

**METODOLOGÍA PARA EL DIAGNÓSTICO DEL
SISTEMA DE INYECCIÓN DE MOTORES DIESEL A
PARTIR DE LAS LÍNEAS DE INYECCIÓN**

GIOVANNY TORRES ALVAREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2.005

**METODOLOGÍA PARA EL DIAGNÓSTICO DEL
SISTEMA DE INYECCIÓN DE MOTORES DIESEL A
PARTIR DE LAS LÍNEAS DE INYECCIÓN**

GIOVANNY TORRES ALVAREZ

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

Director

JORGE LUÍS CHACÓN VELASCO

Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2.005

DEDICATORIA

A Dios por su infinito amor.

A mis padres, Zacarías y Silvia,

por todo su amor, paciencia, ejemplo y apoyo incondicional.

A mi esposa, Sirleicita, por todo su amor

y por darme mi mayor tesoro...

mi hija, Silvia Carolina.

A mi suegra, Maria Olimpa por su cariño y confianza.

A mis hermanos, por el apoyo recibido.

A Sandra y su esposo por su apoyo en momentos difíciles.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Jorge Luís Chacón, Ingeniero Mecánico, docente de la escuela de Ingeniería Mecánica, director del grupo GIEMA, por su enseñanza, respaldo e invaluable colaboración.

Los miembros del grupo de investigación de la escuela de ingeniería Mecánica GIEMA, **Jorge García, Luís Niño, Romel Tabares, Jorge Higuera y Sthepanie Calderón** por su colaboración en las diferentes etapas del proyecto.

Orlando Santos, por permitir realizar pruebas en su taller especializado en inyección Diesel, “Calibraciones técnicas Ltda.” y su asesoría en la parte técnica.

La escuela de Ingeniería Mecánica, por su valioso aporte en mi formación personal y profesional.

Mis padres, esposa, hija, familiares y amigos por su apoyo incondicional.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE INYECCIÓN	4
1.1. ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA DE INYECCIÓN	4
1.1.1. Elementos del circuito de baja presión	5
1.1.2. Elementos del circuito de alta presión.	6
1.1.3. Elementos del circuito de retorno.	7
1.2. REQUISITOS QUE DEBE CUMPLIR EL EQUIPO DE INYECCIÓN	7
1.3. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INYECCIÓN	8
1.3.1. Clasificación según el tipo de cámara de combustión.	8
1.3.2. Clasificación según la configuración bomba-inyector	11
1.4. PROCESO DE INYECCIÓN	13
1.5. ELEMENTOS DEL CIRCUITO DE ALTA PRESIÓN	16
1.5.1. Bombas de inyección	17
1.5.2. Válvulas de entrega o de descarga	23
1.5.3. Tubería de inyección	25
1.5.4. Inyectores	27
2. FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA INYECCIÓN	36
2.1. PRESIÓN DE INYECCIÓN	36
2.1.1. Presión de Apertura	36
2.1.2. Caída de presión.	37
2.1.3. Presión Máxima	38

2.1.4.	Presión Residual	39
2.2.	VARIACIÓN DEL ANGULO DE AVANCE DE LA INYECCIÓN (AAI)	41
2.3.	DURACIÓN DE LA INYECCIÓN Y VELOCIDAD DE DESCARGA	43
2.4.	CALIDAD DEL COMBUSTIBLE	45
2.5.	VARIACIÓN DE ALGUNOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS	46
2.5.1.	Presión en la cámara de bombeo	46
2.5.2.	Longitud de la tubería	47
2.5.3.	Diámetro de la tubería	48
2.5.4.	Fuerza inicial en el inyector	49
2.5.5.	Volumen de la cámara de inyección	50
2.5.6.	Área de la cámara de presión del inyector	50
2.5.7.	Diámetro del orificio de la tobera	51
2.5.8.	Diámetro de la aguja	51
3.	METODOLOGÍAS PARA EL DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE INYECCIÓN EN NUESTRO MEDIO	52
3.1.	DIAGNÓSTICO PRELIMINAR	52
3.1.1.	Síntomas del motor dados por el cliente	53
3.1.2.	Interpretación de ruidos	53
3.1.3.	Análisis de humos	55
3.1.4.	La inspección visual	58
3.2.	DIAGNÓSTICO UTILIZANDO BANCOS DE ENSAYOS	58
3.2.1.	Diagnóstico de las líneas de inyección	65
3.2.2.	Diagnóstico del Inyector	65

4.	TÉCNICAS NO INVASIVAS PARA EL DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DIESEL	70
4.1.	ULTRASONIDO.	70
4.2.	VIBRACIONES MECÁNICAS.	70
4.3.	ANÁLISIS DE LA PRESIÓN EN LA TUBERÍA DE INYECCIÓN.	71
5.	DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA IMPLEMENTADA	72
5.1.	CADENA DE MEDICIÓN IMPLEMENTADA	73
5.2.	PANEL FRONTAL	75
6.	DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE	76
6.1.	SENSOR DE PRESIÓN	76
6.2.	TARJETA DE ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES PIEZOELÉCTRICOS.	77
6.3.	Cables del sensor piezoeléctrico	79
6.4.	SENSOR DE VELOCIDAD DE EFECTO HALL.	81
6.4.1.	Descripción y acondicionamiento del sensor Hall	81
6.4.2.	Características Técnicas del sensor	82
6.5.	FUENTE	82
6.6.	BLOQUE CONECTOR	83
6.7.	TARJETA DE ADQUISICIÓN	85
7.	SOFTWARE	86
7.1.	GENERALIDADES DE LABVIEW	86
7.2.	CÁLCULO DE PRESIÓN MÁXIMA	89

7.3.	CÁLCULO DEL AAI	95
7.4.	DESCRIPCIÓN Y USO DEL PANEL FRONTAL	96
8.	CALIBRACIÓN Y ENSAYOS EXPERIMENTALES	101
8.1.	CALIBRACIÓN DE LA TÉCNICA	101
8.2.	METODOLOGÍA PARA REALIZAR LAS PRUEBAS	104
8.3.	LÍMITES DE ALERTA.	108
8.4.	ENSAYOS DE LABORATORIO	109
8.5.	PRUEBAS EN CAMPO	114
8.5.1.	Pruebas en Campo de un Motor KIA BESTA 2200	114
8.5.2.	Pruebas en Campo de un Motor NPR 4HG1-T	116
8.5.3.	Pruebas en Campo de un Motor NKR 4BJ1-TC	119
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	122
	BIBLIOGRAFÍA	126
	ANEXOS	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Diagrama del sistema de Inyección con bomba tipo distribuidor	5
Figura 2.	Cámaras de combustión utilizadas en los motores diesel	10
Figura 3.	Disposición general de los sistemas de inyección más populares	11
Figura 4.	Esquema del equipo de inyección	14
Figura 5.	Sección de una bomba de inyección lineal con cremallera	18
Figura 6.	Barril y embolo de la bomba	19
Figura 7.	Funcionamiento de la bomba rotativa tipo DPA	21
Figura 8.	Funcionamiento de la bomba rotativa tipo VE	22
Figura 9.	Funcionamiento de la Entrega.	24
Figura 10.	Curvaturas en la tubería de inyección	27
Figura 11.	Vista en sección de un inyector de taladro múltiple	29
Figura 12.	Proceso de apertura del inyector.	31
Figura 13.	Tipos de toberas	32
Figura 14.	Algunos diseños de inyectores	34
Figura 15.	Las diversas presiones a lo largo de la inyección.	37
Figura 16.	Avance de la inyección variando velocidad y carga.	42
Figura 17.	Bandas de dispersión de emisiones de NOx y HC	43
Figura 18.	Duración de la inyección	44
Figura 19.	Velocidad de descarga	45
Figura 20.	Variación de algunos parámetros físicos	47
Figura 21.	Presión de inyección afectada por la longitud del tubo	48
Figura 22.	Vista esquemática de un inyector de múltiples orificios.	49
Figura 23.	Diagnóstico de fallas por medio de un estetoscopio.	54
Figura 24.	Color de los humos de escape	55

Figura 25.	Banco de Pruebas de bombas de Inyección Hartridge 800.	59
Figura 26.	Montaje de la bomba en el banco Hartridge 800	60
Figura 27.	Montaje de los elementos del banco en la bomba.	61
Figura 28.	Probetas graduadas para la medición de combustible	64
Figura 29.	Procedimiento para detectar el inyector defectuoso	66
Figura 30.	Probador de inyectores	66
Figura 31.	Sensores de presión de medida indirecta tipo abrazadera.	72
Figura 32.	Cadena de Medición (Presión y PMS).	73
Figura 33.	Panel frontal de la técnica implementada.	75
Figura 34.	Sensor Piezoeléctrico KG60	76
Figura 35.	Circuito de acondicionamiento sensores piezoeléctricos KG60	78
Figura 36.	Apantallamiento de la fuente	79
Figura 37.	Cables del sensor de presión	80
Figura 38.	Comparación de cables Fabricados vs. Original	80
Figura 39.	Acondicionamiento de sensor de efecto Hall GS1001	82
Figura 40.	Fuente Diagma D-100	83
Figura 41.	Bloque conector y tarjeta de adquisición.	84
Figura 42.	Paletas de controles e indicadores en el panel frontal	87
Figura 43.	Bloques funcionales de la ventana de programación	88
Figura 44.	Digitalización de una señal senoidal	88
Figura 45.	Reconocimiento de pulsos de presión	90
Figura 46.	Proceso de Filtrado por puntos	91
Figura 47.	SubVI para detectar inicio y amplitud del pulso de presión	91
Figura 48.	Varianza de la señal de presión	92
Figura 49.	Reconocimiento de pulsos con varianza y detector de pulsos	93
Figura 50.	Doble varianza de la señal de presión	94

Figura 51. Determinación del AAI	95
Figura 52. Descripción del Panel frontal desarrollado	97
Figura 53. Botón RUN	97
Figura 54. Menú del control configuración.	98
Figura 55. Calibración en el probador de Inyectores	102
Figura 56. Calibración de la señal de presión en el banco Hartridge 800	102
Figura 57. Curva calibrada a 2800psi	104
Figura 58. Instalación de los sensores	105
Figura 59. Tarjeta de Acondicionamiento de la señal de presión	106
Figura 60. Conexión requerida para sensor de presión 1 y 2.	106
Figura 61. Homologación de canales físicos y virtuales	107
Figura 62. Motor KIA BESTA 2200 ubicado en el LMTA	109
Figura 63. Prueba motor KIA BESTA 2200.	111
Figura 64. Falla Inducida. Soltura línea de inyección lado inyector	111
Figura 65. Presión de inyección en el cilindro 1.	112
Figura 66. Presión de inyección en el cilindro 2.	113
Figura 67. Presión de inyección en el cilindro 3	113
Figura 68. Presión de inyección en el cilindro 4.	114
Figura 69. Motor KIA BESTA 2200 monitoreado en campo	115
Figura 70. Reporte Prueba en campo Motor KIA BESTA 2200	115
Figura 71. Presión Máxima en cada cilindro Motor KIA (laboratorio)	116
Figura 72. Presión de Inyección en el cilindro 1 de un NPR nuevo.	118
Figura 73. Pruebas en campo. Motores NPR en buses de Servicio Público.	119
Figura 74. Pruebas en campo. Motor NKR 4BJ1-TC	119
Figura 75. Prueba cilindro 4. NKR	120
Figura 76. Presión de inyección en los cilindros del motor NKR	121

Figura 77. Señal de aceleración Motor NKR

121

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos Técnicos de los Sensores de presión a utilizar	77
Tabla 2. Especificación de los canales a utilizar en el bloque conector.	84
Tabla 3. Resultados obtenidos en el proceso de calibración	103
Tabla 4. Características sistema de inyección motor KIA BESTA 2200	110
Tabla 5. Características sistema de inyección motor NPR 4HG1-T	117
Tabla 6. Características sistema de inyección motor NKR 4BJ1-TC	120

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. ANALISIS ECONOMICO	127
ANEXO B.. FICHA TECNICA DEL SENSOR HALL UTILIZADO	138
ANEXO C. DIAGRAMA DE FLUJO <i>SubVI DETECTOR DE PULSOS.</i>	140

RESÚMEN

TÍTULO:

METODOLOGÍA PARA EL DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE MOTORES DIESEL A PARTIR DE LAS LÍNEAS DE INYECCIÓN *

AUTOR:

Giovanny Torres Alvarez.**

PALABRAS CLAVES:

Diesel, Motor Diesel, Sistema de Inyección, Inyector, Bomba de inyección, Presión de Inyección, Avance de la Inyección.

DESCRIPCIÓN:

El objetivo de este proyecto es desarrollar una metodología de tipo no invasivo para el diagnóstico del Sistema de Inyección en Motores Diesel como aporte al proyecto de investigación DIAGMA D-100 Fase I dirigido por el grupo GIEMA de la escuela de ingeniería Mecánica. Esta metodología permite realizar un diagnóstico parcial sobre el estado de los inyectores y la bomba de inyección sin necesidad de desmontar ninguno de estos componentes del motor, ahorrando tiempo y dinero.

Para la cadena de medición se utilizaron sensores piezoeléctricos tipo pinza (K60 de AVL) los cuales miden la deformación de la tubería de inyección proporcional a la onda de presión producida durante el proceso de inyección. Un sensor de velocidad de efecto hall (GS 10001 Cherry) ubicado estratégicamente en la polea del cigüeñal permite determinar el punto muerto superior del cilindro N° 1 que sirve como referencia para el cálculo del ángulo de avance de la inyección (AAI). Como las señales de los sensores son muy débiles se diseñaron los circuitos de acondicionamiento con etapas de amplificación y filtrado. La interfaz hombre-máquina se desarrolló en Labview 7.0 por su versatilidad y facilidad para la adquisición y tratamiento de señales de este tipo.

El resultado es una metodología con la capacidad de evaluar en estado de ralentí la presión máxima de inyección y el AAI de cualquier motor con bombas de inyección lineal o rotativa. Los anteriores parámetros se evaluaron en tres motores diferentes (KIA BESTA 2000, NPR 4B1J-TC y NKR 4HG1-T). Esta metodología se proyecta a corto plazo como una herramienta muy útil para el mantenimiento predictivo en el sector del transporte público.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Jorge Chacón.

SUMMARY

TITLE:

METHODOLOGY FOR THE DIAGNOSIS OF DIESEL INJECTION SYSTEM BASED FROM INJECTION LINES *

AUTHOR:

Giovanny Torres Alvarez **

KEY WORDS:

Diesel, Diesel Engines, Injection System, Inyector, Injection Pump, Injection Pressure, Injection Advance.

DESCRIPTION:

The objective of this project is to develop fellow's methodology no invasivo for the diagnosis of Injection system in Diesel engine like contribution to the fact-finding project DIAGMA D 100 Phase I guided for the group GIEMA of the school of mechanical engineering. This methodology permits realizing one diagnose partial envelope the status of the injectors and the injection pump without need of dismounting no one of the motor's these components, saving time and money.

For the chain of measurement the piezoelectric sensors utilized type clamp (K60 of AVL) which measure the deformation of the piping of proportional injection to the wave of pressure produced in the process of injection. A sensor of velocity of effect hall (GS 10001 Cherry) located strategically in the crankshaft's pulley that suits its purposes like reference permits determining the top dead center of the cylinder N° 1 for the calculation of angle of advance of the injection (AAI). As the signals of the sensors are very weak they designed the circuits of conditioning with stages of amplification and filter. The man-machine interface, was develop in Labview 7,0 for his versatility and facility for the acquisition and suchlike signal processing.

The result is a methodology with the capability to evaluate in minimal velocity the maximum pressure of injection and the AAI of any motor with linear injection pumps or rotary press. They evaluated previous parameters in three different motors (KIA BESTA 2000, NPR 4B1J TC and NKR 4HG1 T). This methodology projects in the short run like a very useful tool for the predictive maintenance at the public transportation's sector itself.

* Degree Work.

** Physical-Mechanical Sciences Faculty, Mechanical Engineering, Eng. Jorge Chacón.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años la contaminación ambiental en el área metropolitana de la ciudad de Bucaramanga se ha incrementado; debido al aumento en las emisiones de gases provenientes de los automotores de servicio urbano equipados con motores Diesel. El incremento de las emisiones y en el consumo no justificado de combustible se debe a fallas en el proceso de combustión originadas por deficiencias en el sistema de inyección ya sea por falta de mantenimiento o por pérdida gradual de la calibración de sus componentes (bomba e inyector).

Mantener el sistema de inyección en buenas condiciones es vital para el buen funcionamiento del motor, ya que el estado de este sistema afecta todos los aspectos de operación del motor como los índices de potencia, disponibilidad, costos de mantenimiento, emisiones de gases contaminantes y el consumo de combustible, este último, toma cada día más importancia debido al desmonte de los subsidios en los combustibles por parte del gobierno nacional.

El mantenimiento que se le da al sistema de inyección en nuestro medio es de tipo correctivo, ya que no existen herramientas para hacer un diagnóstico predictivo a costo razonable. El diagnóstico, reparación y calibración se efectúa en un taller especializado de inyección Diesel. Los altos costos y el tiempo muerto que significa para el propietario someter su vehículo a una revisión del sistema de inyección impiden la ejecución de un control periódico del estado de la bomba, tuberías de inyección, inyectores etc. Es así como casi siempre la frecuencia de diagnóstico de las bombas e inyectores están sujetas a la pérdida de potencia del motor.

Lo paradójico es que el principal problema al que se enfrentan las autoridades para la reducción de emisiones tóxicas al ambiente no es de tipo tecnológico sino cultural, muchos usuarios no respetan las recomendaciones de los fabricantes en cuanto a la cantidad de combustible inyectado por ciclo y el avance de la inyección. Lo anterior se debe a la creencia errada que un motor es “más eficiente” si este consume más combustible, es decir, el motor tiene más potencia, lo cual es parcialmente verdad; pero a cambio del incremento de emisiones, pérdida de combustible injustificada y mayor desgaste del motor.

En este trabajo se muestra el desarrollo de una nueva metodología no invasiva, para la detección temprana de algunas fallas en el sistema de inyección Diesel. Esta técnica permitirá reducir los costos de mantenimiento, paradas en servicio y emisiones indeseables. Los parámetros evaluados con esta técnica son: Presión Máxima de Inyección (PMI), Presión Residual (PR), ángulo de avance de la inyección (AAI) y RPM del motor. Los anteriores parámetros se evalúan en estado de ralentí. Por ser de carácter no invasivo, esta metodología no requiere desmontar la bomba o los inyectores, disminuyendo el tiempo de diagnóstico frente a los métodos convencionales explicados en el capítulo 3.

Este trabajo es la primera fase de la técnica para el diagnóstico del sistema de inyección en motores Diesel, la cual hace parte del proyecto de investigación interdisciplinario “Diseño y desarrollo de un prototipo para el monitoreo y diagnóstico del estado de motores Diesel a partir de técnicas no invasivas Fase I, con la participación de COLCIENCIAS, las Escuelas de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Telecomunicaciones y el Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales (CEIAM) adscrito a la Escuela de Ingeniería Química.

El texto esta organizado de tal forma, que el lector tome conciencia de la complejidad e importancia del sistema de inyección en el desempeño del motor como se muestra en el capítulo 1.

El capítulo 2 muestra una recopilación los principales factores que intervienen y afectan el proceso de inyección. En este capítulo el lector encontrará graficas que demuestran lo susceptible que es el proceso de inyección ante cualquier variación en la geometría, instalación o calibración de los componentes del sistema. En el capítulo 3 se describen las metodologías empleadas en nuestro medio para el diagnostico del sistema de inyección. En el capítulo 4 se describen algunas técnicas modernas de las cuales no se encuentra suficiente información. En el capítulo 5 se describe la cadena de medición y el procedimiento paso a paso de la metodología implementada. En el capítulo 6 se desglosan los componentes del hardware que interviene en la cadena de medición tales como sensores, tarjetas de acondicionamiento, de adquisición etc. En el capítulo 7 se detalla el funcionamiento del software desarrollado en Labiew 7. Finalmente el capítulo 8 muestra las pruebas realizadas en el laboratorio y en campo, así como los resultados obtenidos.

Se incluye como anexo a este documento, el análisis de costos de la implementación de esta metodología en nuestro medio.

1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE INYECCIÓN

El sistema de inyección es el corazón del motor, tiene como misión realizar el suministro de combustible en la cantidad, presión, forma y tiempo correcto dentro de la cámara de combustión para asegurar un desempeño óptimo.

El sistema de inyección es tan complejo y tan vital en el funcionamiento del motor que desde la década de los 60, se viene trabajando en el desarrollo de modelos matemáticos [1, 10, 11, 12, 21] validados con pruebas experimentales para predecir el funcionamiento y el desempeño del motor como herramienta fundamental en el diseño y mejoramiento de los componentes del sistema de inyección principalmente las bombas de inyección (1.5.1) y los inyectores (1.5.4).

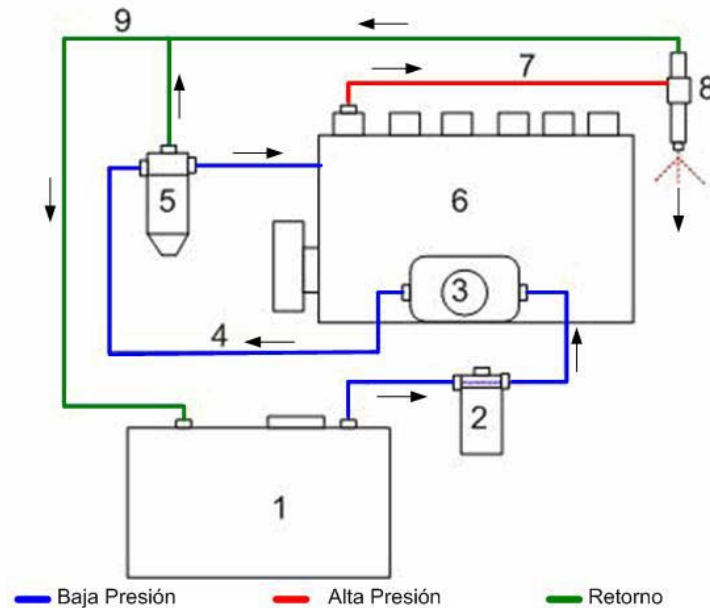
1.1. ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA DE INYECCIÓN

El sistema de inyección (Figura 1) consta de tres circuitos: baja presión, alta presión y retorno. El circuito de baja presión está conformado por: tanque (1), sedimentador (2), Filtros (5) y Bomba de alimentación (3). El circuito de alta presión está conformado por: Bomba de inyección (7), tubería de inyección (8) e inyectores (9), y el circuito de retorno formado por la tubería de retorno (10).

El combustible es almacenado en el tanque y cuando el sistema se pone en funcionamiento el combustible pasa por los filtros hacia la bomba de alimentación que a su vez se encarga de enviar el combustible a través del sedimentador o directamente a la bomba de inyección en algunos casos. La bomba de inyección se encarga de presurizar el combustible para entregarlo a los inyectores mediante la

tubería de inyección. El combustible que no es inyectado en la cámara de combustión retorna al tanque por medio de la tubería de retorno.

Figura 1. Diagrama del sistema de Inyección con bomba tipo distribuidor



1.1.1. Elementos del circuito de baja presión

A continuación se dará una breve explicación de los principales elementos encontrados en la mayoría de los sistemas de inyección convencionales.

- **Tanque de Combustible (1):** Su función es la de almacenar y enfriar el combustible. Debe estar hecho de un material no corrosivo y está dotado de una boca de llenado con un tamiz que impide la entrada de grandes impurezas junto con el combustible. Contiene además el tubo de aspiración del combustible que está provisto a su vez de un prefiltro y otro de retorno, de un pequeño pozo de decantación y un tapón con un orificio de ventilación u otro dispositivo que pueda contener también un tapón de vaciado.

- **Sedimentadores o trampas de agua (2):** Son elementos que eliminan parte del agua contenida en el combustible y que estropearían rápidamente los delicados y precisos elementos de inyección además de alterar la combustión en caso de llegar a ser inyectada.
- **Filtros (3):** Debido a las holguras y tolerancias tan pequeñas que hay en la bomba de inyección y en los inyectores, el combustible para los motores Diesel debe estar limpio, para ello el sistema de combustible tiene una serie de filtros que remueven las pequeñas partículas que contaminan el combustible, a veces, empiezan con una tela metálica en el llenador del tanque y, el ultimo, es otro filtro pequeño de malla en el inyector. Existen varias clases de filtros, los más utilizados son: Papel plegado, Algodón y fieltro, filtros de borde y metal sinterizado. En nuestro medio, la mayoría de los vehículos de transporte urbano solo presentan un solo filtro y un sedimentador.
- **Bomba de Alimentación (5):** También se le conoce como bomba de suministro. Su función es transferir el combustible del tanque a través de los filtros hasta la bomba de inyección. Básicamente se utilizan tres tipos de bombas de alimentación: de membrana, de engranajes y de paletas. En algunos motores diesel, esta bomba se encuentra incorporada dentro de la bomba de inyección.

