos, cambiando además la posición que estos ocupan, obteniendo el comportamiento de cada una de las variables de salida en función de dichos aspectos. El comportamiento de las variables dependientes en correspondencia con el plan de experimentos desarrollado, se muestra de manera simplificada en la tabla 4.

**Tabla 4**  
**Comportamiento de las variables dependientes (fragmento)**

No.	Bloque	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	k (%)	G <sub>i</sub> (ml/s)	T <sub>ge</sub> (°C)
1	1	4	C	83,84	13,51	110,06
2	1	2	C	81,37	12,97	102,59
3	1	4	A	78,62	13,5	115,05
4	1	2	A	73,00	12,96	106,75
5	2	2	A	74,30	12,95	107,66

### Análisis del consumo específico de combustible ( $G_i$ ) (ml/s)

Sobre la base del plan descrito, se realizó el estudio de la influencia de las variables independientes sobre  $G_i$ .

En la tabla 5 se muestra cada uno de los efectos estimados (vectores de los coeficientes del modelo), así como el error normal de cada uno de ellos, que prueba el error de las mediciones.

Tabla 5 Efectos estimados del consumo de combustible $G_i$ (ml/s)				
No.	Factores	Efecto estimado	Error normal	Valor-P*
1	Constante	12,476	+/- 0,064 533 7	0,000 0
2	$X_1$	0,266 056	+/- 0,015 358 9	0,000 0
3	$X_2$	-0,020 117 2	+/- 0,030 670 4	0,516 4

\* Valor- P: Es el criterio de probabilidad asociado a prueba.

El Valor- P: El más alto de las variables independientes es 0,5164, perteneciente a la variable  $X_2$ . Puesto que es superior a 0,10, este término no es estadísticamente significativo para un nivel de confianza del 90 %, por tanto, se quita del modelo.

De lo anterior se infiere que la variable de estado  $G_i$ , solo depende de la cantidad de inyectores fuera de regulación y no de la posición que estos ocupan en el bloque de cilindros, por lo que puede ser utilizada como tal, ya que cumple la exigencia de objetividad.

La tabla 6 muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal para describir la relación entre  $G_i$  y la cantidad de inyectores fuera de regulación (variable independiente). La ecuación del modelo ajustado es:

$$G_i = 12,476 + 0,266\ 056 \cdot X_1$$

Dado que el valor-P es inferior a 0,01, se infiere que existe una relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99 %. El estadígrafo  $R_2$  indica que el modelo refleja el 90,095% de la variabilidad de  $G_i$  en función de la cantidad de inyectores fuera de regulación montados en el motor. El error normal de la estimación muestra la desviación normal de los residuos para el 0,091 868 8. El error absoluto medio de 0,035 067 5

es el valor medio de los residuos. Se realiza la prueba estadística de Durbin-Watson a los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el plan de experimentos. Como P es superior a 0,05, no hay indicio de autocorrelación serial en los residuos.

Una vez determinado que la variable de estado del consumo de combustible ( $G_i$ ), puede ser utilizada para determinar el estado técnico del equipo de inyección y la calidad del proceso de formación de la mezcla, se hace necesario determinar los valores límites de comportamiento del mismo en función de la presión de regulación de los inyectores ( $P_i$ ).

Límites de variación de  $G_i$  (ml/s) en función de  $P_i$

En la tabla 7, se muestran los resultados del análisis de regresión ajustados a un modelo recíproco Y, que describe la relación entre la variable dependiente ( $G_i$ ) y la presión de inyección ( $P_i$ ) variable independiente. La ecuación del modelo es:

$$Y = 1/(a + b \cdot x)$$

El modelo ajustado que describe la relación entre  $G_i$  y  $P_i$  es:

$$G_i = 1/(-0,020\ 415\ 9 + 0,000\ 480\ 319 \cdot P_i)$$

La tabla 7, muestra que el valor del nivel de significación del modelo (Valor- P) es menor que 0,01 lo que indica que existe una relación estadísticamente significativa entre  $G_i$  y  $P_i$  para un nivel de confianza del 99 %.