1.1.2. Elementos del circuito de alta presión.

Como ya se menciona antes a este circuito pertenecen la bomba (6), tubería de inyección (7) y los inyectores (8).

En la sección 1.5 se trata con mayor profundidad cada uno de estos componentes.

- **Bomba de Inyección (6):** Es el elemento encargado de presurizar el combustible a un nivel tal que permita abrir el inyector y producir una pulverización adecuada en la cámara de combustión.

- **Tubería de inyección o alta presión (7):** Es el elemento encargado de conducir el combustible a alta presión desde la bomba de inyección hasta los inyectores.
- **Inyectores (8):** son válvulas cuya misión es la de realizar la pulverización de la pequeña cantidad de combustible y de dirigir el chorro de tal modo que el combustible sea esparcido homogéneamente por toda la cámara de combustión.

1.1.3. Elementos del circuito de retorno.

- **Tubería de retorno (9):** Una parte del combustible es devuelto por el inyector para lubricar y refrigerar sus partes móviles, esta tubería se encarga de retornar este combustible a tanque.

1.2. REQUISITOS QUE DEBE CUMPLIR EL EQUIPO DE INYECCIÓN¹

El equipo de inyección debe asegurar un efectivo desarrollo del proceso de trabajo en el cilindro y la obtención de las curvas características que respondan a las condiciones de funcionamiento del motor Diesel en el vehículo.

El equipo de inyección debe cumplir los siguientes requerimientos:

- Dosificar la cantidad de combustible en correspondencia con los regímenes de carga y velocidad.
- Pulverizar con la calidad requerida y distribuir el combustible en la cámara de combustión. Obtener las características y fases de inyección óptimas en todos los regímenes de velocidad y de carga.

¹ Tomado de M. S. Jójaj, Motores de automóvil [9], pp. 315

- Proporcionar un suministro idéntico de combustible en todos los ciclos y cilindros del motor.
- Asegurar un funcionamiento prolongado sin variar los ajustes iniciales y sin notables desgastes.
- Corresponder a los requerimientos generales de diseño y operacionales planteados ante los accesorios y mecanismos del motor (reducidos pesos y dimensiones, bajos costos de fabricación, así como comodidad en el mantenimiento, reglaje y reparación).

1.3. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INYECCIÓN

Existen varias clasificaciones de los sistemas de inyección, las dos clasificaciones más importantes son según la forma de la cámara de combustión y la disposición bomba-inyector.

1.3.1. Clasificación según el tipo de cámara de combustión.

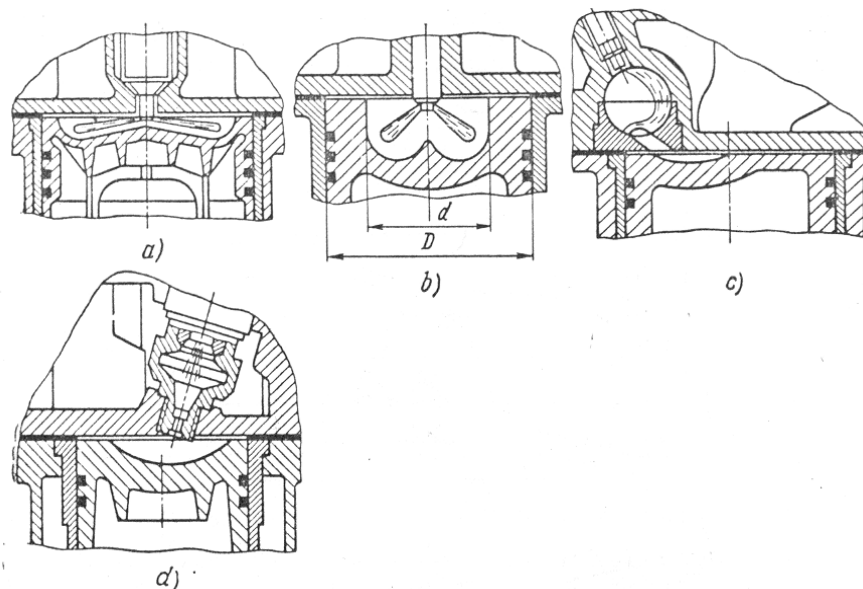
El tipo de cámara de combustión ejerce una fuerte influencia en el sistema de inyección empleado y los parámetros de operación (presión de apertura, entrega etc.) por esto, a continuación se describen brevemente algunas características de las principales cámaras empleadas.

Existen dos tipos de cámaras, de *inyección directa*, empleada en motores de bajas revoluciones y cámaras de *inyección indirecta*, utilizadas en motores de mediana y alta velocidad y poco robustos. Asmas [2], describe las ventajas y desventajas de las diferentes tipos de cámaras.

- **Inyección directa**, en la figura 2a, se muestra la cámara tipo cavidad única en la cual la combustión se realiza en la cabeza del pistón². Los motores de inyección directa por lo general presentan un menor consumo de combustible, su funcionamiento es más brusco y son más contaminantes debido a que no todo el combustible inyectado es quemado de manera eficiente por que la velocidad de movimiento del aire al final de la compresión es la mínima en comparación con otros tipos de cámaras. Estas cámaras utilizan toberas con gran número de agujeros (hasta siete) de pequeño diámetro (0,12-0,15 mm), y creando además una elevada presión de inyección (de hasta 100 Mpa y más). En la figura 2b se representa una cámara de inyección directa en la cual el mayor espacio disponible (80 %) para la combustión se encuentra en el pistón. La relación d/D en estas cámaras se elige de tal manera que sobre el expulsor quedé la mínima cantidad de aire y que cuando el pistón se acerque al P.M.S. el aire pasa rápidamente a la cámara de combustión principal. El movimiento, preponderantemente tangencial, del aire que se acelera en el proceso de compresión, permite emplear inyectores con menor número de agujeros en la tobera (3 - 4). Este tipo de cámaras son las más utilizadas en nuestro medio.

² El pistón posee una protección contra las altas temperaturas; y es hecho en aleaciones ligeras (aluminio, otras) para amortiguar un poco los golpes generados sobre las bielas o el cigüeñal

Figura 2. Cámaras de combustión utilizadas en los motores diesel



Fuente: M. S. Jóvaj, Motores de automóvil, [9]

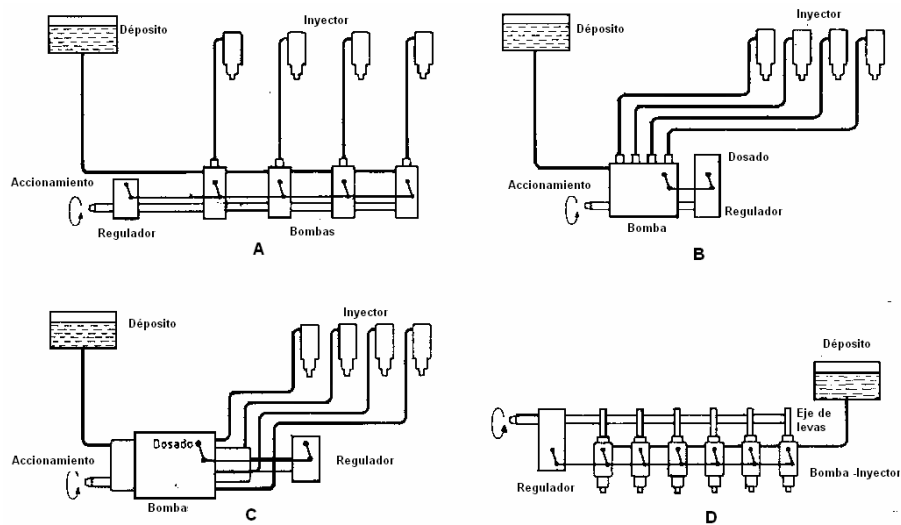
- **Inyección Indirecta:** Los dos tipos de cámaras de inyección indirecta más empleadas son la de tipo torbellino y con precámara. En las cámaras tipo torbellino (Figura 2c) el movimiento dirigido del aire se engendra en el proceso de compresión. La existencia de una garganta relativamente estrecha condiciona el paso de la carga fresca a gran velocidad hacia la cámara auxiliar, así como el paso inverso de la mezcla ardiente aire combustible a la cámara de combustión, situada en el espacio dispuesto para la combustión. En estas cámaras se emplea toberas con agujeros de 1 a 2 mm, disminuyendo la presión de inyección hasta en 12,5 - 25 Mpa. En las de precámara o antecámaras (Figura 2d) la energía cinética que se forma durante el paso del aire en el proceso de compresión, se utiliza para mezclar intensamente el aire con el combustible. Los orificios de comunicación de sección relativamente pequeña contribuyen a que la salida de la antorcha o frente de llama de la combustión desde la antecámara sea a gran velocidad. Algunos de los motores de precámara poseen bujías de incandescencia (muy útiles para el arranque en

frío del motor). La forma de las precámaras varía según el diseño buscando una mejor combustión del combustible y así mayor rendimiento del motor. En la actualidad este tipo de cámaras ya casi no se emplean debido a que el consumo de combustible es mayor; sin embargo, con este tipo de cámara el funcionamiento del motor es más silencioso.

1.3.2. Clasificación según la configuración bomba-inyector

Cada constructor resuelve el problema de cumplir los requerimientos del sistema de inyección de acuerdo a sus necesidades. En la figura 3 se presentan las principales configuraciones. A, bombas individuales por cada cilindro, B, bombas en línea, C, bombas distribuidoras, D, bomba-inyector.

Figura 3. Disposición general de los sistemas de inyección más populares



Fuente: Miralles de Imperial J, Inyección y combustión en motores diesel [17]

- **Bombas individuales por cada cilindro (A):** Cada inyector es alimentado por su propia bomba de inyección. Se utilizan principalmente en motores grandes y lentos (Marinos).

- **Bomba en línea (B):** Se utiliza una sola bomba, la cual posee en embolo por cada inyección para levantar la presión del combustible. Se emplea en motores de mediana potencia (camiones, buses grandes).
- **Bombas distribuidoras (C):** También llamadas rotativas, posee solo una cámara de alta presión (cabezal hidráulico) la cual distribuye el combustible a cada inyector. Se emplean en motores de pequeña cilindrada como microbuses y busetas.
- **Bomba-Inyector (D):** Se emplea en los motores Detroit Diesel, combina las funciones del elemento de la bomba de inyección y el inyector dentro de este. El inyector se acciona desde el árbol de levas por medio de una varilla de empuje y un balancín.

En los vehículos de transporte urbano (motores rápidos) se utilizan sistemas que incorporan bombas de inyección rotativas y en línea, las primeras se utilizan en vehículos pequeños como microbuses.

La metodología desarrollada se aplica solo para los sistemas con bomba de inyección lineal y rotativa, por tener líneas de alta presión para la instalación del sensor de presión. Por lo tanto, solo se enfatizará en las configuraciones con estas bombas.

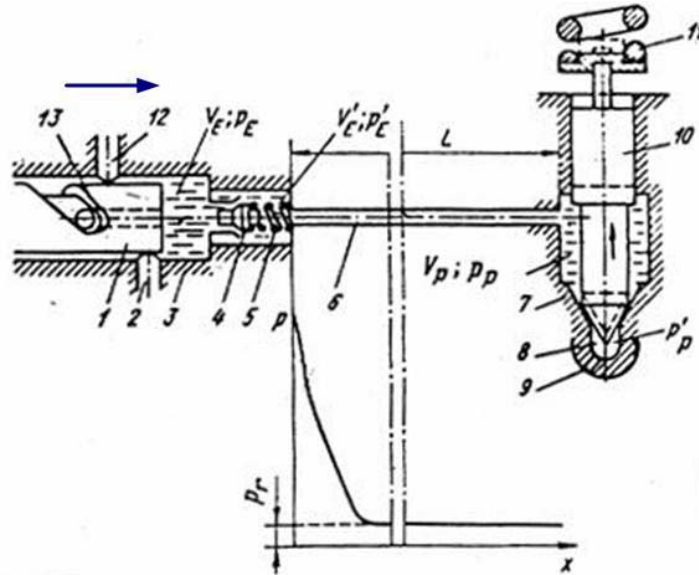
1.4. PROCESO DE INYECCIÓN³

Examinaremos el proceso de inyección de combustible en un sistema con bomba de inyección en línea, utilizando el esquema de la figura 4.

El émbolo buzo **1**, desplazándose en el casquillo **3**, en la dirección que indica la flecha, expulsa el combustible desde el volumen V_E en el casquillo, a través de la lumbrera de admisión **2**, al colector de suministro. A medida que se cierra la lumbrera de admisión, en el volumen V_E simultáneamente comienza a incrementarse la presión P_E . Cuando esta presión supere las fuerzas creadas por la tensión previa del resorte **5** de la válvula y por la presión residual P_r en la línea de inyección la válvula de inyección **4** empieza a desplazarse.

³ Tomado de M. S. Jóvaj, Motores de automóvil [9], pp . 316-319

Figura 4. Esquema del equipo de inyección



Fuente: M. S. Jójvaj, Motores de automóvil [9]

Durante el movimiento de la válvula 4 se incrementa la presión P'_E en el volumen V'_E del racor de la bomba y aparece una onda de presión en la boca de la tubería 6. Esta onda se desplaza por la tubería a una velocidad igual a la velocidad de propagación de las perturbaciones en el combustible $a = (1200-1400 \text{ m/s})$ y recorre una distancia L , desde el racor de la bomba hasta el cuerpo 7 del pulverizador del inyector, en un tiempo igual a:

$$\Delta t_r = L/a \quad (1)$$

El ángulo de rotación del cigüeñal (en grados), correspondiente a este tiempo, es:

$$\Delta \varphi_r = 2\pi n \Delta \tau_r \quad (2)$$

Donde n es la velocidad angular del motor (RPM.)

Al acercarse la onda de presión al inyector, en la cavidad V_P se incrementa la presión P_P , por efecto de la cual comienza a elevarse la aguja **10**, venciendo la fuerza de tensión previa que tiene el resorte **11**. Cuando la aguja se mueve desde su alojamiento, en la dirección mostrada por la flecha, entre el cono de la aguja y su alojamiento se forma una ranura, a través de la cual el combustible ingresa al canal central **8** del pulverizador y después, pasando por los orificios **9**, llega a la cámara de combustión del motor Diesel.

La caída de presiones $P_{iny} = P'_P - P_{cil}$ (donde P_{cil} es la presión del gas en el cilindro), por efecto de la cual el combustible se suministra al inyector, se denomina presión de inyección o de pulverización. La inyección termina después de que el émbolo buzo con el borde helicoidal **13** abre la lumbrera **12** en el casquillo como resultado de lo cual disminuirán las presiones P_P y P'_P en el pulverizador. La fuerza del resorte del inyector resultará mayor que la presión del combustible y la aguja bajará a su alojamiento.

Cuando la onda de presión llega al inyector surge la onda de presión inversa que se desplaza desde el inyector hacia la bomba. En el racor de la bomba la onda inversa también parcialmente se reflejará y aparecerá una segunda onda directa de presión. Ella se adiciona a la onda originada por el émbolo buzo si el suministro de combustible por la sección de bombeo aún no se ha interrumpido. Para el caso, en que al instante que llegue la onda reflejada tenga lugar el corte de combustible y la válvula de inyección se levante de su asiento, la segunda onda directa se moverá hacia el inyector en forma de una onda secundaria de suministro. Esta, llegando al inyector, puede por segunda vez levantar la aguja y se producirá una inyección adicional de combustible, si es que la amplitud de la onda de presión es la suficiente para vencer la fuerza del resorte.

Las ondas de presiones directas y reflejadas se atenúan gradualmente en el conducto de inyección, debido a las pérdidas irreversibles de energía en vencer la fricción en las paredes de la tubería y deformarlas, en el líquido, etc., y al inicio de la siguiente inyección prácticamente se eliminan. En toda la cavidad de bombeo, que incluye los volúmenes del racor de la bomba, de la tubería de alta presión y del pulverizador se establece la presión denominada residual (**Pr**) o remanente.

La presión de inyección y las secciones de paso (de reducción) en el pulverizador varían en el proceso de dosificación, en consecuencia varían también las velocidades de salida del combustible por los orificios de pulverización y su suministro.

La ausencia de un método de cálculo que vincule los procesos de suministro de combustible de preparación de la mezcla y de combustión en el motor Diesel, así como la complejidad de modificar experimentalmente los parámetros de inyección, no permiten determinar la forma óptima de la curva característica de inyección.

1.5. ELEMENTOS DEL CIRCUITO DE ALTA PRESIÓN

Los elementos que más fallan en el sistema de inyección son los que componen el circuito de alta presión, además son los más complejos (bomba e inyector) en todos los aspectos. Cabe resaltar que existe mucha información sobre bombas, tubería e inyectores, por razones de espacio solo se darán las características principales relacionadas con nuestro estudio. Para una mayor profundización consultar [17], [23].

1.5.1. Bombas de inyección

Este es el elemento más complejo del sistema de inyección del motor Diesel. Dosifica el combustible en correspondencia con el régimen de funcionamiento del motor, suministra combustible al inyector y asegura, en conjunto con otros elementos del sistema, el desarrollo necesario del proceso de inyección. Las bombas de inyección tienen como característica fundamental de diseño que deben ser robustas para soportar la presión del sistema de inyección y su fabricación exige métodos de precisión. Existe gran número de tipos de bombas en el mercado, algunos fabricantes de motores idean y construyen su propio tipo, en tanto que otros prefieren adaptar sus motores a un prototipo de bomba fabricado por una casa especializada.

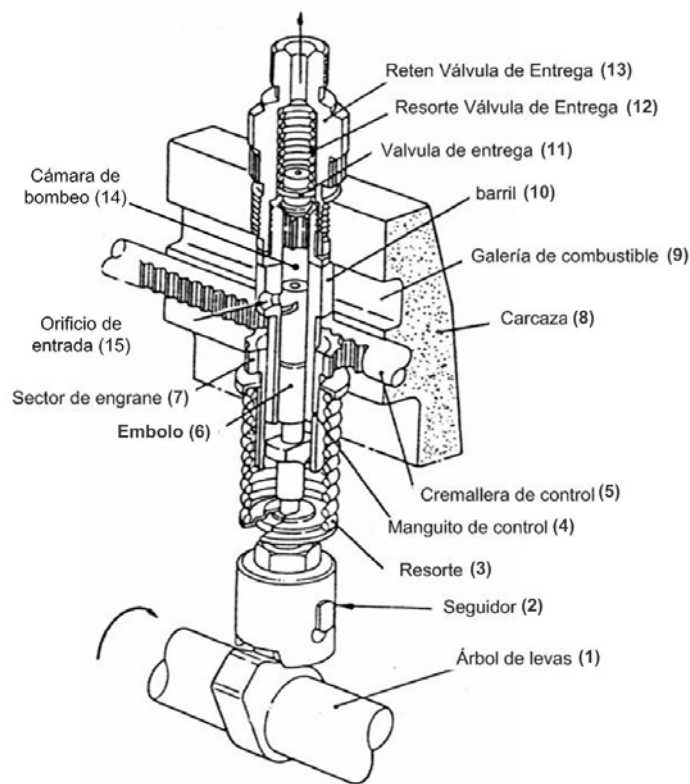
La bomba se impulsa desde el motor y está sincronizada (por medio de un gobernador) para entregar el combustible a cada inyector en el momento preciso.

- **Bombas de inyección en línea.** Las bombas de inyección en línea tienen cierto número de elementos de bombeo montados en línea dentro del cuerpo de la bomba. Se utiliza un elemento de bombeo para cada cilindro del motor. La bomba envía el combustible a los inyectores con una serie de descargas; por ello a veces se le llama Bomba de descarga. En un motor de un solo cilindro, se utiliza un elemento de bombeo y no se llama bomba en línea. En la figura 5, se ilustra los elementos básicos de una bomba en línea. El funcionamiento de la bomba se explica a continuación.

El *árbol de levas* (1) de la bomba está sincronizada con el movimiento del cigüeñal mediante un acople (en los motores de cuatro tiempos, la bomba gira a la mitad de revoluciones del motor). Cuando gira el árbol de levas, una de las levas eleva el

seguidor (2), que a su vez, eleva el *embolo* (6) en el *barril* (10) de la bomba. El combustible enviado por la bomba de alimentación o elevadora llega a la *galería* (14). El embolo esta en la parte inferior de su carrera y ha dejado abierto el *orificio de entrada* (15), y el combustible de la galería entra en la *cámara de bombeo* (14) encima del embolo.

Figura 5. Sección de una bomba de inyección lineal con cremallera

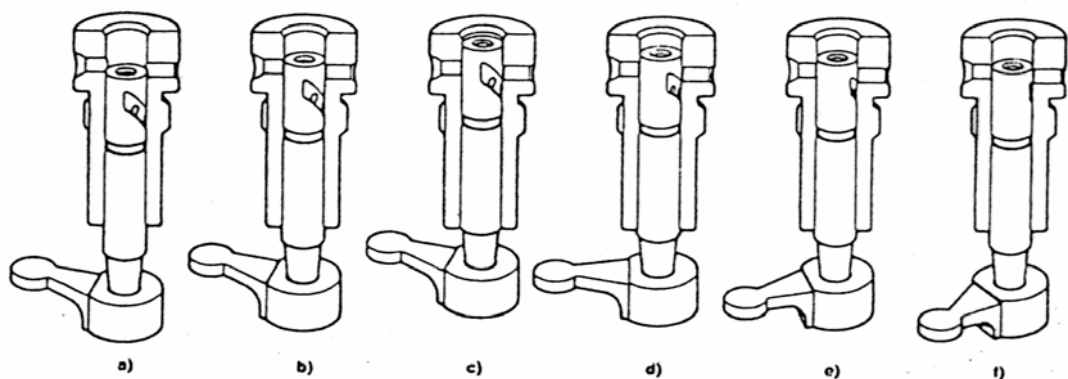


Fuente: May Ed, Mecánica para motores Diesel [15].

La rotación del árbol de levas hace subir el embolo en su barril aumenta la presión. Esto, primero, cierra el orificio de entrada en un lado del barril y luego envía el combustible por la *válvula de entrega* (11) en la parte superior de la bomba hasta el inyector, que lo atomiza en la cámara de combustión. Según continua la rotación del árbol de levas, el embolo termina su carrera ascendente y luego baja por la

acción del *resorte* (3) que mantiene el seguidor contra la leva. La cantidad de combustible que entrega la bomba se puede variar mediante la *cremallera* (5) (en algunos modelos mediante una *varilla de control*), la cual puede moverse hacia adentro o hacia fuera para tal propósito.

Figura 6. Barril y embolo de la bomba



Fuente: May Ed, Mecánica para motores Diesel [15].

La carrera del embolo es fija (dada por el perfil de la leva), la regulación de la cantidad de combustible se da por la comunicación del puerto de descarga (hacia el inyector) con el de retorno. En la figura 6 se ilustra el émbolo de la bomba en diversas posiciones para entrega.

En **a**, el émbolo esta en la parte inferior de su carrera y la palanca está en la posición para entrega de máximo combustible; éste penetra por ambos orificios en el barril., después el embolo sube ligeramente y su parte superior cierra ambos orificios en el barril, como se ve en **b**. La inyección esta a punto de comenzar. Conforme sigue subiendo el émbolo, aplica presión al combustible que hay encima de él (en la cámara de bombeo) para descargarlo por la válvula de entrega hacia el inyector. En **c**, el émbolo está en la parte más alta de su carrera efectiva y ha concluido la inyección. El borde superior de la hélice acaba de descubrir el orificio

de retorno para que el combustible que hay encima del émbolo retorne a la galería. En **d**, el émbolo ha girado hacia la derecha con respecto a su posición en **a**, **b** y **c**; con ello se ha reducido la longitud de su carrera efectiva. Esto se debe a la forma de la hélice que ha descubierto el orificio de retorno más pronto que en la posición anterior, con lo que se reduce la cantidad de combustible enviada por el émbolo al inyector. La posición **d** es más o menos para media carga. La palanca del émbolo ha girado todavía más a la derecha, a la posición de marcha mínima (marcha en vacío o " ralentí "). Ahora el émbolo bombeará muy poco combustible porque la hélice descubrirá el orificio de retorno después de un movimiento muy corto del émbolo. Para efectuar el paro del motor se corta el paso del combustible hacia el inyector, girando la palanca todavía más hacia la derecha, a una posición **f** en la cual la parte superior del émbolo cierra ambos orificios y la hélice descubre el orificio de retorno. Con esto todo el combustible retorna a la galería y, al no haber bombeo, no hay inyección.

Se debe recordar que en todas las posiciones de **a** hasta **f** el émbolo se mueve a toda la longitud de su carrera y que la carrera *efectiva* es la que solamente se puede modificar al girar el émbolo en su barril para cambiar la posición de la hélice en relación con el orificio de retorno.