La tabla 8, muestra que el modelo ajustado indica un 99,939 3 % de la variabilidad de  $G_i$ , una relación fuerte entre las variables y una desviación normal de los residuos de 0,000 290 043.

El modelo no presenta falla de ajuste, como se muestra en la tabla 9.

La tabla 10 y la figura 2, muestran los valores pronosticados para  $G_i$  usando el modelo ajustado de acuerdo con la mejor predicción para nuevas observaciones con un intervalo de confianza de 95 %.

En la figura 3 se observa el modelo ajustado a los resultados que describen la relación entre  $G_i$  y  $P_i$ .

Los residuos se muestran en la figura 4, e indican que no existe violación seria de la condición de normalidad.

<b>Tabla 6</b> <b>Análisis de varianza del consumo de combustible <math>G_1</math> (ml/s)</b>						
No.	Factores	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Criterio F*	Valor -P
1	Modelo	2,533 36	2	1,266 68	150, 08	0,000 0
2	Residuo	0,278 516	33	0,008 443 987		
	Total	2,811 88	35			
	$R^2$			90, 095 %		
	$R^2$ (Ajustado GL)			89, 4947 %		
	Error normal de estimación			0,091 868 8		
	Error medio (absoluto)			0,035 067 5		
	Estadístico de Durbin-Watson			2,063 59 (P=0,458 2)		

\* Criterio F: Criterio de Fisher.

<b>Tabla 7</b> <b>Análisis de regresión</b>				
Parámetro	Estimado	Error	Estadígrafo T*	Valor -P
Intercepto	-0,020 415 9	0,001 131 11	-18,049 6	0,000 1
Pendiente	0,000 480 319	0,000 005 920 48	81,128 4	0,000 0

Estadígrafo T: Distribución t de Student.

<b>Tabla 8</b> <b>Análisis de varianza</b>						
No.	Factores	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Criterio F	Valor P
1	Modelo	0,000 553 669 4	1	0,000 553 694	6 581,81	0,000 0
2	Residuo	0,000 000 336 5	4	0,000 000 084124 9		
	Total	0,000 554 031	5			
	$R^2$			99,939 3 %		
	Coeficiente de correlación			0,999 696		
	Error normal de estimación			0,000 290 043		

**Tabla 9**  
**Análisis de varianza con falta de ajuste**

No.	Factores	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Criterio F	Valor P
1	Modelo	0,000 553 694	1	0,000 553 694	6581 81	0,0000
2	Residuo	0,000 000 336 5	4	0,000 000 084 124 9		
	Total	0,000 554 031	5			
	Falta de ajuste			0		
	Error puro			0,000 000 336 5		

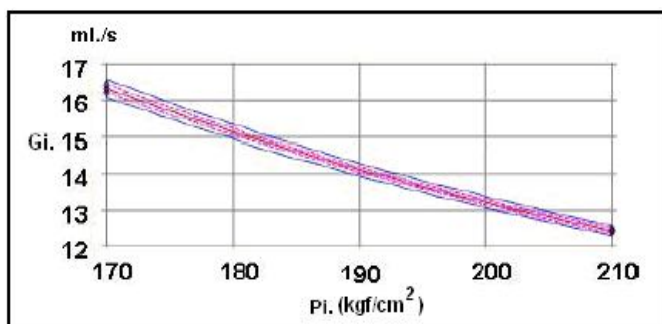
**Tabla 10**  
**Valores pronosticados**

Pronóstico		Límites pronosticados		Intervalo de confianza	
P <sub>i</sub> kgf/cm <sup>2</sup>	G <sub>i</sub> ml/s	Inferior ml/s	Superior ml/s	Inferior ml/s	Superior ml/s
170	16,327 9	16,085 4	16,581 4	16,206 6	16 454 6
210	12, 429 9	12, 287 9	12,575 3	12,356 5	12 502 2



Representación de los valores pronosticados para G<sub>i</sub>.