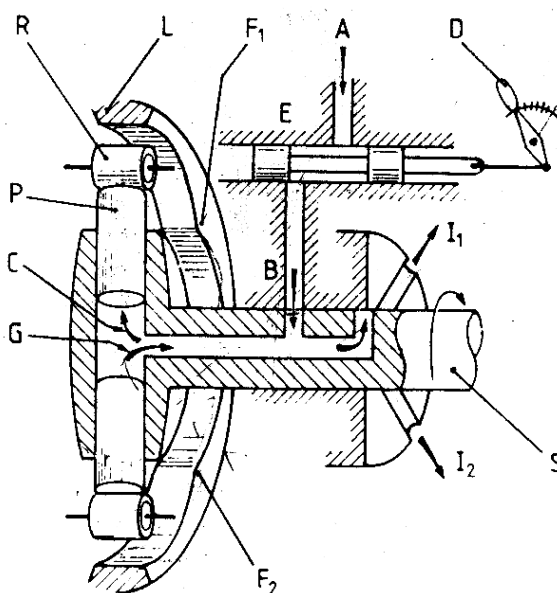
Este procedimiento es tan sencillo y con tan pocos elementos, requiere en cambio, un trabajo de altísima precisión y unos juegos mínimos, hasta tal punto que pistón y camisa de bomba, al igual que aguja y guía del inyector, están hermanados y, si se cambian, debe cambiarse el juego.

Bomba Rotativa: las bombas de inyección tipo rotativas o distribuidor reciben su nombre por su método particular para distribuir el combustible a los inyectores. Mientras que en las bombas en línea se utiliza cierto número de elementos de

bombeo, en la de distribuidor sólo se emplea un elemento de bombeo para darle alta presión al combustible y luego distribuirlo a los inyectores.

La bomba rotativa lleva un pistón giratorio o dos opuestos trabajando sobre una sola cámara de inyección. Un distribuidor se ocupa de llevar la inyección al inyector que corresponda, la leva es única, pero con los lóbulos o salientes necesarios para dar las inyecciones previstas por cada vuelta. Las figuras 7 y 8 muestran el principio de funcionamiento de las dos bombas rotativas más representativas, la DPA y la VE respectivamente.

Figura 7. Funcionamiento de la bomba rotativa tipo DPA

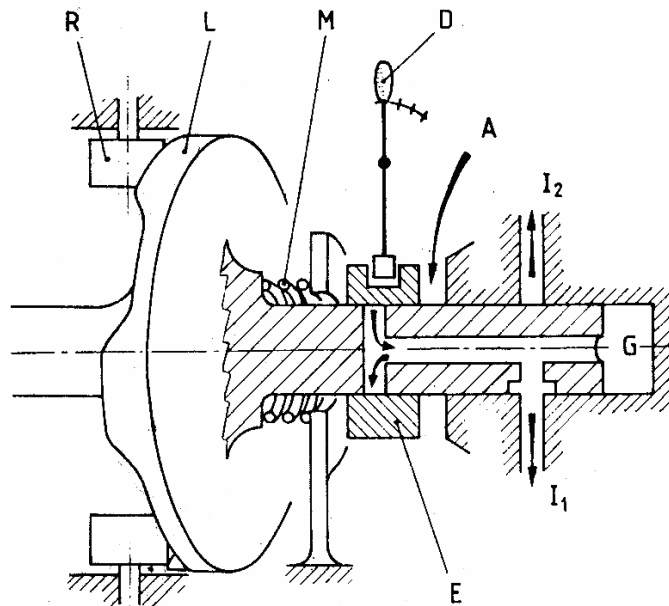


Fuente: Miralles de Imperial J. Inyección y combustión en Motores Diesel [17]

Las marcas CAV, Lucas y Roosa-Master responden al esquema de la bomba DPA. Un distribuidor giratorio, por medio de un agujero de aspiración B, posee la cámara de inyección G, los dos pistones inyectores P y los rodillos empujadores R, apoyados en los lóbulos de leva F1 y F2. Los dos pistoncillos flotantes P se separan

uno de otro, admitiendo la cantidad de combustible que llega por **A** (alimentación). Según la posición del mando acelerador o regulador de dosado **D**, la estrangulación **E**, deja entrar mas o menos la cantidad de combustible. La cantidad de líquido que sale por un orificio o estrangulación es proporcional a la sección de paso y a la presión. La cámara **G** se llenará, más o menos, separando lo suficiente los dos pistoncillos **P**. Al rodar llega un momento en que los lóbulos de la leva **F1** y **F2** obligarán a los pistoncillos a acercarse uno a otro. La cámara **G** reducirá el volumen, pero el combustible ya no podrá volver atrás porque el paso se ha cerrado. Saldrá pues inyectado a presión por el orificio **I1** o **I2**. Este es el proceso que se repetirá 4 o 6 veces por vuelta según el número de cilindros del motor. Claro que la bomba tendrá los lóbulos de leva y salidas al inyector correspondiente.

Figura 8. Funcionamiento de la bomba rotativa tipo VE



Fuente: Miralles de Imperial J. Inyección y combustión en Motores Diesel [17].

En la *bomba rotativa VE* (ver figura 8), el pistón es distribuidor e inyector a un tiempo. La leva **L** forma cuerpo con el mismo pero no es ni interior ni exterior, sino axial. El muelle de retorno **M** apoya la leva **L** contra los rodillos fijos **R**. Todo el conjunto se mueve dentro de una caja bañada en combustible. El esquema está dibujado en el momento de inyectar. Cuando las muescas de la leva permiten que la cámara **G** se agrande y el pistón vaya con la leva hacia la izquierda, se descubre más o menos, según la disposición del manguito de dosado **E** del mando **D**, el orificio de admisión es descubierto y se llena de nuevo la cámara. Como aquí el pistón no es flotante, se producirá un vacío y se vaporizaría el combustible si el dosado se regulase por estrangulación. El manguito es ahora un sencillo distribuidor que igual alimenta la cámara **G**, mientras da paso al líquido **A** descubriendo el orificio, que inicia la descarga súbita de presión y termina la inyección cuando se vuelve a descubrir el orificio. Al girar el pistón con su leva va admitiendo e inyectando sucesivamente a cada uno de los cilindros **I1, I2,...**, a lo largo de la vuelta.

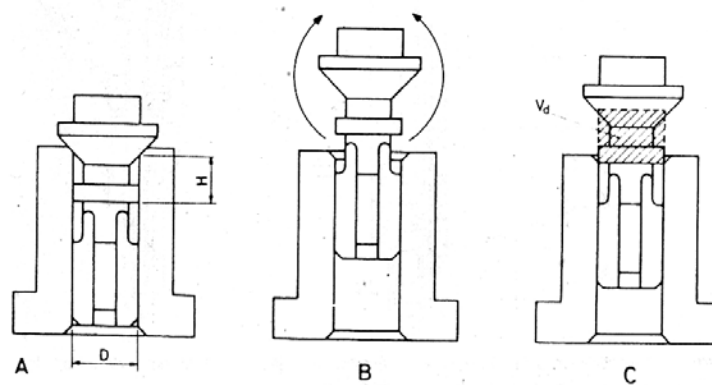
1.5.2. Válvulas de entrega o de descarga

A la salida de la bomba hacia los tubos de inyección se dispone de una válvula como la que se muestra en la figura 9, cuya función es mantener los tubos de inyección cebados, es decir llenos de combustible y libres de aire. Para así permitir que la presión de inyección se trasmita a gran velocidad al inyector y el volumen inyectado responda al dosificado por la bomba. Estas válvulas, denominadas de retención, pueden ser de bola o de asiento cónico.

En los motores rápidos, al cerrarse la válvula de retención quedaría el combustible a sobrepresión en los tubos de inyección. Aunque los tubos son de gran espesor relativo y gran rigidez no dejan de ser elásticos, y bajo la elevadísima presión de inyección (150-250 Bar) se deforman aumentando muy ligeramente su capacidad y

al cesar la presión de la bomba recobran su volumen interno primitivo impulsando el combustible hacia el inyector y produciendo segundas inyecciones y goteo. Para evitar esto se dispone, en lugar de las sencillas válvulas de retención, unas válvulas denominadas válvulas de reaspiración o descarga cuya forma y funcionamiento se muestra en la figura 9.

Figura 9. Funcionamiento de la Entrega.



Fuente: Miralles de imperial J. Inyección y combustión en motores Diesel [17].

Como vemos en **A** la válvula permanece cerrada mientras el combustible comienza a ser comprimido por el pistón inyector cuando éste cierra la lumbrera de entrada de combustible. Cuando la presión es superior a la que tiene el combustible que se encuentra en la tubería y a la tensión del resorte, comienza a desplazarse el vástago. Durante esta ascensión, llega un momento en que el collarín abandona su guía, como se ve en **B**. Tan solo es en este momento cuando el combustible tiene paso libre hacia el inyector.

En el momento que cesa la inyección por haber llegado el vaciado helicoidal del pistón inyector a descubrir la lumbrera de alimentación, la diferencia de presión que se crea entre la cámara de compresión y la del tubo de inyección sumada a la acción del resorte, obliga al vástago a descender.

Al final de la inyección, cuando el collarín vuelve a alcanzar la guía estrangula o cierra el paso del combustible, en el racor de la bomba se libera el siguiente volumen:

$$V_{des} = \frac{\pi d^2}{4} * h \quad (3)$$

Donde **d** es el diámetro del cinturón de descarga de la válvula, **h** es la carrera de la válvula desde el instante en que el borde inferior del cinturón de descarga ingresa al canal hasta que la cabeza de la válvula toca su asiento. El espacio V_{des} se denomina *volumen de descarga*. Como resultado de la liberación de cierto volumen del racor de la bomba, la presión P'_E (ver figura 4) disminuye bruscamente. Esto contribuye a una rápida interrupción del suministro de combustible por el inyector y evita la posibilidad de inyecciones adicionales o goteo de combustible.

Las válvulas de entrega son elementos con un ajuste entre collarín y guía tan preciso y delicado como el que corresponde a pistón inyector y su camisa; son piezas que van siempre hermanadas, ajustadas en pares, con superficies lapeadas y huelgos inferiores a 3 micras. Eso quiere decir que están sujetas a desgaste, que con el tiempo pierden estanqueidad, que el volumen V_{des} se reduce y dejan por lo tanto de producir la descarga de presión deseada. Es muy buena norma renovarlas cada vez que tienen que sustituirse los pistones inyectores y sus camisas.

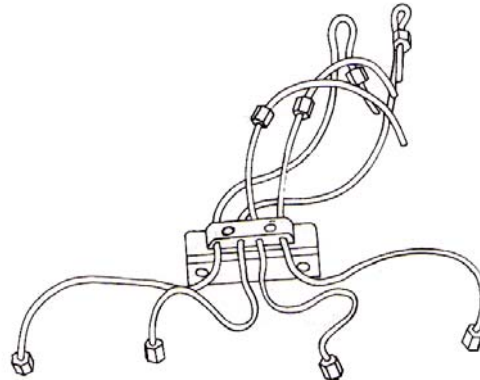
1.5.3. Tubería de inyección

El impulso de la presión desde la bomba hasta el inyector se transmite a través de la tubería de inyección. Las pérdidas de energía en este proceso deben ser mínimas y aproximadamente iguales en cada tubería.

La tubería debe tener insignificantes deformaciones al pasar la onda de presión y poseer elevada resistencia mecánica para no solo resistir la alta presión a la que es sometido sino para que no se hinchen elásticamente con esas presiones para deshincharse luego y producir nuevas inyecciones. Por eso, las tuberías de inyección se fabrican de aceros aleados⁴ con paredes de gran grosor (2-3 mm) y un diámetro interno de 1,5-3 mm, se debe destacar que siempre el grosor del tubo es mayor que su diámetro interno para soportar las grandes presiones. La tubería de inyección para cada cilindro debe tener las mismas características (material, diámetro y longitud) para evitar fenómenos que afecten el proceso de inyección. Al aumentar la longitud de la tubería de impulsión se gasta más tiempo en el movimiento de la onda desde la bomba al inyector, como se desprende de la fórmula (1) y se incrementa también el volumen del combustible contenido en la tubería.

⁴ Hace unos años, los tubos utilizados eran de cobre; pero este material reacciona con ciertos compuestos sulfúricos del combustible Diesel para formar depósitos grasos, por lo cual los tubos de cobre son cada vez menos utilizados.

Figura 10. Curvaturas en la tubería de inyección



Fuente: Sena, Mecánica Diesel, fascículo 20. [22]

El tubo que conecta la bomba con el inyector más retirado de ella, con un mínimo de curva, se usa como tubo patrón. Para los otros tubos la distancia bomba-inyectores es menor y se deben efectuar curvas o espiras para conservar la longitud del tubo patrón como se muestra en la figura 10.

1.5.4. Inyectores

La forma final de la característica del suministro de la inyección depende del inyector. Este influye en la pulverización del combustible y en su distribución por la cámara de combustión. La selección del inyector depende de la construcción de la cámara de combustión, la localización del inyector y el tipo de sistema de inyección empleado.

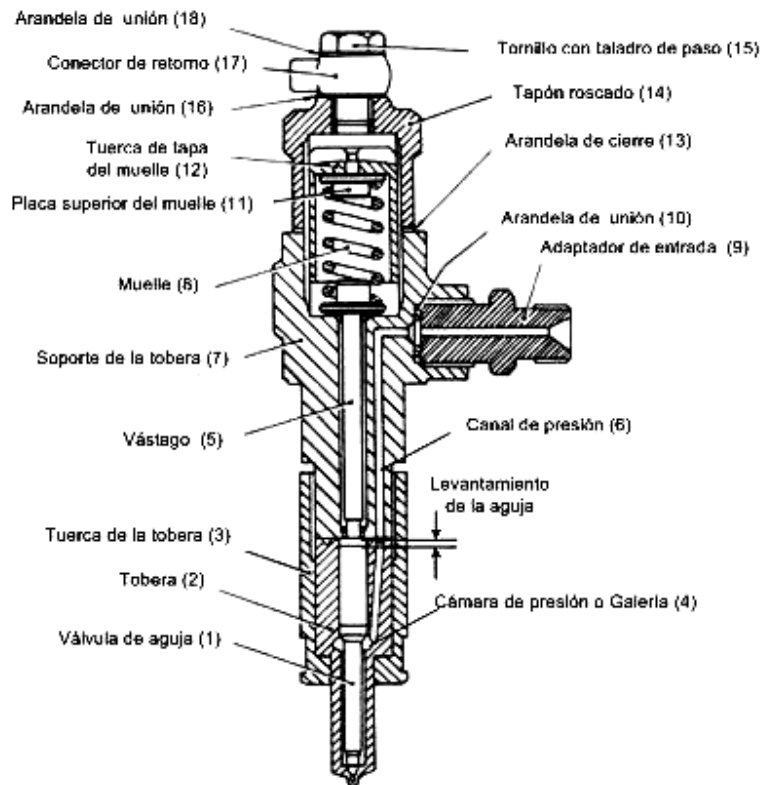
Esta comprobado que se necesita un inyector que funcione a presiones que superan a veces los 20 MPa y para inyectar cantidades muy pequeñas de combustible en una llama incandescente a un ritmo de 150 a 1500 inyecciones por minuto. Con excepción de las arandelas de cierre, que se fabrican en cobre, todos los componentes del inyector son de acero tratado.

A continuación se enuncian las condiciones que debe reunir el inyector.

- Que el combustible sea pulverizado en gotas de dimensiones convenientes.
- El chorro de combustible debe distribuirse por todo el seno del aire.
- La energía cinética de las gotas debe ser suficiente para que esta penetren en el aire comprimido y alcancen los lugares mas apartados de la cámara de combustión. Sin embargo, esa energía no debe ser tan grande como para que el combustible choque contra las paredes del cilindro de la cámara de combustión, donde formará carbón y se diluirá con el combustible.
- El comienzo y final de la inyección deben ser bien definidos. No debe producirse ni goteo, ni fugas entre dos inyecciones.
- Las características de la pulverización deben mantenerse durante todo el periodo de introducción de combustible.
- Además, debe ser fácil la fijación del valor de la presión de apertura, debe conservar esas condiciones el mayor tiempo posible, sin perder presión el resorte, sin deformarse el asiento y sin desgastarse la tobera.

En la figura 11 se muestran los principales componentes de un inyector convencional.

Figura 11. Vista en sección de un inyector de taladro múltiple



Fuente: Asmas, Sistemas de Inyección [2]

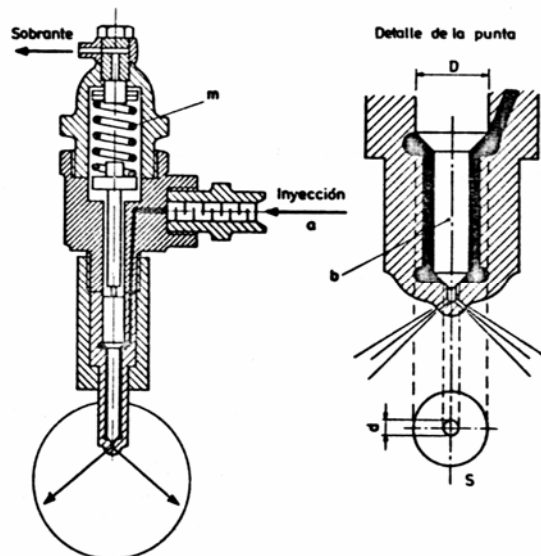
- **Conjunto de tobera**, es el elemento más importante del inyector ya que se encarga de pulverizar el combustible, sobresale parcialmente en la cámara de combustión y está sometido a altas temperaturas. La tobera esta formada por un cuerpo (2) y una válvula de aguja (1). Estos dos componentes están ensamblados para formar un conjunto donde la válvula de aguja puede deslizarse, pero con una holgura mínima, en el interior del cuerpo de la tobera. La aguja se esmerila directamente en su guía, y el juego entre estos dos elementos del orden de 0.002 a 0.003 mm, debiendo ser entonces el error combinado de la excentricidad entre el asiento y la superficie de guía de la aguja, menor que ese valor. El cuerpo de la tobera tiene una o más perforaciones que salen de la superficie superior que pueden llevar una ranura

anular, hacia una cámara de presión (4), o conducto de combustible por encima del asiento de la válvula de aguja, la cual está escalonada y acotada por donde atraviesa la cámara de presión. En el extremo inferior del cuerpo de la tobera, debajo del asiento de la válvula de aguja, está el conducto o los conductos por los cuales pasan el combustible hacia la cámara de combustión. El estado de estos conductos o agujeros determina el ángulo del cono de atomización.

- **Soporte de la tobera (7)**, se encarga de fijar la unidad en la culata con brida, grapa o tornillo (figura 13). Tiene unos conductos perforados para llevar el combustible desde la conexión de admisión, hasta la boquilla y una conexión de retorno. El extremo inferior del portainyector tiene una superficie que se ha pulido y esmerilado cuidadosamente, lo que proporciona un cierre a prueba de fugas, con la superficie pulida en la parte superior del cuerpo de la tobera.
- **Tuerca de tobera de acero (3)**, se atornilla sobre el extremo inferior del portainyector, fijando así todo el conjunto de la tobera en su lugar correspondiente.
- **Muelle de compresión (8)**, Mantiene la válvula de aguja en su asiento, su pretensión determina la presión de apertura del inyector.
- **Vástago de acero (5)**, transmite la fuerza del muelle a la válvula de aguja, esta situado en el interior del soporte de la tobera, entre el muelle y la válvula de aguja.
- **Mecanismo de ajuste del muelle (11)**, se encarga de variar la fuerza de pretensión en el muelle. Normalmente es un sistema de tornillo con contratuerca o laines.
- **Tapón roscado de cierre (14)**, se acopla sobre el soporte de la tobera para evitar que entre suciedad. Este tapón puede estar perforado y roscado para poder adaptar una conexión de retorno.

El funcionamiento del inyector es muy simple y se ilustra en la figura 12, cuando el combustible enviado por la bomba de inyección entra en el soporte de la tobera, a través de la conexión de admisión y atraviesa él o los conductos perforados en dirección a la cámara de presión, situada sobre el asiento de la válvula de aguja **b**. Cuando la presión del combustible en la cámara de presión, aplica la fuerza necesaria al resalte de la válvula de aguja, para superar la fuerza del muelle **m**, hace que la válvula se levante de su asiento, dejando que el combustible fluya desde la tobera, hasta que termina la entrega de combustible por parte de la bomba. Entonces se dará un corte instantáneo del flujo, debido a que la válvula está pegada a su asiento por la fuerza del muelle, eliminando así la posibilidad de una posterior fuga o goteo.

Figura 12. Proceso de apertura del inyector.



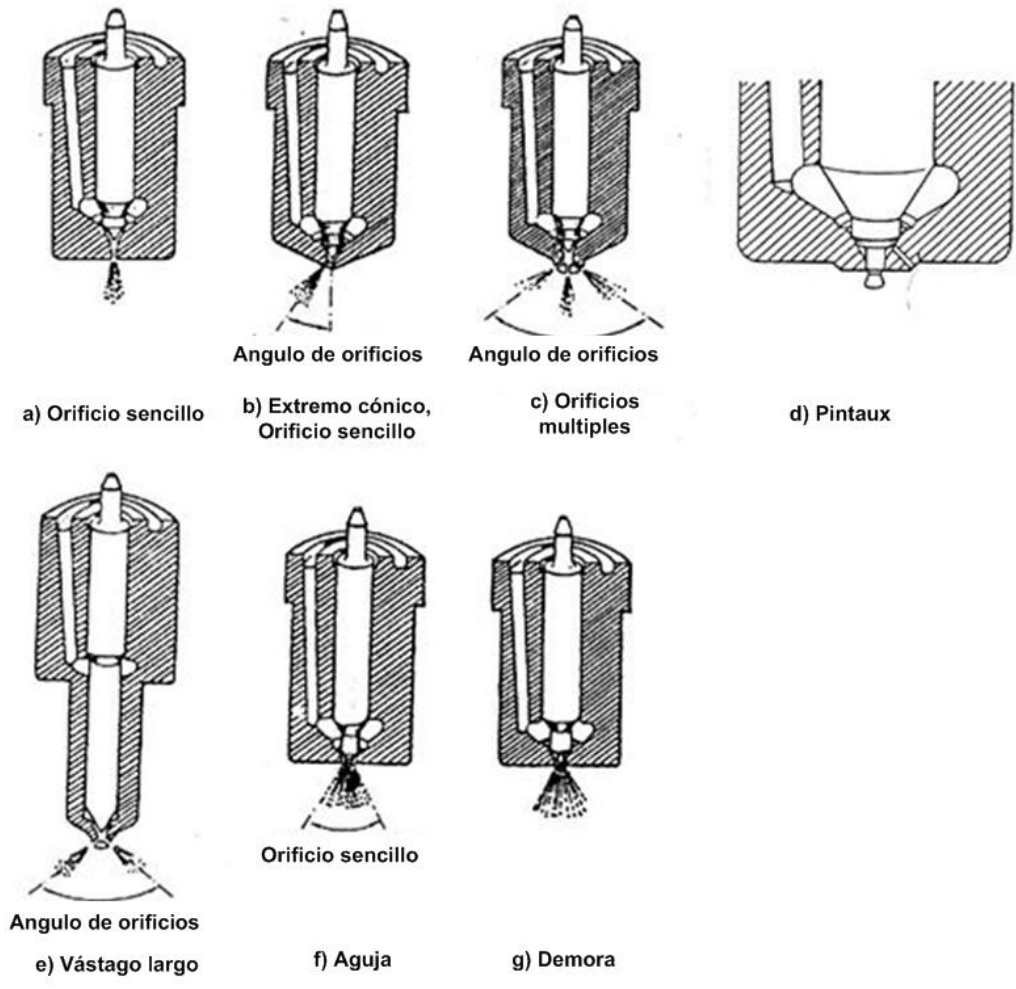
Fuente: Miralles de Imperial J, Inyección y combustión Motores Diesel [17]

Es necesario para la lubricación que cierta cantidad de combustible se filtre entre las superficies pulidas de guía de la válvula de aguja y el cuerpo de la tobera. Esta fuga de combustible se acumula alrededor del vástago y en el alojamiento del

muelle y el resto sale a través de la conexión de retorno instalada para cumplir este propósito.

Existen diversos tipos de toberas, con variaciones en la longitud, número de orificios y ángulos de atomización. El tipo de tobera que se utilice en un motor depende de los requisitos particulares de sus cámaras de combustión. En la figura 12 se ilustran los principales tipos de toberas.