2



Modelo ajustado

3

Para la comprobación del resto de las variables de estado de diagnóstico que caracterizan la condición del aparato de inyección se procedió de forma similar a la descrita con anterioridad, por lo que se evitarán las repeticiones y solo se mostrarán los modelos obtenidos para cada caso.

$$K = 73,884\ 4 + 1,836\ 67 \cdot X_1 + 3,152\ 78 \cdot X_2$$

El modelo que describe el comportamiento de la opacidad de los gases en función de la cantidad de inyectores fuera de regulación y la posición que estos ocupan en el bloque de cilindros es:

$$T_{ge} = 97,584\ 4 + 3,723\ 61 \cdot X_1 - 2,400\ 8\ 3 \cdot X_2$$

De lo anterior se puede concluir que el aumento de la opacidad de los gases no solo depende de la cantidad de inyectores fuera de regulación montados en el motor, sino de la posición que estos ocupan en el bloque de cilindros. Por lo que no debe ser utilizada durante el diagnóstico de la instalación motriz, ya que no satisface la exigencia de objetividad.

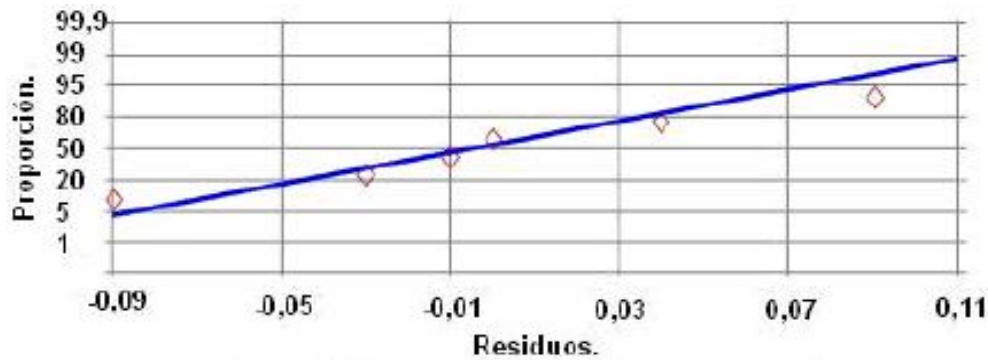
El modelo que describe el comportamiento de la temperatura de los gases en función de la cantidad de inyectores fuera de regulación y la posición que estos ocupan en el bloque de cilindros es:

$$T_{ge} = 97,584\ 4 + 3,723\ 61 \cdot X_1 - 2,400\ 83 \cdot X_2$$

Se puede concluir que el aumento de la temperatura de los gases de escape no solo depende de la cantidad de inyectores fuera de regulación montados en el motor, sino de la posición que estos ocupan en el

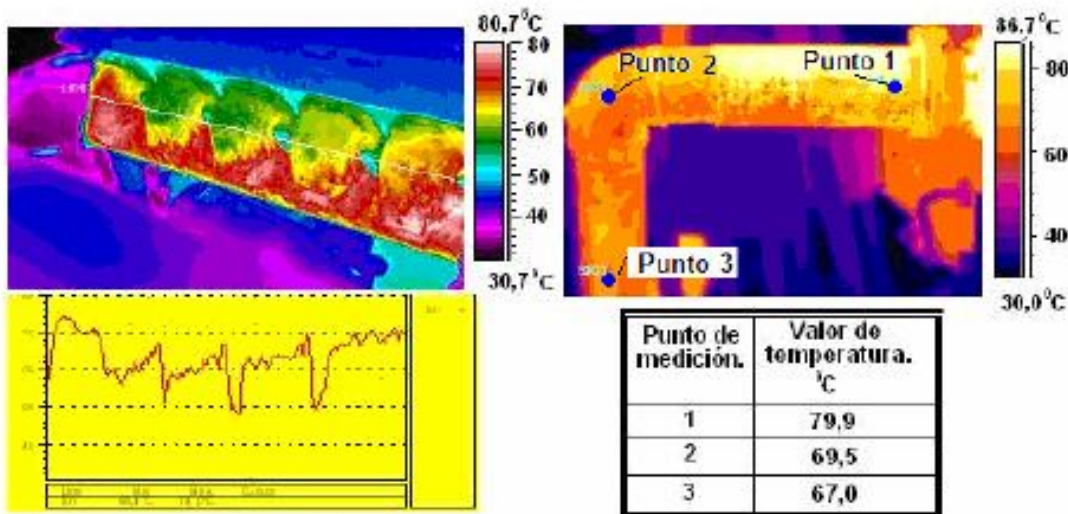
bloque de cilindros. Aspecto este relacionado con las pérdidas de calor que se producen en el colector de escape, durante el trayecto de los gases hasta el punto donde es medida su temperatura. El signo negativo en el coeficiente que representa la posición que