Figura 13. Tipos de toberas



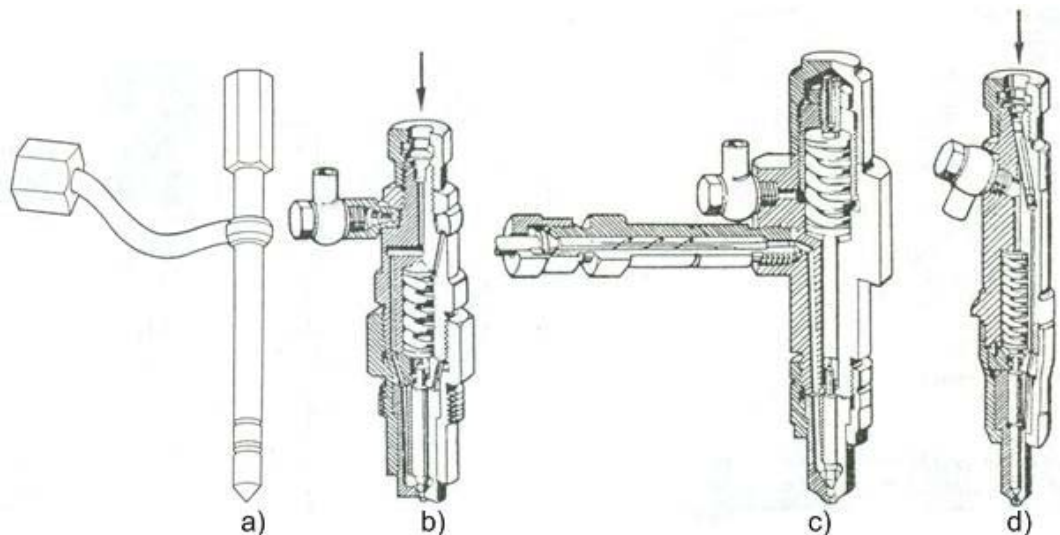
Fuente: May Ed, Mecánica para Motores Diesel [15]

- **Toberas de un solo orificio (a y b)**, estas toberas tienen un solo orificio taladrado en su extremo, cuyo diámetro puede ser de 0.2 mm o mayor. La tobera con punta cónica y un solo orificio tiene este taladrado en ángulo de acuerdo con el motor en que se instalará.
- **Toberas de orificios múltiples (c)**, estas toberas tienen dos o más orificios taladrados en el extremo. El número, tamaño y posición de los orificios dependen de los requerimientos del motor y de la forma de la cámara de combustión.
- **Toberas de vástago largo (d)**, estas toberas tienen un vástago largo que es una prolongación de la parte inferior de la tobera. Los orificios normales y el asiento de la válvula están en el extremo del vástago largo, que permite que la parte de la tobera que tiene holguras muy precisas, entre la aguja y la tobera, quede separada de la cámara de combustión a fin que puedan funcionar en una parte de la culata que está algo más fría.
- **Tobera de Pintaux (e)**, es una modificación de la tobera de aguja. Tiene un agujero auxiliar para atomización de la tobera, a fin de facilitar el arranque con el motor en frío. A la velocidad angular (rpm) de arranque del motor, la válvula de aguja no se levanta lo suficiente para que el agujero de la aguja descargue combustible, sino que el agujero auxiliar produce una atomización más fina que se requiere para el arranque del motor en frío. A velocidades normales de funcionamiento, las presiones en el sistema de combustible son más altas y la válvula de aguja se eleva más para que se despeje su orificio, que ahora descargará la mayor parte del combustible.
- **Toberas de aguja (f)**, estas toberas tienen un orificio mucho más grande y la punta de la aguja está reducida para formar una especie de alfiler que sobresale en el orificio. Estas toberas son en casi su totalidad autolimpiantes, no tienen tanta tendencia a bloquearse con carbonilla como las toberas de orificio.

Con la modificación de la forma y el tamaño de la aguja, se pueden tener inyectores con diversos patrones de atomización, que puede variar desde un cono hueco pequeño hasta un cono hueco con un ángulo de 60° . Las toberas de aguja se emplean en motores de inyección indirecta.

- **Toberas de retardo (g)**, son toberas modificadas en las que se ha cambiado la forma de la aguja para disminuir la cantidad de inyección al principio de la entrega. Esto reduce la cantidad de combustible en la cámara cuando empieza la combustión y también reduce el “cascabeleo”.

Aunque todos los inyectores accionados por presión tienen los mismos principios de funcionamiento, hay muchas variaciones en ellos, incluyendo su longitud, diámetro y el método para sujetarlos en la culata de cilindros. En la figura 14, se observan los diseños más comunes, los cuales son los inyectores: **a)** tipo lápiz, con montaje a rosca **b)**, brida **c)** y por grapa **d)**.



Fuente: May Ed, Mecánica para motores Diesel [15]

- **Inyectores tipo lápiz (a)**, es largo y delgado comparado con otros inyectores. Recibe el nombre por su forma. Este inyector largo permite que sus piezas funcionales estén lejos del calor de la cámara de combustión.
- **Inyectores con montaje a rosca (b)**, tiene la conexión para el tubo en la parte superior y una conexión de retorno en un lado. Tiene rosca para poder instalarlo en la culata. El ajuste de la presión de apertura es por medio de suplementos (lainas) colocados contra el extremo del resorte.
- **Inyectores con montaje a brida (c)**, tiene una brida para sujetarlo con tornillos en la culata y tiene un filtro del tipo de borde en la conexión de entrada, que protege al inyector porque retiene partículas que se pudieran desprender del tubo del inyector durante el servicio o por la vibración. La graduación de presión se ajusta con un tornillo prisionero contra la parte superior del resorte.
- **Inyector con montaje a grapa (e)**, Tiene la conexión de entrada en la parte superior y la de retorno a un lado. Se ajusta con lainas y para desarmarlo se saca la tuerca en su extremo inferior. El inyector se desarma por ambos extremos.

2. FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA INYECCIÓN

A continuación se hace una breve reseña de los factores más importantes que influyen en el proceso de suministro de combustible a la cámara de combustión.

2.1. PRESIÓN DE INYECCIÓN

La *presión de inyección* es la presión dinámica del combustible entre la bomba de inyección y el inyector.

2.1.1. Presión de Apertura

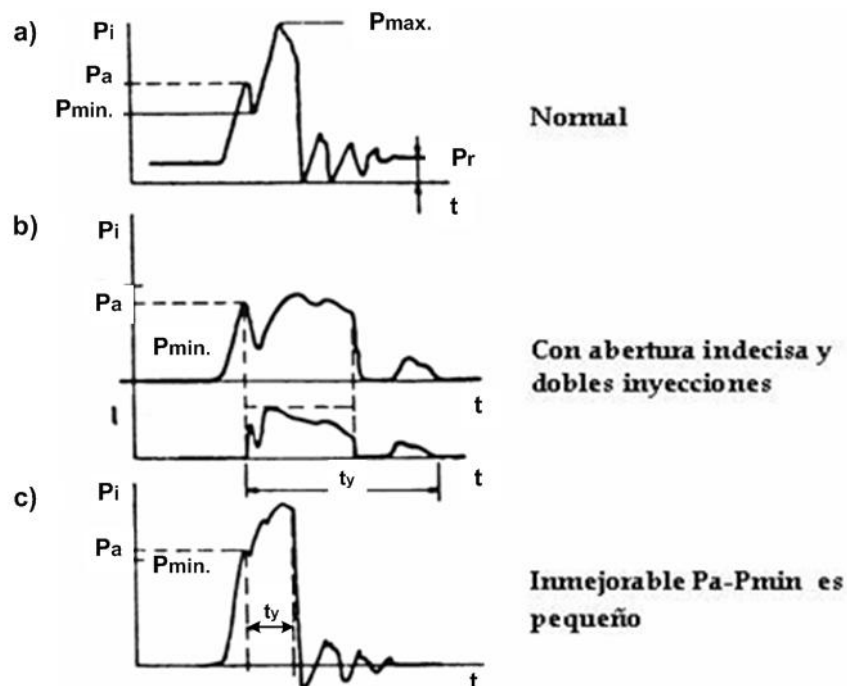
Es la presión necesaria para crear una fuerza opuesta al muelle del inyector, vencerlo, y ocasionar que el inyector se abra para dar paso al combustible hacia la cámara de inyección. El valor de esta presión es la que se debe reajustar con frecuencia (pues los muelles pierden siempre resistencia al irse fatigando) y es muy variable, para el inyector conviene que sea lo menor posible ya que, al cerrar, golpea sobre los asientos produciendo desgaste, pero la bomba y la velocidad de inyección suelen agradecer que sea alta.

La presión de apertura de los sistemas de inyección de los automotores de servicio urbano oscilan entre 120 y 280 bar. (150 bar. para el motor KIA), los valores altos de la presión de apertura son propios de motores rápidos, pero sin seguir ninguna ley regular. Hemos de ajustarnos a los valores que nos de el fabricante.

2.1.2. Caída de presión.

En cuanto se abre el inyector, el derrame de combustible en la cámara, a través de los orificios de la tobera, produce en general una caída de presión que se recuperará después, cuando la bomba inyectare nuevas cantidades de combustible. Podemos ver en la figura 14 que en efecto la presión cae hasta P_{\min} . Parece a primera vista que al caer la presión por debajo de P_a la válvula se volverá a cerrar, pero no es así, porque fijémonos que para levantar la aguja y vencer la fuerza inicial del muelle, se necesita una presión P_a mayor que para mantener la aguja levantada, ya que para abrir, la presión actúa sobre la corona $D-d$ de la figura 12, mientras que una vez abierto la superficie que se presenta es el disco total D , y basta con una presión P_a algo mas baja.

Figura 15. Las diversas presiones a lo largo de la inyección.



Fuente: Miralles de Imperial, J. Inyección y combustión motores Diesel. [17]

Sin embargo, si P_{\min} baja tanto que llega a ser inferior a P_a la inyección se interrumpirá para volver a empezar, sin beneficio para nadie y con el respectivo alargamiento del tiempo de inyección en la cámara, t_y . Las consecuencias se ven en la parte c) de la figura 15 y t_y puede llegar a alargarse en forma totalmente inadmisibles. Eso quiere decir que la caída de P_a a P_{\min} debe ser mínima hasta tal punto que en el diagrama se hace difícil de reconocer como aparece en d) de la misma figura.

Las dobles inyecciones que aparecen en la zona media pueden ser causadas por pérdida de tensión del muelle de inyector (fácil de arreglar), por una alta presión residual, es decir (problemas en la tubería de inyección o en la válvula de entrega).

Uno de los objetivos de la metodología desarrollada era detectar este valor en el pulso de presión, desafortunadamente el sensor por su montaje y naturaleza no alcanza a detectar la caída de presión que pone en evidencia la ocurrencia de la apertura del inyector.

2.1.3. Presión Máxima

Después que la bomba se recupera de la caída de presión desde P_a hasta P_{\min} , la presión sube enérgicamente como se observa en la figura anterior, para conseguir introducir el combustible necesario en el tiempo debido con la pulverización adecuada.

Si la presión de inyección es muy alta, se genera una fina pulverización y poca penetración del combustible. Esto origina focos de combustión localizados muy cerca de la tobera, produciendo carbonilla en la tobera que con el tiempo obstruirá sus orificios. Si la presión de apertura es muy baja, la pulverización será muy irregular, saldrán gotas de combustible, con la capacidad de chocar contra el pistón

y la camisa (alta penetración), produciendo focos de combustión que dañaran estos elementos, además la mezcla pierde combustible y puede lavar el lubricante del cilindro, causando problemas de lubricación.

En ambos casos se presentan problemas, porque no habrá un buen contacto íntimo, ni en óptimas proporciones del combustible con el aire ocasionando mala combustión, es decir, pérdida de combustible e incremento de emisiones.

Ante todo hemos de conseguir un fácil encendido, o sea necesitamos pronto una gran presión para provocar la llama. Consiguiendo esto llega el momento de propagar ese frente de llama a todas las zonas de la cámara. Dejando ahora de lado las formas de cámara y los orificios para que el aire vaya al encuentro del combustible, el combustible irá al encuentro del aire si la presión varía constantemente, produciendo gotas cada vez mayores que van alcanzando los puntos alejados a los que va llegando la llama. Para las bombas lineales, la forma ideal es, pues, una forma de pico triangular como marca la P_{max} de la parte a) de la figura 15. Sin embargo, esa forma es bastante difícil de alcanzar y su corrección no está en las manos del taller de reparaciones. Es preciso jugar para ello con la longitud y el diámetro del tubo de inyección, con el perfil de leva y con las válvulas de descarga.

2.1.4. Presión Residual

La tubería de inyección siempre esta llena de combustible gracias a una válvula de retención ubicada al final de la bomba de inyección. Seria tan perjudicial dejar las tuberías vacías (pues a la hora de efectuar la inyección solo comprimiríamos ese vacío sin llegar a introducir combustible en la cámara de combustión) como conseguir que quede con una presión residual P_r al finalizar la inyección. Esta P_r puede ocasionar que el tubo de inyección actué como muelle y se infle y desinfe a

pesar de su rigidez, o mejor dicho se dilate y encoja dando con ello unas ondas de presión residuales, amortiguadas en la boca del inyector, ondas que muchas veces consiguen volver abrir el inyector extemporáneamente produciendo segundas y terceras inyecciones de un combustible que ya no llega a quemar y es solo útil para conseguir que los gases de escape sean altamente contaminantes.

En un motor con los inyectores limpios y en condiciones normales, es muy difícil que se presente este efecto, pero en uno con los orificios de inyección obstruidos por haber quemado mal o por mal filtrado del combustible si se puede producir. A veces ocurre esto por haber encontrado en el mercado toberas parecidas pero no iguales a las recomendadas por el fabricante original, o por problemas en la válvula de descarga.

En algunos casos no es necesario que haya una presión residual alta para que ocurra la onda de cierre, pues basta que la elasticidad exagerada de tubo de inyección haga de fuelle, esto ocurre fácilmente cuando nos surtimos de tubos de inyección nuevos sin asegurarnos si son originales, o que el grueso de sus paredes y el material de que esta hechos sea el adecuado.

Lee [11], muestra en su estudio los efectos que tiene la variación de otros parámetros en la formación de segundas inyecciones (Alter-injection) tales como: el efecto de la presión de inyección, el coeficiente de amortiguamiento y diámetro de la aguja, la constante elástica y precarga del resorte del inyector.

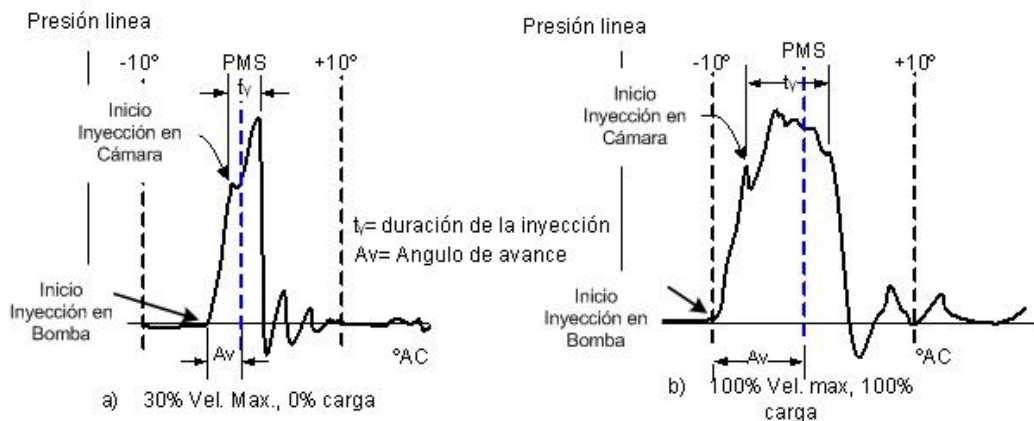
2.2. VARIACIÓN DEL ANGULO DE AVANCE DE LA INYECCIÓN (AAI)

Al variar la carga y la velocidad se hace necesario variar también el ángulo de avance. Por ejemplo, la inyección de combustible y la combustión en el motor KIA debe ser completada alrededor de 50 grados de giro del cigüeñal, el tiempo disponible en estado ralentí (700 rpm) para la atomización, mezclado evaporización y quemado no es mayor de 12 ms(milisegundos), si ahora se acelera el motor y se mantiene a máxima velocidad (1500rpm) el tiempo disponible para el mismo proceso disminuirá a 6 ms, este tiempo es muy corto para una buena combustión, por lo cual se hace indispensable ganar mas ángulo de avance, como se muestra en la figura 16, donde al aumentar la velocidad y/o la carga el proceso de inyección comienza unos grados antes que a bajas revoluciones y/o vacío.

Es necesario que los motores lleven incorporado un mecanismo automático que permita acomodar el ángulo de avance de la inyección dependiendo de la velocidad. En las bombas lineales se regula por el movimiento de unas contrapesas centrifugas, en la bombas rotativas la solución es mucho mas general pues en todas consiste en un pistón compensado cuya posición depende exclusivamente de la presión de dosado, es decir, del régimen.

El inicio de la inyección en la cámara se define como la porción de ángulo de giro del cigüeñal comprendido entre el instante en que se abre el inyector dando paso al combustible hacia la cámara de combustión y la llegada del pistón al PMS (Figura 16). Sucede unos instantes después que la bomba comienza a levantar la presión en la tubería y depende de varios factores como se vera más adelante.

Figura 16. Avance de la inyección variando velocidad y carga.

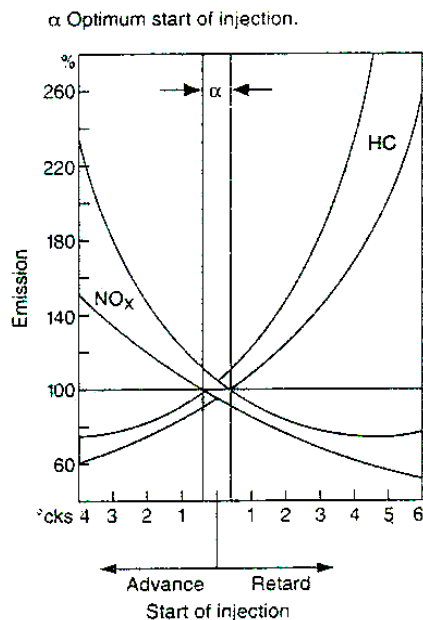


Fuente: Miralles de Imperial, J. Inyección y combustión motores Diesel. [17]

El inicio de la inyección del combustible en la cámara de combustión tiene una considerable influencia sobre el inicio de la combustión de la mezcla aire-combustible⁵. La máxima temperatura en la carrera de compresión ocurre en el PMS, si la combustión es iniciada mucho antes del PMS (adelantada), la presión en la combustión se incrementara exageradamente frenando el movimiento ascendente del pistón, bajando la eficiencia y desempeño del motor. Si el inicio de la combustión es avanzado (lógicamente ocasionado por un inicio de inyección muy temprano), la temperatura en la cámara de combustión se incrementará, produciendo un aumento en las emisiones de NOx. Si el inicio de la inyección es muy retardado, esto producirá una combustión incompleta aumentando las emisiones de material particulado e hidrocarburos sin quemar (HC) como se observa en la figura 17.

⁵ El intervalo de tiempo (o ángulo de giro del cigüeñal) entre el inicio de la inyección y el inicio de la combustión. Se conoce como retardo a la ignición. Ver Heywood [2] Pág. 548.

Figura 17. Bandas de dispersión de emisiones de NO_x y HC



Fuente: Bosch, Diesel-engine management [3]

Los factores opuestos, por un lado el consumo específico de combustible y emisiones de hidrocarburos y por otro lado las emisiones de humo negro y NO_x, demandan un rango mínimo para el inicio de la inyección con el objetivo de alcanzar los respectivos valores óptimos.

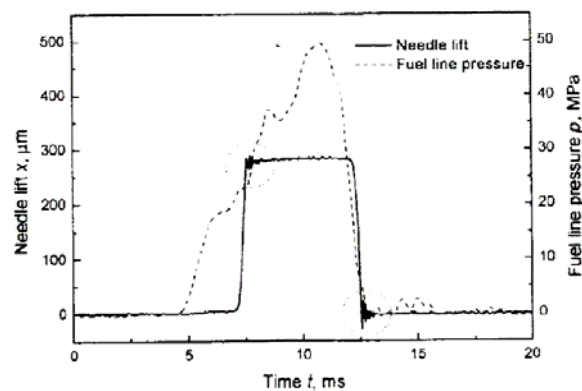
El inicio de inyección de la bomba se define como el instante en que la bomba comienza a elevar la presión en la tubería de inyección, este es el parámetro que se utiliza para la calibración del sistema de inyección, es un parámetro dado por el fabricante en los respectivos manuales de mantenimiento.

2.3. DURACIÓN DE LA INYECCIÓN Y VELOCIDAD DE DESCARGA

El termino “Velocidad de descarga” describe la curva característica de la cantidad de combustible inyectado dentro de la cámara de combustión como una función

del ángulo de giro del cigüeñal o del árbol de levas. Uno de los parámetros principales que afectan la curva característica de la inyección es la duración de la inyección. La duración de la inyección, como ya se dijo, es el tiempo t_y (en grados de cigüeñal) que sucede entre la abertura del inyector y el fin de la inyección, en motores rápidos este tiempo es del orden de milésimas de segundo. En la figura 18 se muestra la duración de la inyección, iniciando cuando la aguja se levanta debido a que la presión vence el resorte del inyector y finaliza cuando la presión generada por la bomba cae, cerrándose la aguja abruptamente.

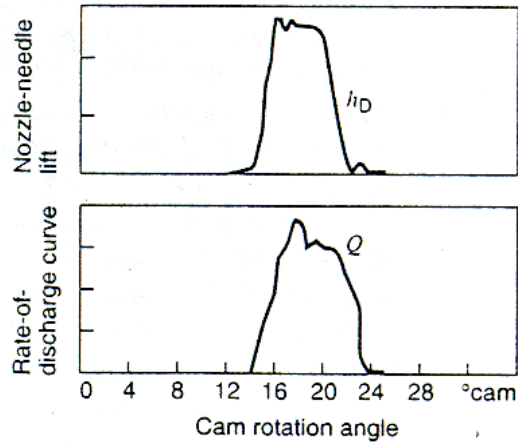
Figura 18. Duración de la inyección



Fuente: Lee J. y Chao S. Bouncing of the diesel injector needle at the closing stage [12].

En las curvas de la figura 18, se observa que el caudal entregado se produce durante el levantamiento de la aguja, como debe ser.

Figura 19. Velocidad de descarga



Fuente: Bosch, Diesel-engine management [3].

Algunos factores como: el desgaste de los orificios de tobera, crecimiento de los huelgos y por lo tanto de las fugas, el desgaste de los engranajes y las levas modifican el tiempo de inyección perjudicándole buen funcionamiento del motor. En general, el tiempo de inyección conviene que sea lo mas corto posible siempre y cuando no se produzcan el picado Diesel, o segundas inyecciones.

2.4. CALIDAD DEL COMBUSTIBLE

Un combustible contaminado con agua, sulfuros o partículas abrasivas aceleran el proceso de desgaste de los inyectores y componentes (émbolos) de la cámara de presión de la bomba.

Los abrasivos desgastan los componentes que están en contacto con el combustible, agranda las tolerancias entre la aguja y el soporte, puede dañar el asiento del inyector y los agujeros de atomización. El agua y el azufre causan daños por corrosión, desgaste y picadura de las superficies.

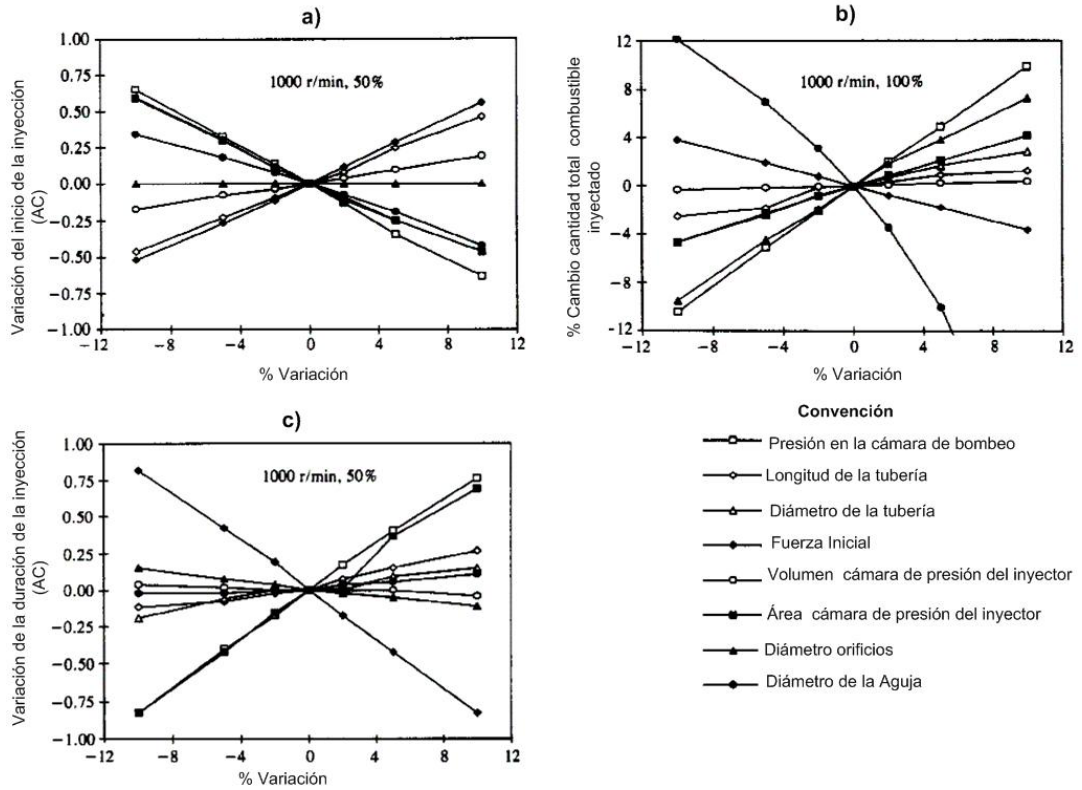
2.5. VARIACIÓN DE ALGUNOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

En esta sección se pretende mostrar lo vulnerable que es el comportamiento del sistema de inyección y el desempeño del motor, ante la variación de cualquier parámetro físico, además, se quiere recalcar la importancia de seguir las recomendaciones del fabricante del motor en cuanto a las especificaciones del tipo de inyector, bomba y tubería, evitando cambiar algún elemento o parámetro de operación por costos o caprichos. Para observar como afecta la variación de algunos parámetros el inicio, la duración y la cantidad de combustible inyectado se incluyen los resultados del estudio realizado por Arcoumanis C. y Fairbrother R. [16] sobre un sistema de inyección completamente instrumentado, en el que utilizaron una bomba rotativa tipo VE y 4 inyectores tipo lápiz.

2.5.1. Presión en la cámara de bombeo

Es el parámetro que más afecta el inicio y la duración de la inyección, y por supuesto la cantidad de combustible inyectado. De acuerdo con la figura 20a, por ejemplo, una reducción del 10% en la presión de la cámara de bombeo puede demorar el inicio de la inyección de 0,65 a 0,7 ° AC (Ángulo de giro del cigüeñal).

Figura 20. Variación de algunos parámetros físicos



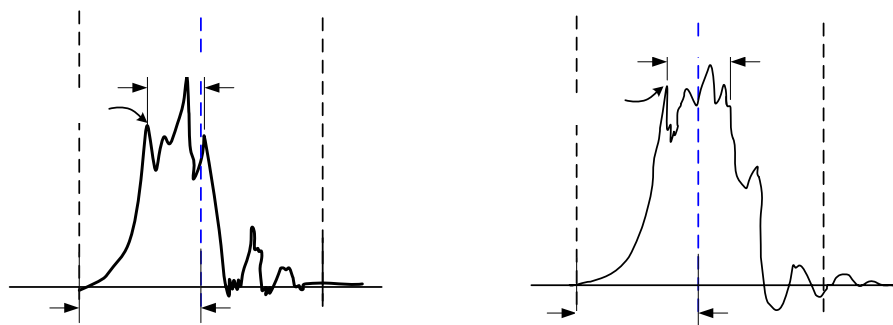
Fuente: Lee J. y Lee V, Bouncing of the Diesel injector needle at the closing stage [12]

2.5.2. Longitud de la tubería

Como se menciona en repetidas ocasiones, es necesario que todas las tuberías tengan las mismas dimensiones. De la figura 20b es claro que un incremento en la longitud de la tubería retarda el inicio de la inyección. Como ya se dijo antes, esto se debe a que la onda de presión toma más tiempo para viajar a través de la tubería al inyector, (porque tiene que recorrer más espacio) donde obviamente demora el inicio del levantamiento de la aguja. La cantidad de combustible inyectada y la duración de la inyección se afectan ligeramente por cualquier cambio en la longitud nominal de la tubería. Por ejemplo, para longitudes de tuberías típicas la variación de la cantidad total de combustible inyectado siempre

es menor que el 2 %. Sin considerar el pequeño efecto en la cantidad de combustible inyectado, las longitudes de la tubería de inyección deberán ser iguales para todos los cilindros para mantener un nivel constante del inicio de la inyección respecto al PMS.

Figura 21. Presión de inyección afectada por la longitud del tubo



Fuente: Miralles de Imperial, J. Inyección y combustión motores Diesel. [17]

En la figura 21, se puede observar como varia el inicio y la duración de la inyección, ante un incremento del 20 % de la longitud normal de la tubería.

2.5.3. Diámetro de la tubería

-10° PMS +10°

La reducción del diámetro de la tubería de inyección conduce a incrementar las pérdidas de presión en la tubería. Como resultado, la onda de presión toma mas tiempo para alcanzar la presión de apertura del inyector y esto se refleja en la figura 20, donde se puede observar que se retrasa el inicio de la inyección y se reduce la duración de la inyección y la cantidad de combustible inyectado. Por ejemplo, una reducción del 10 % en el diámetro de la tubería produce un incremento al 4 % de la reducción de la cantidad total de combustible inyectado, demorando 0,6 ° AC en el inicio de la inyección.

2.5.4. Fuerza inicial en el inyector

La fuerza inicial en el inyector juega un papel importante en el proceso de inyección, porque esta fuerza determina el valor de la presión de apertura, donde esta definido por:

$$P_{apertura} = \frac{F_{res} - A_{sac} * P_{sac}}{A_{cam}} \quad (4)$$

Donde:

$P_{Apertura}$ = Presión de apertura del inyector

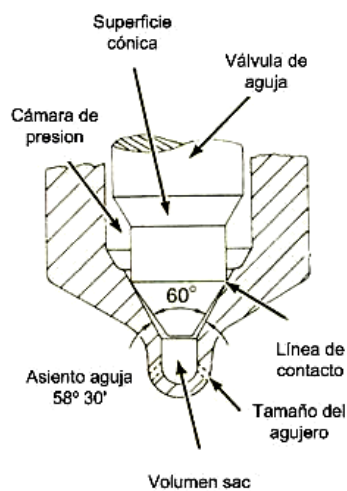
F_{res} = Precarga inicial de la aguja o fuerza del resorte

$A_{cam.}$ = Área de la cámara de presión

A_{sac} = Área de la válvula de aguja en el volumen sac ⁶.

P_{sac} = Presión en la cámara sac. Ver Figura 21.

Figura 22. Vista esquemática de un inyector de múltiples orificios.



Fuente: Erich J. Schulz, Diesel Mechanics [23].

⁶ El volumen sac, se define como el volumen comprendido entre la parte inferior de la aguja y los orificios de la tobera.

Un incremento en la fuerza inicial en la tobera conduce a incrementar la presión de apertura, demorando el inicio de la inyección (figura 20), adicionalmente, la aguja cerrará tempranamente reduciendo la cantidad total de combustible inyectado. La fuerza inicial del inyector es uno de los parámetros más importantes que afectan el inicio y la duración de la inyección. El cambio relativo en la cantidad de combustible inyectado como un resultado de la variación en la fuerza inicial es menos pronunciado comparado con otros parámetros (menos del 4%). Por ejemplo, si se incrementa en 10 % la magnitud de esta fuerza, ocasiona un retardo de 0,5° AC en el inicio de la inyección y reduce la duración de la misma en 0,75° AC.

2.5.5. Volumen de la cámara de inyección

Cualquier variación en el volumen de la cámara del inyector afecta principalmente el inicio de la inyección, entonces para volúmenes mayores el tiempo requerido por la amplitud de la onda de presión de apertura llega a ser mas largo. Por otro lado, el efecto del volumen de la cámara del inyector en la duración de la inyección y la cantidad de combustible inyectado llega a ser despreciable.

2.5.6. Área de la cámara de presión del inyector

Esta área determina la presión de apertura del inyector. El efecto en el comienzo de la inyección es significativo, un incremento en el área de la cámara del inyector adelanta el inicio de la inyección. Por ejemplo, un incremento del 10 % de área resulta en un adelanto de 0,4° AC del inicio de la inyección, un incremento en la duración de la inyección alrededor de 0,7 ° AC (figura 20) y un aumento de 4 a 5 % en la cantidad de combustible inyectado.

2.5.7. Diámetro del orificio de la tobera

El diámetro del orificio de la tobera controla extensamente las características de la atomización, influye en la presión de inyección pero no en la presión de apertura. Pequeñas variaciones en el diámetro de los orificios no afectan el inicio y la duración de la inyección ver figura 20, pero ejercen un fuerte efecto en la cantidad de combustible inyectado. Al reducir el diámetro del agujero, se reduce el área por donde el combustible pasa a la cámara de combustión, y como resultado menos cantidad de combustible puede pasar por el orificio en el mismo periodo de tiempo dado. De acuerdo a la figura 20c, un 10% de reducción del diámetro del orificio producirá un incremento casi equivalente en la cantidad total de combustible inyectado.

2.5.8. Diámetro de la aguja

El diámetro de la aguja, simultáneamente con el levantamiento de la aguja determina el área efectiva de flujo del inyector, que es el área anular a través de la cual el combustible fluye desde la cámara de presión hacia el volumen sac. Si el diámetro de la aguja se reduce, el área efectiva se incrementa y una mayor cantidad de combustible puede ser inyectada. Esto se demuestra en la figura 20, cualquier variación en el diámetro de la aguja puede tener un efecto muy significativo en la cantidad total de combustible inyectado. Por ejemplo, una reducción del diámetro de la aguja en un 5% ocasiona un incremento del 10% en la cantidad de combustible inyectado. Adicionalmente, el diámetro de la aguja determina el área superficial donde la fuerza del combustible presurizado en el volumen sac actúa esperando tener un pequeño efecto en la duración de la inyección.

3. METODOLOGÍAS PARA EL DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE INYECCIÓN EN NUESTRO MEDIO

El diagnóstico del sistema de inyección Diesel es muy análogo al diagnóstico de una enfermedad. Cuando vamos al médico por algún malestar o enfermedad, lo primero que nos preguntará será por los síntomas, después nos hará un diagnóstico preliminar con sus sentidos y sus equipos. En el diagnóstico del sistema de inyección es el técnico especializado quien interpreta y analiza los síntomas que presenta el sistema de inyección provenientes de diferentes fuentes: por el dueño del automotor, observados por el mismo técnico (diagnóstico preliminar) y los que arrojan las pruebas realizadas en los bancos de pruebas.

3.1. DIAGNÓSTICO PRELIMINAR

En esta sección se indican las metodologías más utilizadas en los talleres de mecánica Diesel corrientes y los especializados en inyección Diesel para el diagnóstico del sistema de inyección, todas tienen algo en común, el diagnóstico preliminar se hace basado en los sentidos humanos (oído, olfato, vista y tacto). Estos métodos son subjetivos y dependen de las habilidades y experiencia del técnico. Popularmente se conocen como “diagnóstico a ojímetro”.

Dependiendo del tipo de falla, dada inicialmente por el cliente, el técnico observará los humos de escape, teniendo en cuenta el color y la cantidad, verificándose la presencia o ausencia de ruidos extraños en el motor.

Se debe aclarar que el técnico no siempre sigue la misma secuencia ante los mismos síntomas que presente el motor, existen varios factores como la intuición, el

conocimiento del estado del sistema en revisiones anteriores, estadísticas personales de fallas de los componentes etc.

3.1.1. Síntomas del motor dados por el cliente

Las observaciones e inquietudes del cliente, dan el primer aporte al técnico, mediante la comunicación de los problemas o cambios observados en el desempeño del automotor. Los reclamos más frecuentes por parte del cliente son: pérdida de potencia, fallas en el encendido del motor, en funcionamiento se apaga con frecuencia, mayor consumo del combustible, etc.

3.1.2. Interpretación de ruidos

Consiste en la detección e interpretación por parte del técnico de ciertos ruidos que emite el motor cuando una falla o malfuncionamiento está presente. Esta técnica es muy subjetiva, depende de la experiencia y habilidad del técnico para diagnosticar con buena precisión el componente o el sistema que no funciona correctamente, incluso algunos técnicos tienen la capacidad de diagnosticar el tipo de falla que presenta el elemento.

En los motores Diesel el mecánico debe hallarse habituado a los sonidos que el motor emite para detectar con facilidad aquellos que pueden resultar anormales y que sirven de base a la posibilidad de una anomalía de funcionamiento o una avería próxima. Además de reconocer si un ruido es anómalo normal, conviene fijarse en algunas otras particularidades. La más importante es, por ejemplo, su ritmo o frecuencia. Hay que hacerse esta pregunta: ¿Se oye con el mismo ritmo que el giro del motor o a otro independiente? Si es el mismo, ¿se oye cada vuelta, cada dos vueltas, con cada combustión, al doble ritmo que el de las combustiones?

En algunos talleres se emplea un estetoscopio como se muestra en la figura 23, o con un palo, que al colocarse en el oído ejerce “la misma función”.

Figura 23. Diagnóstico de fallas por medio de un estetoscopio.



Los ruidos más comunes en un motor son: golpeteo en fase con la combustión de un cilindro, golpeteo de un cilindro a cada vuelta, golpeteo con el ritmo de las combustiones, ruido sincronizados con las emboladas y ruido en otros elementos.

El golpeteo de fase con la combustión de un cilindro se debe a que no se trabaja en las condiciones debidas, especialmente por causa de que su inyector este mal calibrado o averiado, o que el cilindro que golpetea lo hace porque esta sobrecargado en combustible dado por la bomba de inyección. Si el ruido es un silbido en la junta de la culata puede ser por fugas alrededor del portainyector o de la bujía de precalentamiento.

El golpeteo con el ritmo de las combustiones, es el más típico de los ruidos Diesel, es el particular “picado” que se produce en estos motores durante la combustión. Si resulta exagerado demuestra que la velocidad de combustión es excesiva y es casi seguro que la bomba inyectora inyecta antes de tiempo, presión de apertura baja de los inyectores o mala calidad del combustible.

3.1.3. Análisis de humos

Por medio de la observación de los humos que salen por el escape podemos tener una orientación bastante segura de lo que ocurre en el interior de la cámara de combustión y ello puede proporcionarnos una visión de una gran gama de averías posibles. Sin embargo, hay que aprender a leer en estos códigos de los humos, pues lo ojos han de poder apreciar con seguridad pequeños matices de color que solamente la practica puede determinar como en la figura 24.

Figura 24. Color de los humos de escape



Como se trata de una serie de síntomas fáciles de observar y de gran utilidad a la hora de buscar averías. Juan Miralles [14] presenta una descripción de cómo debe ser el color y la forma de interpretar los colores de humos y sus posibles causas.

Humos Blancos, indican la presencia de vapor de agua en el circuito de combustión, es normal en el arranque y unos pocos minutos después. Otras causas pueden ser un determinado punto de exceso de avance de la inyección o un regulador que tenga reducida su capacidad de reacción por roces o desgaste.

Humos Azulados, indican la presencia de aceite en la cámara de combustión.

Humos Negros, indican siempre una combustión que se desarrolla de una manera defectuosa por falta o exceso de combustible con relación al aire aspirado.

Humos negros a plena carga y especialmente a velocidades altas y bajas pero manteniendo siempre una potencia normal, son síntomas claros para dar a entender que el caudal de la bomba de inyección es demasiado grande con relación al aire aspirado. Hay que desmontar la bomba y pasar a su verificación a un taller especializado. En general hay que acudir a reducir el caudal de la bomba régimen máximo. Comprobar que el dispositivo de arranque funcione bien y vuelva a su posición inicial cuando el motor ya ha arrancado y el mando vuelve a su posición de reposo.

Humos negros a plena carga y especialmente a velocidades altas y bajas pero con la particularidad de que el motor se vuelve más silencioso de lo normal. Este síntoma se suele dar cuando se trata de que la inyección esta retrasada o bien cuando el dispositivo de avance trabaja mal. Bastan dos grados de error para que produzca este defecto. Humos negros a plena carga y especialmente a velocidades altas y bajas pero con la particularidad de que el motor se vuelve más ruidoso de lo normal. El mismo caso que el anterior pero al revés, es decir, se trata de un excesivo avance de la inyección. La solución es poner a punto la bomba de inyección.

Humos negros solamente a gran velocidad y a plena carga. Falta de aire solamente en las altas velocidades y plena carga, generalmente debido a demasiada suciedad en el filtro de admisión de aire.

Humos negros a plena carga y en especial a velocidades altas y medias con pérdidas de potencia en la mayoría de los casos. Este síntoma puede interpretarse como defectos

de los inyectores. Se debe revisar si los orificios de pulverización están parcialmente obstruidos. Los humos aumentan si se procura aumentar la potencia dando más caudal a la bomba de inyección.

Humos negros en la mayoría de las velocidades tendiendo a azul o blanco en el momento de arranque en frío. Este síntoma podría estar ocasionado por una mala colocación de los porta-inyectores. Podría darse el caso por ejemplo, de que el portainyector estuviera montado sobre varias arandelas sobre la culata cuando muchas veces no son necesarias; pero de cualquier modo la posición de estas arandelas puede cambiar la posición relativa del inyector y este puede lanzar su dardo sobre zonas deferentes de las correctas.

Humos negros a cargas y velocidades elevadas. Este síntoma se interpreta como un funcionamiento irregular del inyector y en especial del alzado de su aguja que puede ser demasiado grande, ya sea por su mal montaje o por su ajuste incorrecto.

Humos negros a plena carga y especialmente a velocidades medias y altas acompañado de falta de potencia. Este síntoma puede ser producido porque el diámetro de la tubería de inyección es insuficiente o por una mala instalación de la tubería, adoptando formas muy curvadas y con codos agudos.

Cuando la combustión no se realiza correctamente, los niveles de gases tóxicos (óxidos de nitrógeno, aldehídos, HC no quemados, óxidos de carbono, etc.) se incrementan produciendo irritación en los ojos y la nariz, problemas cutáneos y respiratorios.

3.1.4. La inspección visual

Es muy importante para el técnico, principalmente para él diagnóstico de problemas en la tubería de inyección por deterioro de esta, o por mal ajuste de los racores en los inyectores.

3.2. DIAGNÓSTICO UTILIZANDO BANCOS DE ENSAYOS

El diagnóstico de las bombas de inyección e inyectores son procedimientos que demandan mucho tiempo, empezando por que se requiere desmontar los elementos del motor e instalarlos en los respectivos bancos.

Diagnóstico de la bomba de inyección

La pérdida progresiva de potencia y el color de los humos le indican al técnico que la bomba de inyección puede estar fallando especialmente cuando se lleva mucho tiempo (8-16 meses) sin una revisión.

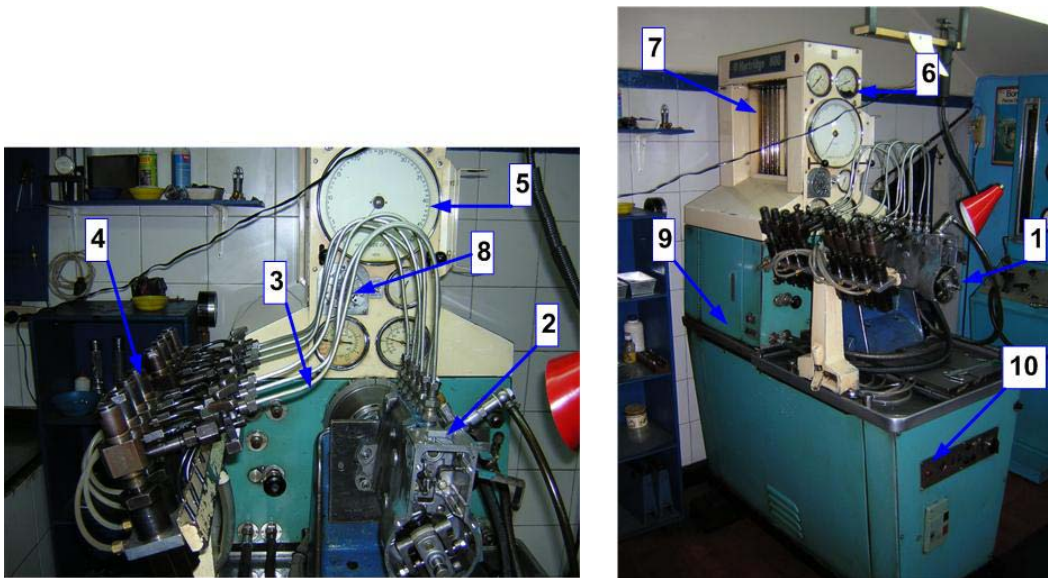
La bomba se baja del motor teniendo en cuenta algún tipo de referencia del punto de sincronización; el técnico gira el eje de la bomba manualmente para descartar atascamientos debido a piezas partidas o sueltas, si hay falla se procede inmediatamente al desmontaje de la bomba en busca de las piezas defectuosas que por lo general es el embolo-barril desgastado (bomba en línea) o el resorte del embolo partido (bomba rotativa). Después la bomba es llevada a un banco de pruebas (generalmente un Banco universal) en donde las condiciones de operación son simuladas, los rangos de caudal y presión de inyección son revisados para ver si se encuentran dentro de las especificaciones del fabricante.

Después de verificar el estado de la bomba de inyección en el banco, el técnico decide si es necesario hacer una inspección visual. La inspección visual consiste en

desarmar completamente la bomba, en busca de piezas dañadas, rayadas, desgastadas etc. Para la corrección o reemplazo de la pieza dañada por otra que este en buen estado.

Para documentar la metodología de diagnóstico de la bomba de inyección, se tomo como ejemplo el diagnóstico hecho a la bomba de inyección rotativa (Bosch VE) del motor KIA BESTA y el banco Hartridge 800.

Figura 25. Banco de Pruebas de bombas de Inyección Hartridge 800.

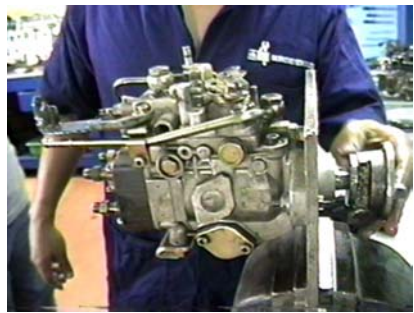


En la figura 25 se muestra las partes principales del banco de pruebas universal para bombas de inyección, marca Hartridge 800 (los más populares en nuestro medio). Las partes principales del banco son: Manguito de transmisión (1) donde se acopla el eje de la bomba (2), la tubería de inyección (3) que une la descarga de la bomba a los inyectores (4); el banco también tiene un medidor de velocidades (5), manómetros (6), probetas calibradas para medición del combustible entregado (7), marcador de emboladas (8), transmisión de velocidad graduable (9) y control (10).

A continuación se describe el proceso de diagnóstico.

1. Después de desmontar la bomba del motor, esta es llevada al taller y es colocada sobre una platina o soporte para facilitar su acoplamiento con el eje de salida del banco de pruebas, (figura 26a).
2. El técnico acopla la bomba en el cabezal del banco (figura 26b), asegurándose de configurar el sentido de giro del banco igual al requerido por la bomba de inyección.

Figura 26. Montaje de la bomba en el banco Hartridge 800



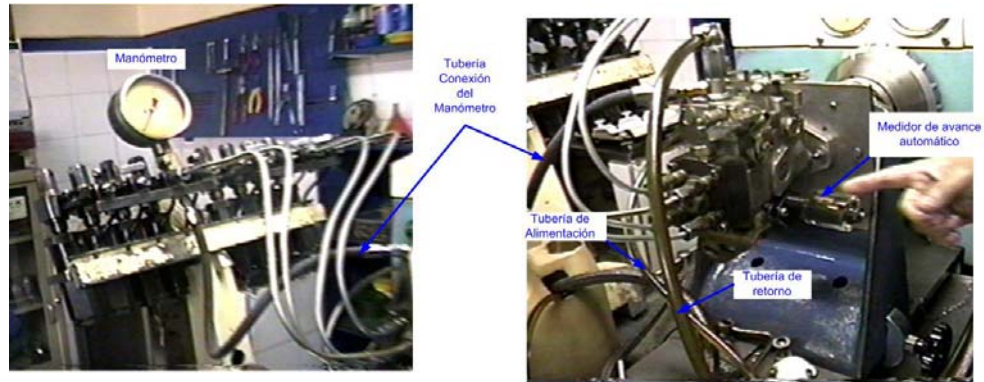
(a)



(b)

3. Se conectar las salidas de la bomba a los inyectores de prueba del banco, mediante un conjunto de tubos. Generalmente se utilizan inyectores de pruebas tarados a 175 atmósferas y tubos de inyección de 6mm de diámetro y 860 mm de longitud como se muestra en la figura 27.

Figura 27. Montaje de los elementos del banco en la bomba.



4. Se instala un adaptador adecuado en el lugar del tornillo de cierre del cabezal hidráulico (el que no lleva tornillo de purga) y un medidor de presión, capaz de registrar una presión máxima ligeramente superior a la presión máxima de transferencia, la cual estará definida en las especificaciones del fabricante.
5. Se conecta la unión de purga a una probeta graduada (Figura 28) y la llave de paso a la conexión de retorno del banco de pruebas.
6. Se conecta un medidor de avance automático (Figura 27b) en la tapa del muelle de la unidad de avance, en lugar del pequeño tornillo de sujeción y poner en cero la escala graduada del medidor.
7. Se aflojan los tornillos de tope de velocidad máxima y de ralentí, para dejar totalmente libre la palanca del acelerador.
8. Después del montaje de la bomba en el banco se puede iniciar el proceso de diagnóstico mediante las pruebas que se les pueden realizar en los bancos de inyección a las bombas, las cuales se describen de forma breve a continuación.