ocupan los inyectores fuera de regulación en el bloque de cilindros significa que la  $T_{ge}$  aumenta al pasar los inyectores del nivel superior al inferior, lo que se explica de lo anteriormente expuesto y se ilustra en la figura 5.



Representación gráfica de los residuos.

4



Variación de la temperatura de los gases de escape en el colector del motor producto de la transferencia de calor.

5

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha realizado la comprobación experimental de las variables de estado de diagnóstico que intervienen en el equipo de inyección, desarrollándose un experimento a partir de una estación experimental obteniéndose los siguientes resultados:

- Que no se pueden tomar simplemente las variables de estado de diagnóstico provenientes de los análisis

teóricos y de la experiencia, ya que pueden conducir a errores que significarían costos excesivos en el sistema de diagnóstico y apariciones de fallas imprevistas o de alarmas no justificadas.

- Se obtuvieron:

- Desde el punto de vista experimental, las relaciones que existen entre la cantidad de inyectores fuera de regulación y la posición que estos ocupan en el bloque de cilindros con el consumo de combustible ( $G_f$ ), la opacidad ( $K$ ) y la temperatura de los gases de escape ( $T_{ge}$ ).

- La relación que existe entre la presión de inyección ( $P_i$ ) y el consumo de combustible ( $G_i$ ).
- Los límites del parámetro  $G_i$  para el diagnóstico de la instalación motriz, en función de la presión de inyección de los inyectores.

#### REFERENCIAS

- 1. García Abreu, Luis y Sergio Fernández García:** "Caracterización del sistema actual de diagnóstico aplicado a los motores diésel de combustión interna y propuestas de modificación, Revista Ingeniería Energética, Vol. XXIX, No.2, Ciudad de La Habana, Cuba, 2008.
- 2. García Abreu, Luis y Sergio Fernández García:** "Diseño de un sistema de diagnóstico para la instalación motriz diésel de los carros de transporte en explotación", Revista Ingeniería Energética, Vol. XXIX, No.2, Ciudad de La Habana, Cuba, 2008.
- 3. Chacón Reyes, I.:** "Determinación del estado de capacidad de trabajo de instalaciones motrices

conservadas", Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en Ciencias Técnicas, Ciudad de La Habana, 2001.

#### AUTORES

##### **Luis García Abreu,**

Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias Técnicas, Instructor, Escuela Interarmas General Antonio Maceo, La Habana, Cuba  
e-mail:cid4@reduim.cu

##### **Sergio J. Fernández García,**

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Asistente, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior, Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de la Habana, Cuba  
e-mail:sjf@electrica.cujae.edu.cu  
sergiojfernandez@yahoo.com

## ***CENTRO DE OPERACIONES LUIS FELIPE ALMEIDA OBE CIUDAD DE LA HABANA***



**Nuestro Centro Territorial de Producción, siempre dispuesto a satisfacer las necesidades del cliente, le oferta un grupo de producciones y servicios, para lo que cuenta con una reconocida experiencia.**

#### **Contáctenos:**

Empresa Eléctrica Ciudad de La Habana  
Ave. Independencia km 6 ½, Boyeros  
Ciudad de La Habana, Cuba  
Teléfono: 45 1357  
Fax: 45 1679  
email: colfa@abech.cu