Prueba de vacío en la bomba de alimentación. Tiene por objeto mostrar la eficacia de la bomba de transferencia y la existencia de cualquier anomalía e su conexión de entrada. La prueba se realiza haciendo funcionar el banco de pruebas a 100 rpm y cerrando la válvula de suministro de combustible durante 60 segundos. Debido a que en esta prueba se crea una falta de combustible en el rotor, no debe sobrepasarse el tiempo especificado de prueba. Después de finalizar la misma debe purgarse de nuevo la bomba mediante el correspondiente purgador del cabezal hidráulico, mientras esta funcionando a 100 rpm.

Prueba de presión de la bomba de alimentación. Debido a que la presión de transferencia influye considerablemente en la entrega de combustible y controla el avance automático, es esencial que se mantenga dentro de las especificaciones a lo largo de las distintas velocidades de funcionamiento de la bomba. Debido a esto, es frecuente comprobar la presión de transferencia para tres o cuatro velocidades distintas.

Prueba de avance automático. La cuantía de avance de la inyección automático y el avance total, difieren para los diferentes tipos de bombas y se regula mediante dos factores: el cambio de la presión de transferencia y los muelles acoplados a la unidad de avance automático. Como en la prueba de presión de la bomba de transferencia, las lecturas se realizan para varias velocidades de la bomba. El ajuste se realiza tarando el muelle de avance automático, para cambiar su fuerza, que se opone a la presión de transferencia actuando sobre el pistón. Esta operación solo debe realizarse cuando se observe que el avance esta muy por encima o por debajo del especificado. Cuando se observa que la lectura es baja en un punto y alta en otro, es que existe un fallo mecánico.

Prueba de entrega de combustible máximo. El suministro máximo de una bomba de combustible viene especificado en la ficha técnica del fabricante. Este suministro se controla mediante el desplazamiento máximo del embolo y se regula por medio de la carrera del distribuidor (VE), por medio de la rotación parcial de las placas de ajuste (DPA) o por contrapesas (lineales). El procedimiento habitual es hacer funcionar la bomba al régimen especificado y medir las entregas en los inyectores de prueba durante 1000 inyecciones (emboladas). Hay muy poca variación entre los inyectores, ya que es el mismo elemento de bombeo el que suministra todas las salidas del cabezal hidráulico y las entregas deben estar dentro de los límites especificados. Antes de llevar a cabo las lecturas, debe dejarse reposar el aceite de prueba durante 15 segundos en las probetas medidoras y estos deben dejarse escurrir durante 30 segundos, antes de realizar una nueva prueba. Después de ajustar la entrega de combustible a la velocidad más alta de la bomba (especificada), generalmente se realiza un segundo control a una velocidad más baja. Si la entrega de combustible, en esta segunda prueba, es menor que la cifra especificada, esto indica una relación incorrecta entre la velocidad de la bomba y la presión de transferencia, o que esta última disminuye con la velocidad hasta un grado mayor de lo adecuado, la cantidad de combustible entregado en determinado número de emboladas se mide en las probetas calibradas que trae el banco de pruebas (figura 28).

Figura 28. Probetas graduadas para la medición de combustible



Prueba de fuga de retorno, esta prueba tiene por objeto establecer la cantidad de combustible que se fuga en el cabezal hidráulico y el rotor, pasando por los émbolos de bombeo y el avance automático, para determinar si esta dentro de los límites aceptables. Una fuga de retorno excesiva es síntoma de que los componentes están desgastados o que existe una fuga en la carcasa de la bomba; mientras que una fuga escasa indica que probablemente no hay suficiente combustible de paso por los componentes de bombeo para obtener una lubricación eficaz. Las especificaciones de esta prueba varían de unas a otras. La cantidad de fuga de retorno se mide generalmente para 100 emboladas y el procedimiento consiste en hacer girar la bomba al régimen especificado y utilizar la probeta graduada para medir a cantidad de combustible que fluye durante las 100 emboladas, desde la conexión de retorno.

Prueba de encendido. Es una prueba de entrega de combustible que se hace a menores revoluciones, generalmente a 100 rpm, se mide el combustible entregado por la bomba en 100 emboladas. Esta es la prueba mas importante, le indica al técnico si hay desgaste en los elementos bombeantes (émbolos o cabezal hidráulico), generalmente se detecta la falla porque la presión que ejerce la bomba esta por debajo del 60% de su capacidad normal.

Prueba de corte de combustible. Un factor muy importante que debe ser comprobado cuando se está probando una bomba es que el motor puede pararse mediante el control de cierre. Este mecanismo no sólo debe ser capaz de cortar el suministro con grandes entregas (para evitar que el motor se desboque), sino también para pequeños suministros. También el acelerador debe ser capaz de reducir la inyección hasta un punto capaz de parar el motor. Ambos pueden comprobarse haciendo funcionar la bomba a velocidades reducidas, con un control cerrado y el otro completamente abierto.

3.2.1. Diagnóstico de las líneas de inyección

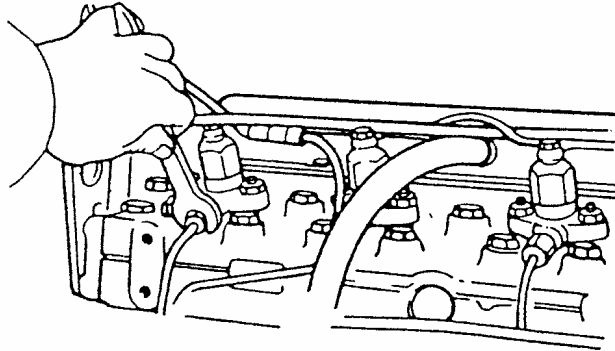
Las líneas de alta presión casi nunca fallan, su diagnóstico se realiza por inspección visual, ya que la falla más común es la soltura del racor del inyector (ocasionada por exceso de vibración del motor) y rompimiento por fatiga.

3.2.2. Diagnóstico del Inyector

Ante la pérdida de potencia, humos y ruidos extraños (golpeteo) lo primero que se revisa por lo general es el inyector debido principalmente a la observación del cliente, quien prefiere que falle el inyector antes que la bomba por los altos costos que implica la reparación de una bomba de inyección. Las cartillas de mecánica Diesel del sena [8], registra las fallas más comunes que presentan los inyectores.

Para localizar un inyector deficiente, con el motor a una velocidad mayor que la de ralentí, se aflojan los tubos de los inyectores por orden (figura 29). Con esto se corta el paso de combustible a ese inyector y, si este está bueno, habrá una caída considerable en la velocidad del motor. La velocidad no variará si ese inyector está deficiente. Popularmente se cambia solo el inyector defectuoso si lo hay, en los centros de servicio técnico se llevan todos los inyectores a un banco probador de inyectores.

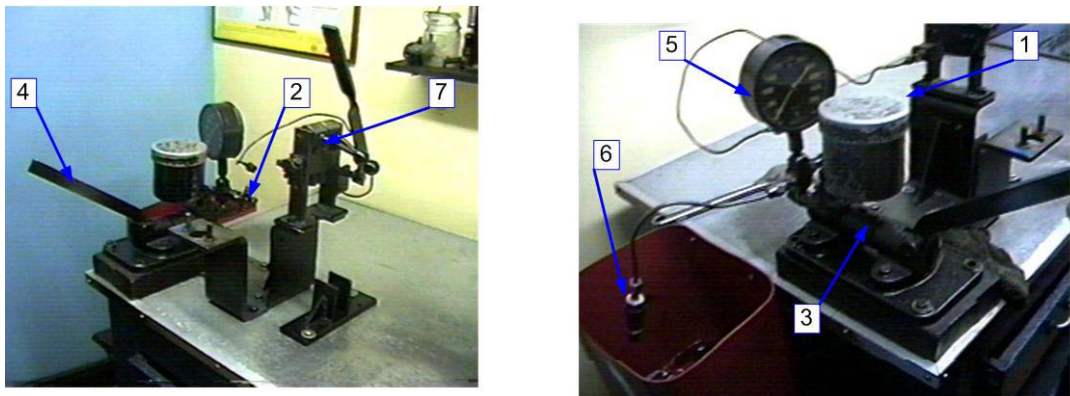
Figura 29. Procedimiento para detectar el inyector defectuoso



Fuente: May Ed. Mecánica para motores Diesel [15].

Para realizar el servicio a los inyectores se debe contar con los instrumentos apropiados, los cuales se encuentran en los talleres de inyección. Para las pruebas y ajustes, se conecta el inyector en el tubo del probador.

Figura 30. Probador de inyectores



El probador de inyectores (ver figura 30) consta básicamente de: un recipiente y filtro para combustible (1), válvula para aislar y proteger el manómetro, (2), una bomba de inyección (3), una palanca manual (4), un manómetro (5), tubo para adaptar el inyector a probar (6) y un aditamento especial para probar inyectores tipo cummnis PT.

Después del probador, los inyectores son desarmados y sometidos a una inspección visual para definir el paso a seguir (reparar o cambiar elementos).

A continuación se describirá los principales procedimientos realizados a los inyectores para su diagnóstico.

Prueba patrón de pulverización y atomización. Esta prueba consiste simplemente en una comprobación visual en la mayoría de los casos; el procedimiento habitual es instalar el inyector en el comprobador, antes de hacer la prueba se cierra la válvula de retención para aislar y proteger el manómetro, después, se acciona la palanca manual con rapidez varias veces para expulsar el aire del sistema. Se procede a bombear con la palanca a un ritmo de unos 60 golpes. Como norma de seguridad se debe apuntar la tobera lejos del operario cuando se acciona el probador, por ningún motivo el chorro de atomización debe llegar a las manos o el cuerpo, pues tienen gran fuerza de penetración y puede ocasionar lesiones serias. Si el inyector no atomiza el combustible completamente se hará una combustión incompleta, causando la aparición de humo negro, pérdida de potencia en el motor y consumo excesivo de combustible. También se hará evidente el golpeteo Diesel debido al mayor periodo de retardo que sigue a una escasa atomización. Una atomización escasa y una pulverización deformada tendrán lugar normalmente debido a que los agujeros de la tobera estén semibloqueados suponiendo que la presión de apertura sea correcta. En tal caso el inyector debe ser desmontado, para limpiar la tobera, volviendo a montar la unidad para probarla otra vez. En algunos casos, no es necesario desmontar el inyector, pues la limpieza de la boquilla se realiza con un cepillo de alambre de bronce, para quitar cualquier partícula de carbonilla existente. Después debe limpiarse el exterior del inyector con gasolina, y se seca con aire comprimido.

Finalizadas estas operaciones deberá volverse a comprobar el inyector para ver si el efecto de pulverización ha sido corregido.

Prueba de fuga de retorno. Esta prueba también es conocida como prueba de estanqueidad. El procedimiento que se acepta normalmente, cuando se esta comprobando un inyector en busca de fugas de retorno, es bombear con el comprobador hasta cerca de la presión de apertura, cerrando después la bomba de prueba si ello fuera posible. En estas condiciones, la presión que indique el comprobador disminuirá lentamente, debido a la fuga de combustible más allá de la válvula de agujas. La velocidad a la que disminuya a presión indica la holgura entre la válvula de aguja y el cuerpo de la boquilla. La mayoría de los fabricantes dan máximos y mínimos para el descenso de la presión para un determinado inyector. En la mayoría de talleres de inyección, se toma como parámetro un retardo 15 segundos para que la presión caiga 500 psi. Hay varios fallos que pueden producir los síntomas de una fuga de retorno excesiva destacándose la suciedad entre el cuerpo y el soporte de la tobera (dejando que salga combustible), un tapón de tobera flojo que deja pasar la fuga, conexiones de los conductos de combustibles flojas y altas temperaturas que hacen que sea menos denso el aceite de pruebas.

Prueba de fuga de retorno. Indica la cantidad de combustible que sale entre la varilla de la válvula de aguja y el cuerpo de la tobera. Debe existir una cierta fuga para lubricación, pero cuando se da una pérdida de combustible excesiva, la cantidad inyectada puede llegar a ser menos que la necesaria. Si el tiempo de bajada de la presión especificada es excesivo, indica que la holgura entre la válvula de agujas y el cuerpo de la tobera no es suficiente, con lo cual la tobera probablemente se agarrotará. Esta prueba indica si hay que reacondicionar o no la tobera. Cuando la holgura tobera-cuerpo es excesiva, no es posible la reparación, se

debe cambiar el conjunto aguja-tobera debido a que son piezas hermanadas (muy poca tolerancia entre sus superficies).

Prueba presión de apertura. Para realizar esta prueba, debe expulsarse el aire del aparato probador, ajustar el inyector al adaptador del mismo y hacer bajar la palanca de mando muy lentamente, observando al mismo tiempo la lectura de presión en el indicador, que irá en aumento progresivo hasta la apertura de la aguja del inyector, momento en el cual se produce una oscilación de la aguja indicadora, alcanzándose el valor mas alto de presión. Este valor de la presión es el correspondiente al inicio de la inyección (aunque la presión de inyección puede sobrepasar esta cantidad cuando el motor esta funcionando) y debe estar en concordancia con las especificaciones del fabricante. Si la presión de apertura esta por encima o por debajo de lo recomendado por el fabricante ocasionara las consecuencias ya vistas en la sección 2.1, y su corrección se realiza ajustando la tensión del muelle, ya sea por medio de tornillo tensor por galgas de ajuste.

De acuerdo a lo explicado anteriormente se puede observar que el proceso de diagnostico de la bomba e inyector es un proceso complejo que demanda la utilización de herramientas especializadas y costosas, además demanda mucho tiempo y dinero para el propietario del automotor.

Una alternativa es el diagnostico por técnicas no invasivas como las que se describen en el siguiente capítulo.

4. TÉCNICAS NO INVASIVAS PARA EL DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DIESEL

El autor dedicó gran parte de su tiempo investigando técnicas no invasivas para el diagnóstico del sistema de inyección en motores Diesel desarrolladas alrededor del mundo. Se consultó en las bases de datos de la Universidad Industrial de Santander (UIS), el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), Universidad de Michigan, Society Engineer Automotive (SAE), y en buscadores de Internet (como: Google, Virtual Library, infomine, C4, Excite y Altavista). A pesar de los grandes esfuerzos por obtener información de las diferentes técnicas desarrolladas, no fue posible obtener mayor información que la que se presenta a continuación.

4.1. ULTRASONIDO.

Esta técnica sirve para detectar fugas de combustible, basado en el principio físico, en el cual un fluido emite sonido cuando escapa de un recinto cerrado presurizado al ambiente. También mediante esta técnica se puede medir aproximadamente el flujo en las tuberías de inyección.

Implementar esta técnica resulta muy costoso y sola arroja una valoración cualitativa y aproximada de la posible causa de la falla o anomalía.

4.2. VIBRACIONES MECÁNICAS.

Consiste en adquirir la señal temporal y en frecuencia de vibración de la bomba de inyección para ser analizados con el apoyo de complejos modelos matemáticos.

Esta técnica presenta muchos problemas a la hora del diagnóstico debido a la identificación de las diferentes señales, por la superposición de señales provenientes de diferentes fuentes de vibración y ruido.

La técnica mediante vibraciones requiere avanzadas técnicas de tratamiento de señales, sumado a la complejidad de la interpretación de las señales, y sus altos costos hacen muy difícil la implementación de esta técnica en el diagnóstico de buses de transporte público.

4.3. ANÁLISIS DE LA PRESIÓN EN LA TUBERÍA DE INYECCIÓN.

La técnica consiste en determinar y analizar la presión de inyección del motor, ubicando un sensor de presión en la tubería de inyección, tipo abrazadera basados en el efecto piezoeléctrico. Este tipo de sensores tienen la ventaja de que pueden instalarse y desmontarse rápidamente, lo que representa una solución más económica, sobre todo cuando se pretende diagnosticar varios motores. No obstante, producen más ruido, desfase entre la señal obtenida y la real así como una mayor atenuación. Esta técnica fue desarrollada y patentada por la casa AVL de Alemania.

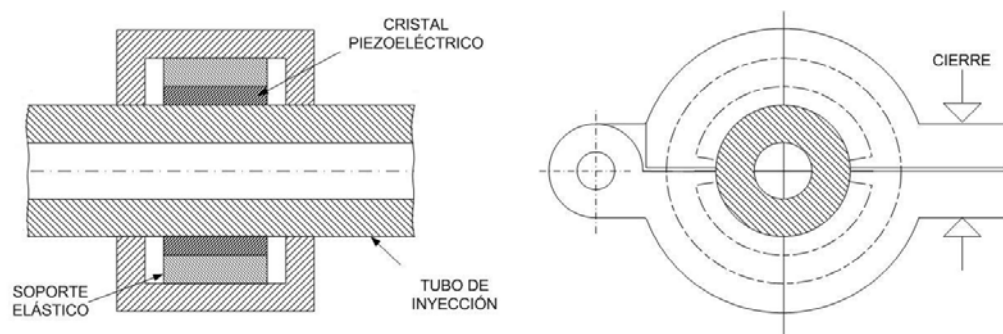
Esta fue la técnica desarrollada, ya que nuestro objetivo es realizar una técnica que permita diagnosticar en poco tiempo y abajo costo el estado del sistema de inyección.

5. DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA IMPLEMENTADA

Como se mencionó en la sección 4,3, la técnica consiste en diagnosticar el estado del sistema de inyección (conjunto bomba, tubería e inyector) mediante la adquisición y evaluación de la respuesta dinámica de la presión de inyección mediante un sensor de presión ubicado en la tubería de inyección o alta presión de cada uno de los cilindros del motor, el cual detecta la deformación de la tubería al pasa de la onda de presión.

Con esta técnica se puede determinar de forma no invasiva (motor en marcha) los siguientes parámetros: Presión máxima de inyección, presión residual, velocidad de Ralentí y el ángulo de avance de la inyección (AAI), véase figuras 15 y 16. Para calcular el AAI por definición se requiere el PMS como referencia, el cual se obtuvo con un sensor de efecto Hall.⁷

Figura 31. Sensores de presión de medida indirecta tipo abrazadera.



Fuente: Macian V, Mantenimiento de motores de combustión Interna Alternativos [13]

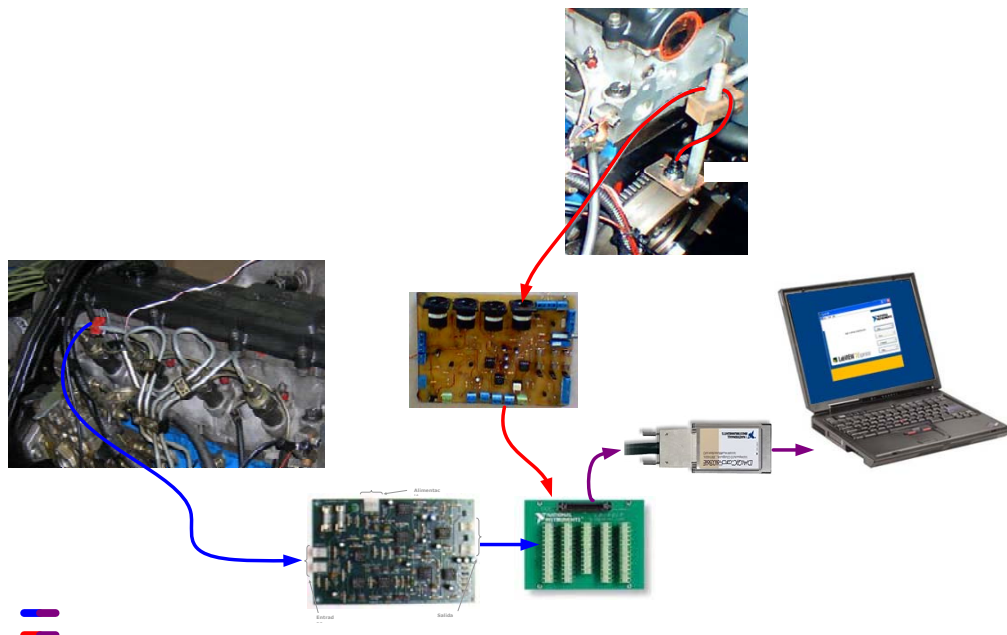
⁷ En la técnica se dejó abierta la posibilidad de trabajar con un sensor fotoeléctrico.

5.1. CADENA DE MEDICIÓN IMPLEMENTADA

El desarrollo de la técnica necesita dos señales, presión de inyección adquirida con el sensor piezoeléctrico en las líneas de inyección y PMS adquirido con el sensor de efecto Hall montado en el volante del cigüeñal. A continuación se describe la cadena de medición empleada.

Considerando la figura 32, para adquirir la señal se cuenta con un sensor de presión piezoeléctrico tipo abrazadera KG60 de AVL (ver figura 31) instalado en la tubería de alta presión, esta señal es muy débil y necesita una etapa posterior de acondicionamiento. En el capítulo 6, se describe el hardware utilizado en la cadena de medición.

Figura 32. Cadena de Medición (Presión y PMS).



La señal se lleva por medio de un cable monofónico con pinza en derivación a tierra, hacia la tarjeta de acondicionamiento donde la señal es amplificada y filtrada pasando al bloque conector el cual realiza la conexión con la tarjeta de adquisición Nacional Instrument de 16 canales tipo PCMCIA instalada dentro del computador portátil⁸ donde se digitaliza la señal a una tasa de muestreo y escritura definidas por el usuario (Para esta técnica se recomiendan 10,000 muestras/seg). La señal en el computador es tomada por el software desarrollado en labview 7.0 para realizar los tratamientos correspondientes, cálculos, y visualización por parte del usuario.

La mayoría de los motores tienen dos muescas en la polea del cigüeñal (damper) una fija y otra móvil. Cuando estas muescas coinciden el pistón del primer cilindro llega a su posición punto muerto superior (PMS). En base a lo anterior, el automotor de prueba se mueve hacia delante o hacia atrás de tal forma que cuando coinciden las dos muescas, un imán es pegado en cualquier parte de la polea. El sensor Hall se ubica a unos 5 mm del imán para capturar el pulso generado por el paso del imán que a su vez corresponde al instante de llegada del PMS del primer cilindro.

La señal del sensor Hall esta lista entonces para ingresar a la cadena de medición como se muestra en la figura 32.

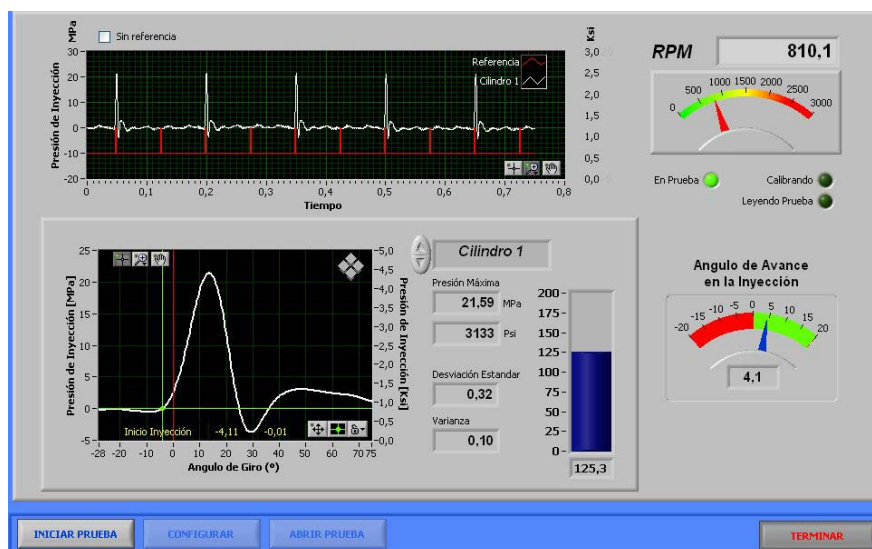
El software se desarrollo en Labview 7.0, y se tuvo como visión que el software presentará una interfaz amigable al usuario como se observa en la figura 33, para que los resultados pudieran ser interpretados por técnicos de educación media.

⁸Para un buen funcionamiento se requiere mínimo 256 MB de Ram.

5.2. PANEL FRONTAL

En la interfase o panel frontal, se indica la presión máxima, el ángulo de avance (AAI), la velocidad angular (RPM) del motor en ralentí y el porcentaje de desviación de la presión en cada cilindro respecto a una previa calibración, por ejemplo a un motor nuevo, donde es confiable los valores adquiridos para ser usados como parámetros de referencia en motores usados. En el capítulo 7 se da una descripción general del software.

Figura 33. Panel frontal de la técnica implementada.



En el anexo A, se analiza por parte del autor la viabilidad económica de la implementación de esta técnica en nuestro medio, mostrando los beneficios económicos para la empresa transportadora y el propietario del automotor.

6. DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE

En este capítulo se muestran de forma detallada los componentes utilizados en la cadena de medición implementada en este trabajo.

6.1. SENSOR DE PRESIÓN

El único sensor que existe para desarrollar esta técnica es el sensor piezoeléctrico tipo abrazadera, modelo KG60, fabricado por AVL DITEST (ver figura 34). Estos sensores se sujetarán a la línea de alta presión y gracias a su propiedad piezoeléctrica arrojan un diferencial de voltaje proporcional a la deformación del tubo producto del incremento de la presión en el instante de la inyección.

Figura 34. Sensor Piezoeléctrico KG60



En la tabla 1, se muestran los datos técnicos de los sensores piezoeléctricos tipo abrazadera KG60⁹.

⁹ Se insistió en numerosas ocasiones a la empresa AVL Austria, con el fin de obtener mas información acerca del sensor pero no se tuvo éxito.

Tabla 1. Datos Técnicos de los Sensores de presión a utilizar

Diámetro de la Línea	4.4 ... 4.7 mm; 5.9 ... 6.35 mm
Rango de Presión:	0 ... 3000 bar
Sensibilidad:	0.43 ... 0.55 pC / bar
Compensación de señal de interferencia:	0... 10 kHz (Línea doblada)
Temperatura de Operación:	20 ... 70 °C

Para la implementación de esta técnica se cuenta con dos tamaños de sensores, unos para líneas de 5,9 mm de diámetro y otros para 6,35 mm. La selección de los tamaños de los sensores se basó en los diámetros de tuberías más populares en nuestro medio.

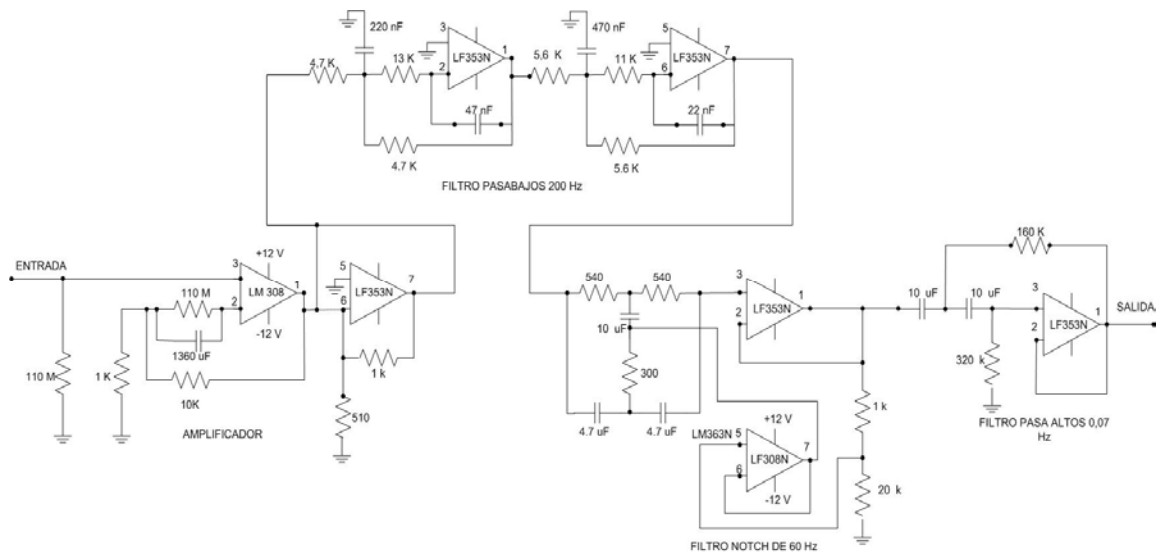
6.2. TARJETA DE ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES PIEZOELÉCTRICOS.

Para acondicionar señales de presión de baja frecuencia como son las señales de los sensores de presión de las líneas de inyección KG60 de AVL se requiere de un amplificador operacional configurado como amplificador de carga para extender la respuesta en bajas frecuencias. Usando los valores de los componentes del modulo de acondicionamiento de los sensores piezoeléctricos de presión este circuito de carga puede extender la respuesta en bajas frecuencias a 0.05Hz. El pin negativo del sensor es conectado al amplificador de carga y el pin positivo es conectado a tierra. Esto es debido a que el amplificador de carga invierte la señal.

Existen dos formas para realizar buffers y amplificar la carga de salida del transductor de presión. Ambas requieren de un amplificador con una alta impedancia de entrada y proporcione bajos voltajes y corrientes de ruido. La

amplificación del circuito de la figura 35 depende principalmente de la conservación de la carga en la entrada inversora del amplificador

Figura 35. Circuito de acondicionamiento sensores piezoeléctricos KG60



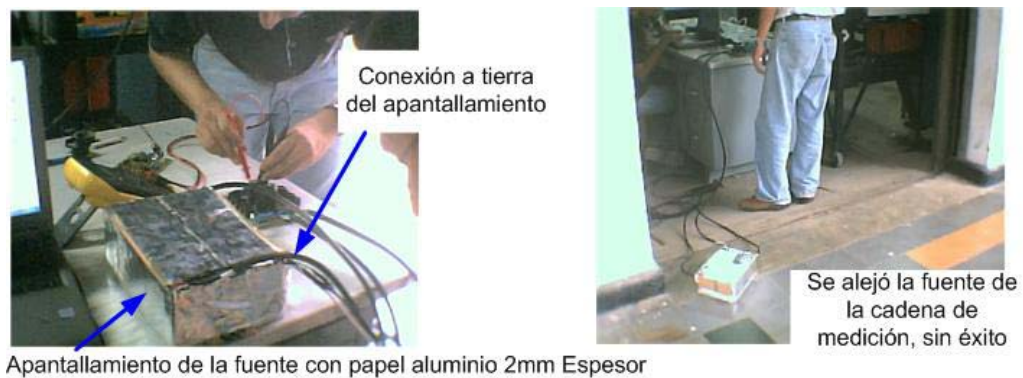
La tarjeta de acondicionamiento de la señal de presión opera a $\pm 12V$, y consta de dos canales de acondicionamiento de señal los cuales constan de un amplificador piezoeléctrico, un filtro pasa-bajo de 200Hz, un filtro banda de rechazo de 60 Hz, un filtro pasa-alto de 0,07 Hz y finalmente un amplificador adicional cada uno.

Durante las pruebas preliminares en el laboratorio se presentaron muchas dificultades a la hora de encontrar el circuito de acondicionamiento que se acomodara mejor a esta aplicación, la interferencia por ruido de baja frecuencia

que enmascaraba la señal, en principio se intentó eliminar esto mediante apantallamiento¹⁰ de la fuente como se muestra en la figura 36, sin tener éxito

Después de un análisis exhaustivo se llegó a la conclusión que el problema era originado por los integrados LF 353N en la zona de amplificación el cual le introducía voltaje de ruido, se cambió por el integrado LM 308 con lo cual se solucionó el problema.

Figura 36. Apantallamiento de la fuente



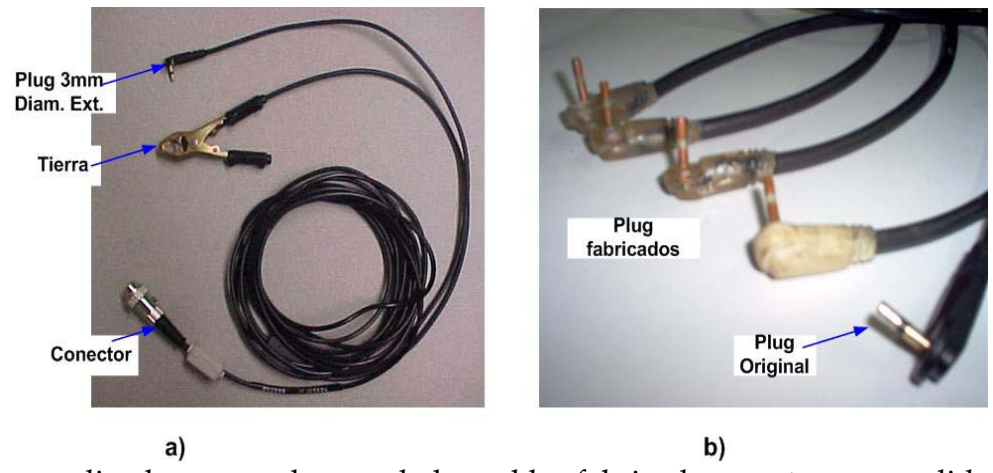
6.3. CABLES DEL SENSOR PIEZOELÉCTRICO

Para transportar la señal desde el sensor hasta la tarjeta de acondicionamiento se utiliza un cable monofónico de 4m de longitud con derivación a tierra, como se muestra en la figura 37a.

¹⁰ El apantallamiento consiste en una partición metálica (papel aluminio) colocada entre dos regiones de l espacio, usada para controlar la propagación de campos eléctricos y magnéticos de una región a otra.

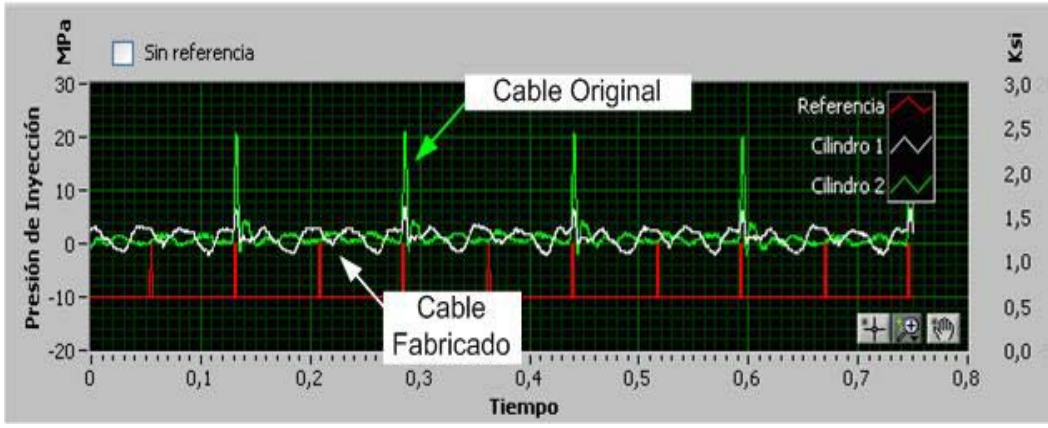
En el proceso de importación de los cables 4 de ellos fueron dañados, para sustituirlos, el autor decidió fabricar en el taller industrial de la escuela de Ingeniería Mecánica UIS. El plug, de 3mm de diámetro externo, tuvo que ser fabricado en alambre de cobre calibre 14, como lo muestra la figura 37b, por no ser de tamaño comercial (2,5 y 3,5 mm).

Figura 37. Cables del sensor de presión



Pruebas realizadas con cada uno de los cables fabricados mostraron pérdida de la señal e interferencia respecto al cable original como se muestra en la figura 38.

Figura 38. Comparación de cables Fabricados vs. Original



De la figura 38 es claro, que los cables fabricados no sirven para esta aplicación, por lo cual, solo se trabajó con los cables originales.

6.4. SENSOR DE VELOCIDAD DE EFECTO HALL.

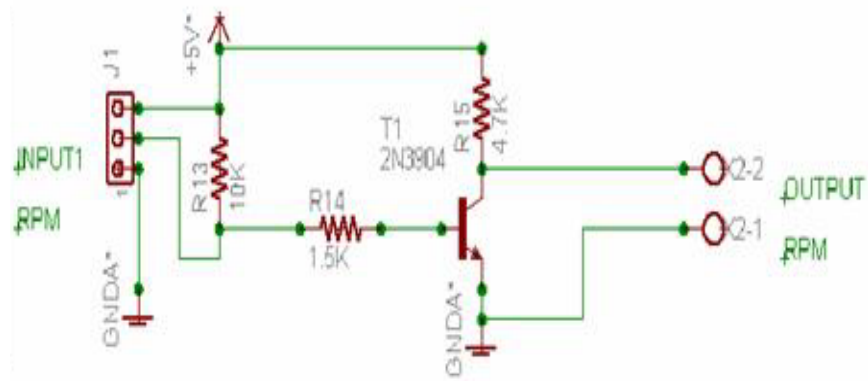
El sensor utilizado es el modelo GS100, marca Cherry. Este sensor se escogió por sus características y economía.

6.4.1. Descripción y acondicionamiento del sensor Hall

El voltaje de salida del sensor GS1001 es proporcional al campo magnético aplicado perpendicularmente al encapsulado¹¹. El sensor combina una celda Hall integrada y un circuito de amplificación y acondicionamiento para minimizar derivas de temperatura asociadas con la celda Hall. La arquitectura del sensor permite suficiente versatilidad para aplicaciones de medición de velocidad angular con un mínimo de componentes asociados. El sensor esta diseñado para trabajar desde 4.5Vdc hasta 24Vdc. Este sensor esta especialmente diseñado para ambientes hostiles como los encontrados en aplicaciones automotrices, posee capacidades de alta rapidez de conmutación y es inmune a descargas electrostáticas, transitorios eléctricos. Su salida de voltaje es totalmente digital entre 0 y el voltaje de alimentación. Se requiere de una resistencia de carga entre el voltaje de alimentación y la salida para mantener un nivel por defecto para su funcionamiento óptimo. La figura 40 muestra el diagrama de bloques del sensor y sus pines de conexión para ser acoplado al volante colocando un imán en el PMS del mismo. La distancia máxima para detectar el paso por el imán es de 10 mm.

¹¹ Holman, [6] Pág. 85. Explica de una forma clara el principio físico del sensor Hall

Figura 39. Acondicionamiento de sensor de efecto Hall GS1001



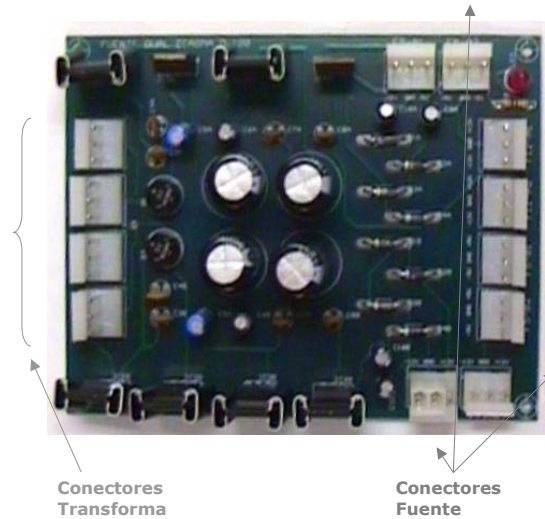
6.4.2. Características Técnicas del sensor

Las características técnicas de este sensor se encuentran en el anexo B.

6.5. FUENTE

La fuente dual DIAGMA D-100(ver figura 40) opera a 110V, tensión que es reducida por un transformador de dos devanados con tap central, a niveles de tensión de $\pm 15V$, (niveles requeridos por los reguladores de voltaje). Las señales rectificadas (rectificación de onda completa con rectificación con puente de diodos), se acoplan a través de un par de condensadores que actúan como filtro pasabajos (con el fin de minimizar el rizado) a los respectivos reguladores: LM7812, LM7912, LM7805 y LM7905. Además se emplean condensadores para el desacople de alta frecuencia y permiten mantener los niveles a la salida de los reguladores.

Figura 40. Fuente Diagma D-100



La fuente dual DIAGMA D-100 debe conectarse a 110 VAC únicamente para el funcionamiento adecuado del equipo. Al conectar la fuente dual DIAGMA D-100 se activa de inmediato el led indicador de encendido.

6.6. BLOQUE CONECTOR

El bloque conector sirve de puente entre las tarjetas diseñadas por el grupo de investigación (GIEMA) y la tarjeta de adquisición. En la metodología desarrollada se utilizó la referencia CR-68 LP de la National Instrument, ver figura 41a, se seleccionó este bloque por ser el que más se ajustaba a los requerimientos del proyecto DIAGMA D-100. Este bloque posee 68 terminales, de los cuales tiene 16 canales análogos, 16 digitales y 2 contadores.

Figura 41. Bloque conector y tarjeta de adquisición.



Los canales utilizados en esta técnica son los mostrados en la tabla 2. Si por ejemplo queremos habilitar el canal 1 en el software, conectamos la señal de presión en el terminal N° 30 y tierra en el N° 29.

Tabla 2. Especificación de los canales a utilizar en el bloque conector.

Canal Físico	Canal Software	Conexión Señal	Tierra	Parámetro
Canal 11	Canal 0	63	29	PMS
Canal 3	Canal 1	30	29	Presión 1
Canal 4	Canal 2	28	34	Presión 2
Canal 10	Canal 3	31	64	Presión 3
Canal 13	Canal 4	26	59	Presión 4
Canal 14	Canal 5	58	24	Presión 5
Canal 15	Canal 6	23	56	Presión 6

6.7. TARJETA DE ADQUISICIÓN

Las tarjetas de adquisición de datos se conectan directamente a los buses del PC y permiten adquirir y procesar datos en tiempo real. Normalmente una tarjeta de adquisición de datos tan solo aporta los bloques de encaminamiento de la señal, así como la medida de esta (con posibilidad de amplificación), las funciones de cálculo, memoria y visualización las tiene que realizar la interfaz grafica a la cual esté conectada la tarjeta. Una ventaja importante en las tarjetas de adquisición de datos es que se evita la duplicidad de diferentes bloques en el instrumento y en el PC, como pueden ser memoria o funciones de cálculo. También es importante la facilidad de instalación, de puesta en marcha y su flexibilidad de uso en muchas aplicaciones industriales, y automotrices.

La forma de conexión de la tarjeta al computador puede ser: Bus ISA., Bus PCI, conector PC104 y el Conector PCMCIA. Se seleccionó el Conector PCMCIA por dos razones, la transmisión de datos es mucho más rápida que por el puerto paralelo y es especial para usar con computadores

Para el desarrollo de esta técnica se hace necesaria la adquisición de dos señales analógicas, correspondientes al sensor piezoeléctrico y el sensor de efecto hall, por lo que la tarjeta de adquisición debe poseer como mínimo 2 canales analógicos. Debido a que la técnica hace parte del proyecto Diagma D100, y se realiza junto a otras técnicas de diagnóstico, se desarrollo con la tarjeta DAQ-CARD 6036E de la Nacional Instrument. Mostrada en la figura 41b. Esta tarjeta tiene 16 canales para señales analógicas y 16 canales para señales digitales.

7. SOFTWARE

El análisis de las señales adquiridas por el sensor de presión y el de PMS, se realiza mediante un programa de adquisición de datos en tiempo real. El software utilizado fue Labview 7.0 de National Instrument debido a las comodidades que ofrece en a la hora de adquirir, manipular, y presentar señales.

7.1. GENERALIDADES DE LABVIEW

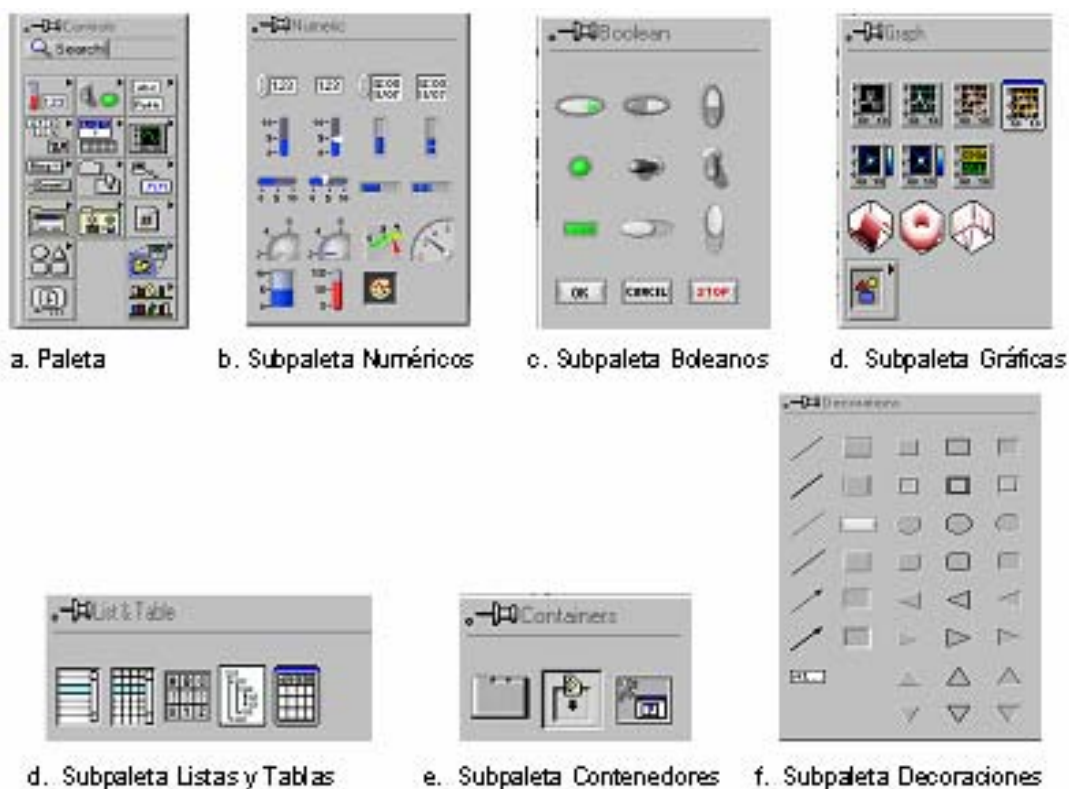
LabView es un lenguaje de programación de alto nivel, de tipo gráfico. Es una plataforma para la adquisición, monitoreo y control de procesos industriales y su uso esta muy difundido en la industria. LabView posee una gran variedad de estructuras que le permiten al programador diferentes opciones principalmente en el área de la instrumentación, sin embargo también es usado para elaborar cualquier algoritmo que se desee, en cualquier aplicación, como en análisis, telemática, juegos, manejo de textos, etc.

Cada programa realizado en LabView es llamado Instrumento Virtual (VI), y cada subprograma se denomina subVI. Para programar en labVIEW se trabaja con dos ventanas: Una en la que se implementa el panel frontal y otra que soporta el nivel de programación (diagrama de bloques o ventana de programación).

Para la creación del panel frontal se dispone de una librería o paleta de controles e indicadores de todo tipo (Ver figura 42). Los controles permiten que el usuario modifique su valor o estado mientras que los indicadores reciben los datos o condición de estado del diagrama de bloques. Estos controles e indicadores son

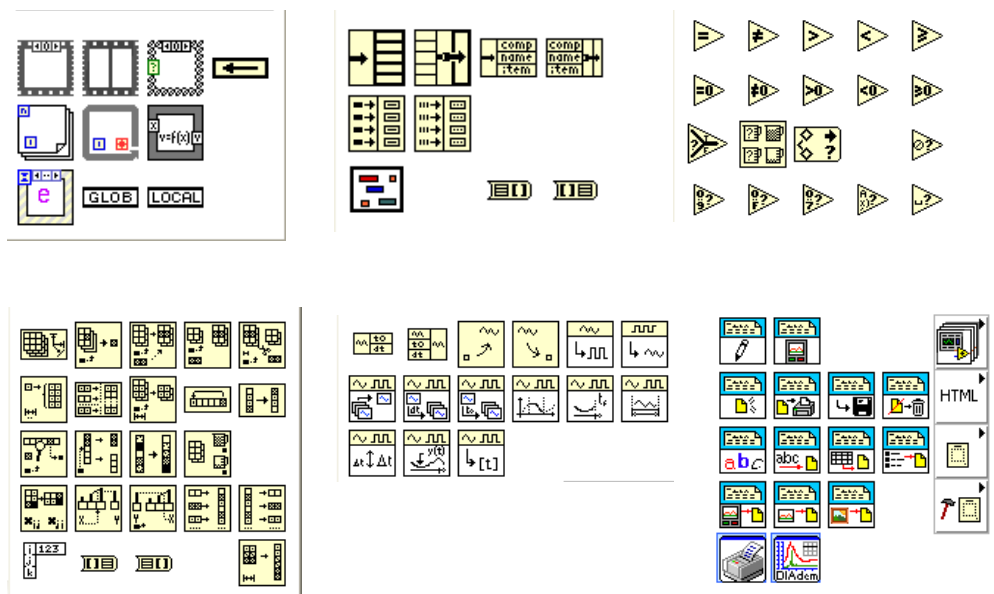
elementos que con su forma y color representan cada componente, señal o función del proceso real en su respectivo estado.

Figura 42. Paletas de controles e indicadores en el panel frontal



Cuando un control es “pegado” desde la librería en el panel frontal aparece un terminal en la ventana de programación representándola. El nivel de programación del VI consiste en conectar estos terminales a bloques funcionales hasta obtener un resultado que se desee visualizar. Los bloques funcionales son iconos con entradas y salidas que se conectan entre si mediante cables ficticios por donde fluyen los datos, constituyendo el nivel de programación del VI. En la figura 43 se muestran algunos de los bloques funcionales empleados.

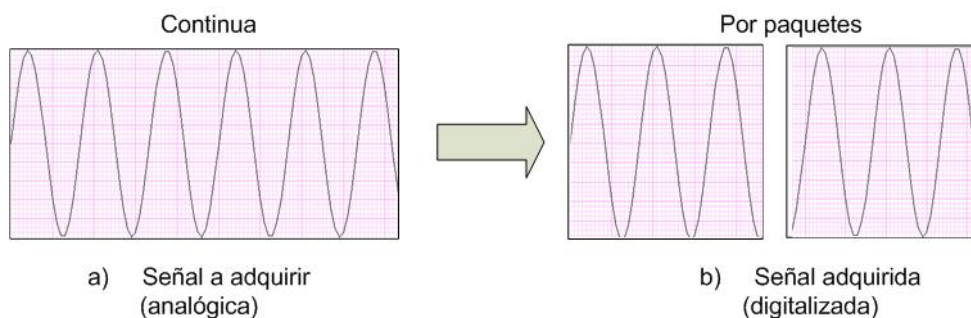
Figura 43. Bloques funcionales de la ventana de programación



Antes de continuar, se debe aclarar que labview recibe la información de la tarjeta PCMCIA por paquetes tal como lo muestra la figura 44, los datos contenidos en este paquete están determinados por la rata de muestreo a la cual se haga la adquisición.

a) Estructuras

Figura 44. Digitalización de una señal senoidal



La rata de muestreo nos indica cada cuanto tiempo se debe tomar la información de la señal y el número de muestras nos da el tamaño del paquete que va a llegar al

d) Vectores

b) C

e)

PC. Este paquete de datos Labview lo toma como una “*waveform*” (wf). Una wf es un cluster que contiene, un vector de datos por cada señal, que es el tiempo en el que se comenzó a tomar los datos y el tiempo dt (ms), que hay entre cada dato del vector tomado, con estos dos últimos se puede relacionar los elementos del vector con el tiempo en el que se tomó el dato.

7.2. CÁLCULO DE PRESIÓN MÁXIMA

La presión máxima de inyección se refiere a la amplitud máxima del pulso de presión detectado por el sensor piezoeléctrico instalado en la tubería de inyección. Para calcular los valores de la presión máxima se le debe primero eliminar la etapa transitoria a la wf de presión, para luego proceder a buscar dentro de la señal la ubicación de los pulsos de presión y dentro de estos encontrar el valor máximo con una función incorporada en labview.

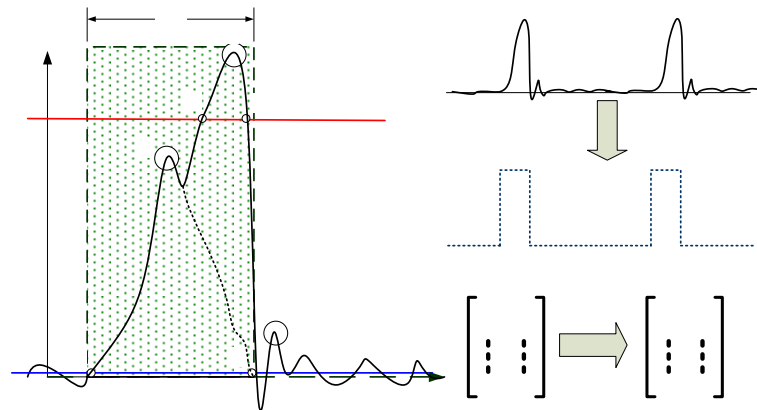
Después de determinar la presión máxima de cada pulso, su amplitud es guardada para ser promediada con los valores de los otros pulsos del mismo paquete, para finalmente sacar el promedio entre los valores medios de cada paquete, este es el valor que arroja y guarda el software al terminar la prueba.

Para encontrar los pulsos de presión correspondientes a los ciclos de inyección dentro de la wf, fue necesario crear un subVI para que hiciera este trabajo, el *detector de pulsos* (ver diagrama de flujo Anexo B).

Un pulso se refiere a la porción de la wf que pasa por encima del límite inferior, del superior y cae por debajo del límite inferior, es decir realiza el recorrido AFD como muestra la figura 45. Si no se alcanza a pasar el límite superior tal como en

AED, no se contara como pico. Este subVI devuelve los índices de la wf donde este el inicio del pico (x) y la amplitud del pico (y).

Figura 45. Reconocimiento de pulsos de presión



Para la detección del inicio del pulso y su amplitud, inicialmente se probaron varios algoritmos, todos utilizando límites fijos como entrada a al Sub VI detector de pulsos. Estos algoritmos fallaban ante cualquier perturbación de offset o ruido de baja frecuencia, por lo cual se tuvo que recurrir a métodos más avanzados de tratamiento de señales para la detección del inicio del pulso.

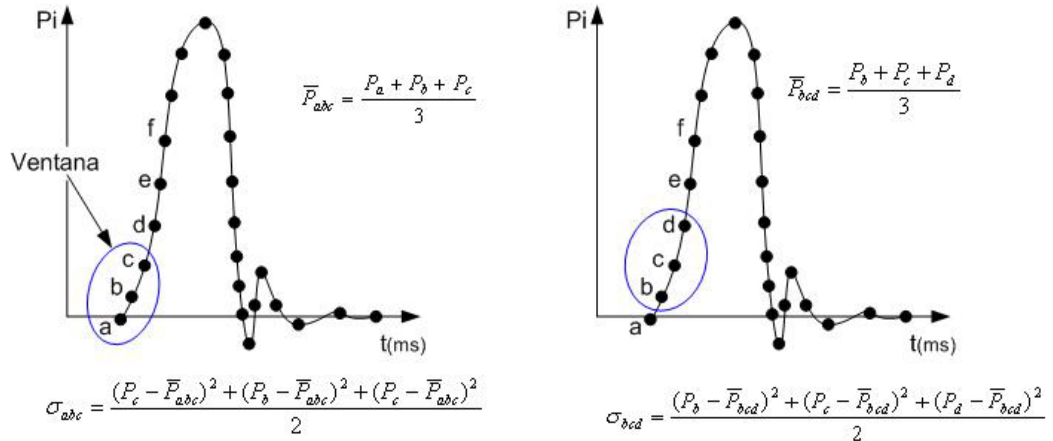
El algoritmo final se basa en un sistema de tratamiento de señales denominado **filtro por puntos**. El filtro por puntos consiste en tomar un determinado grupo de datos consecutivos y analizarlos como si se tratara de una *ventana*, dicha ventana se va corriendo a través de la wf capturada como se muestra en la figura 46 donde se ilustra el proceso para un filtrado de 3 puntos.

A

D

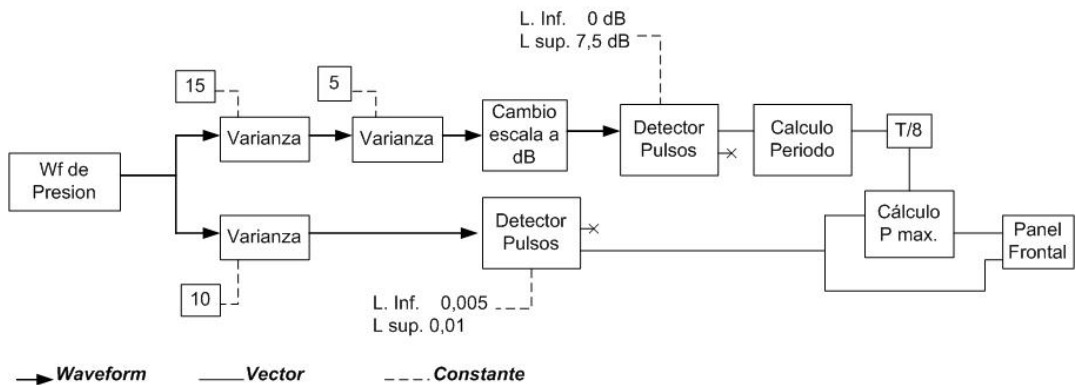
X_i

Figura 46. Proceso de Filtrado por puntos



Sean a, b, c, d, e, f..., puntos pertenecientes a la wf de la figura 46. El primer paso es definir el ancho de la ventana o tamaño de la población (en este caso el ancho es igual a 3 muestras). Los puntos o muestras incluidas en la ventana se toman como la población para realizarle el proceso estadístico de la media y la varianza, es decir, se saca la varianza a la presión evaluadas en a, b y c, después la ventana avanza una muestra para definir una nueva población, b, c y d. El proceso se repite y la ventana sigue realizando su trabajo hasta recorrer toda la wf. Finalmente los valores de la wf son graficados respecto al tiempo.

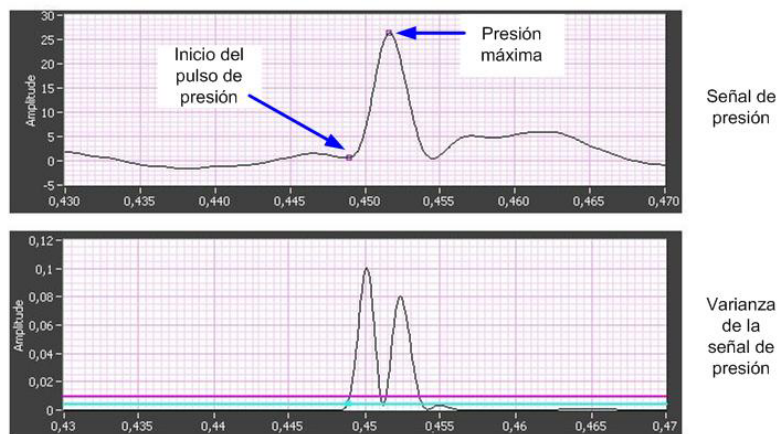
Figura 47. SubVI para detectar inicio y amplitud del pulso de presión



El algoritmo para la detección del inicio y amplitud del pulso de presión, así como su periodo se basa en la configuración mostrada en la figura 47¹². El subVI se divide en dos ramas, en la inferior se calcula el inicio del pulso con gran exactitud. La rama superior determina el periodo de la señal y también calcula el inicio del pulso pero con poca exactitud.

En la rama inferior, a la Wf de presión se le saca la varianza con un filtro de 10 puntos dando como resultado una determinación muy satisfactoria del inicio del pulso después de aplicarle el SubVI detector de pulsos con límites de 0,005 (línea roja) y 0,01 (línea verde) como se muestra en la figura 48. Nótese que al sacar la varianza a la señal la amplitud disminuye casi a cero en todos los puntos excepto en el pulso de presión, y el inicio del pulso se calcula con gran precisión

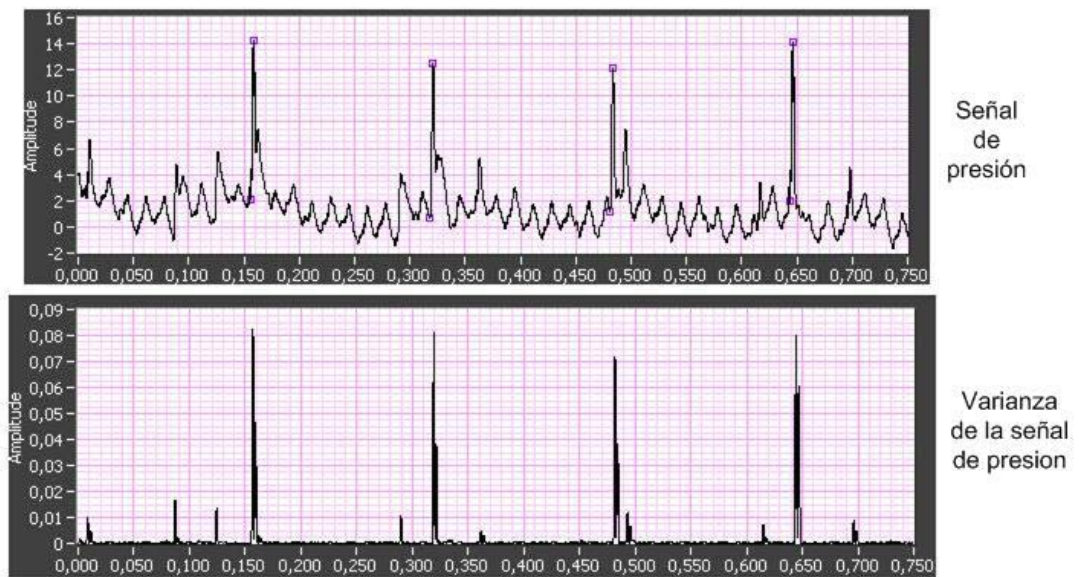
Figura 48. Varianza de la señal de presión



¹² Todas las constantes que se muestran en esta figura fueron encontradas experimentalmente en las diferentes pruebas realizadas en el laboratorio.

La determinación del inicio del pulso con la varianza presenta problemas ante interferencias de baja frecuencia, manifestándose en el reconocimiento de pulsos que no son de la señal de presión como se observa en la figura 49.

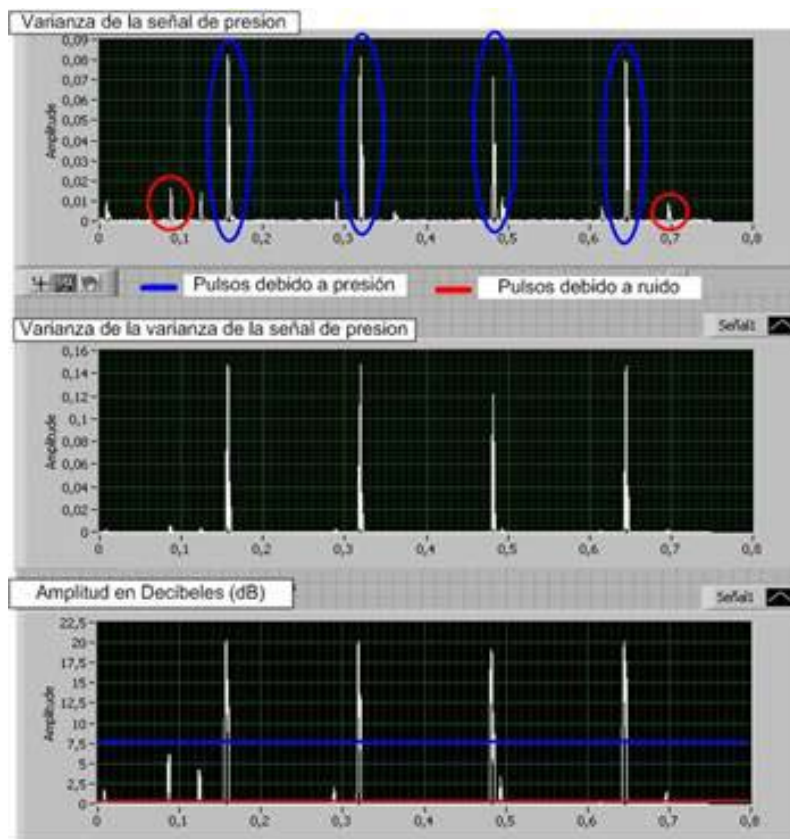
Figura 49. Reconocimiento de pulsos con varianza y detector de pulsos



Para solucionar el problema anterior, a la señal de presión se le saca nuevamente la varianza pero ahora con un filtro de 15 puntos y a esta a su vez se le saca la varianza (doble varianza) con un filtro de 5 puntos como lo ilustra la figura 50, esto con el fin de no detectar los pulsos ocasionados por ruidos de baja frecuencia.

Para no utilizar límites tan pequeños, la amplitud de la doble varianza se pasó a escala de decibele (ver figura 50), en donde se pudo constatar en varias pruebas realizadas en el laboratorio que con un límite superior, igual a 7,5 decibele ningún pulso era detectado, excepto los debidos a la presión.

Figura 50. Doble varianza de la señal de presión



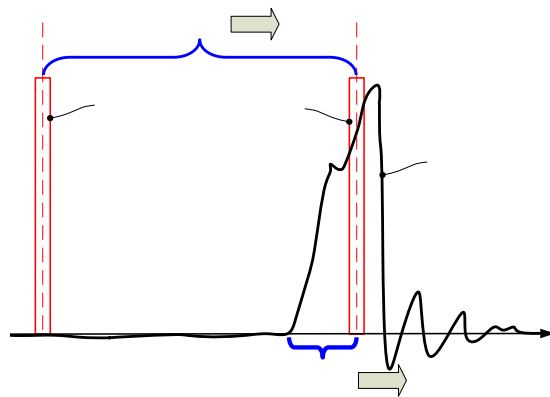
En esta parte del software se calcula el periodo de la señal, tomando la distancia entre los picos y sacando el promedio. Para el cálculo del periodo, este método dio mejores resultados ante cualquier perturbación del sistema que utilizando las funciones incorporadas labview.

Después de la doble varianza se alimenta el Sub VI detector de pulsos, el resultado se compara con los hallados por la otra rama (con una sola varianza). Al compararse los dos resultados, los verdaderos pulsos de presión coinciden en un rango de $\pm 5\%$.

7.3. CÁLCULO DEL AAI

Para calcular el ángulo de avance de la inyección (AAI), véase figura 51, por definición se debe conocer cuanto representa el tiempo transcurrido desde el inicio del pulso de presión ¹³(A) hasta el eje central¹⁴ del pulso del PMS cil.1 (B') en ángulo de giro del cigüeñal (AA).

Figura 51. Determinación del AAI



El AAI, se calcula solo para el primer cilindro, ya que las muescas en el volante hacen referencia solo a este cilindro.

Para convertir la diferencia de tiempo AB' en ángulo de giro del cigüeñal se utiliza la proporcionalidad conocida entre el tiempo BB' (correspondiente a una vuelta completa del cigüeñal, 360°), y el tiempo AB', quedando definida la siguiente ecuación.

$$AAI^{\circ} = \frac{t_{AAI} * 360^{\circ}}{t_{PMS}} \quad (5)$$

B

PMS cil. 4

¹³ Este parámetro es calculado basado en el procedimiento anterior.

¹⁴ Representa la media del ancho del pulso de PMS (m).

El subVI AAI se encarga de encontrar los tiempo A, B y B' en cada ciclo de inyección, aplicarles la ecuación 5 y promediar los valores para arrojar un ángulo por paquete de wf.

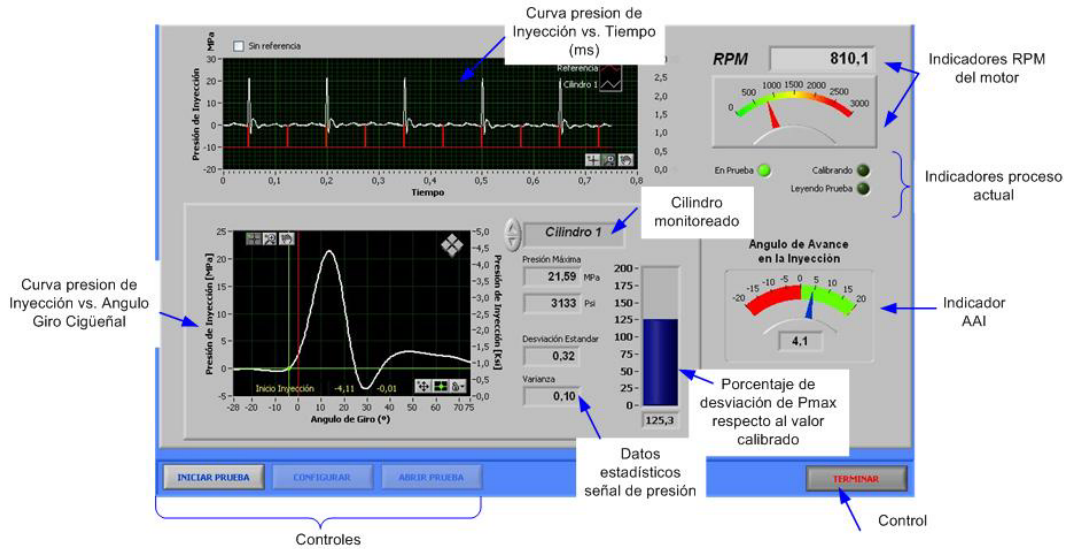
Debido a que se esta midiendo un desfase entre dos señales, un retardo en una de las dos señales arrojaría ángulos completamente fuera de los reales, por lo cual se dejo la opción de calibrar el AAI en un motor cero kilómetros, para compensar los errores inducidos en el tratamiento de las señales.

7.4. DESCRIPCIÓN Y USO DEL PANEL FRONTAL

El panel frontal o interfaz se desarrollo de tal forma que el entorno fuese amigable para el usuario, mediante indicadores "*analógicos*" y digitales, la utilización de dos sistemas de unidades (métrico-ingles), graficas dinámicas y la posibilidad de realizar el monitoreo a todos los cilindros con un solo cable, sin afectar su medida.

El panel frontal desarrollado se muestra en la figura 52. En esta parte se hará una breve descripción de cada uno de los elementos con que el usuario interactúa.

Figura 52. Descripción del Panel frontal desarrollado



Antes de usar cualquier control, el programa se debe ejecutar, para lo cual hacemos clic en el botón RUN (ver figura 53), o con el comando CTRL+R.

Figura 53. Botón RUN

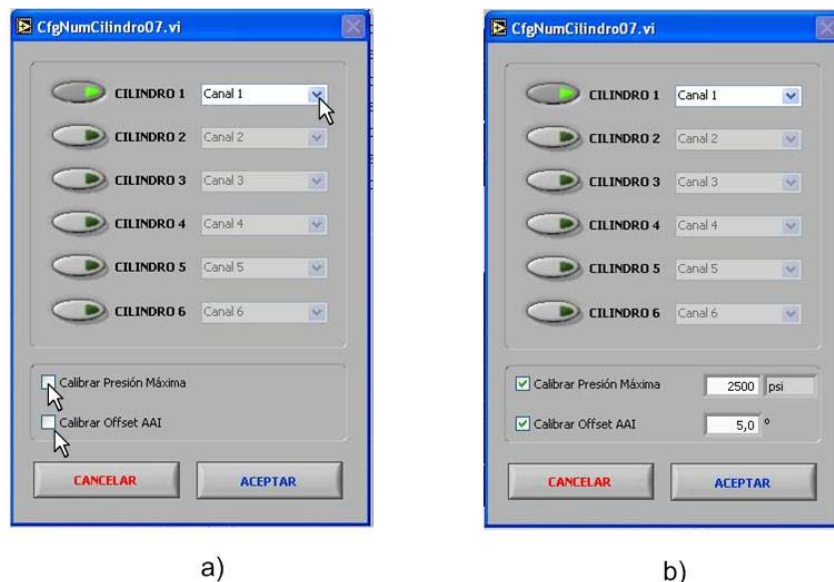


El panel frontal tiene 5 controles manejados por el usuario, los cuales se describen a continuación.

Configuración. Es el primer control al que debe recurrir el usuario. Después de hacer clic en este botón, aparece un menú como se observa en la figura 54a, en el cual el usuario debe especificarle al programa la correspondencia entre cilindro monitoreado y el canal habilitado, ver figura 60. En este menú, el usuario también

puede especificar que tipo de calibración va a realizar, presión máxima o AAI, como lo muestra la figura 51. Si por ejemplo se va a calibrar la presión máxima, se selecciona esta opción y se introduce el valor esperado de amplitud de la señal, el programa toma la diferencia entre la señal recibida y la esperada, compensando automáticamente esta diferencia (off set), quedando así calibrado el equipo respecto a la presión máxima dada.

Figura 54. Menú del control configuración.



Iniciar Prueba: Con este control se da inicio al procesamiento y visualización de los datos adquiridos. Cada prueba tiene una duración de 60 segundos.

Abrir Prueba: Este control se utiliza cuando se quiera leer una prueba almacenada en el PC.

Terminar: Este control se debe utilizar cuando se desee parar el programa antes de su finalización automática. No se recomienda utilizar el botón STOP de Labview (Figura 49).

Cilindro monitoreado: Se utiliza para observar los datos de los diferentes cilindros configurados. Por defecto siempre nos muestra el cilindro 1.

El panel frontal muestra dos graficas donde representa las dos señales, presión de inyección y PMS del primer cilindro. La grafica superior nos da una idea general del comportamiento dinámico de las dos señales en función del tiempo dado en ms. La grafica inferior nos muestra las mismas dos señales en dominio de ángulo de giro del cigüeñal. En la parte superior izquierda del panel frontal se muestra las revoluciones a las que esta girando el cigüeñal en rpm. Se incorporo dos tipos de indicadores, uno tipo analógico y otro digital.

Debajo de los indicadores de RPM, se encuentran tres leds los cuales indican el estado actual del programa y se activan de la siguiente forma:

En Prueba: Se activa cuando se va a realizar un monitoreo como tal. Es la condición por defecto del programa.

Calibrando: Se activa cuando se esta realizando una calibración, ya sea de AAI o Presión Máxima.

Leyendo prueba: Como su nombre se indica se activa cuando se esta leyendo una prueba almacenada.

A la derecha del panel frontal se encuentra una barra vertical, que indica el porcentaje de desviación de la presión máxima adquirida respecto al último valor calibrado.

En el panel frontal, también se muestra la varianza y desviación estándar de la señal de presión, cuando estos valores superan la unidad, la prueba debe descartarse por la presencia de ruido.

8. CALIBRACIÓN Y ENSAYOS EXPERIMENTALES

8.1. CALIBRACIÓN DE LA TÉCNICA

Para la calibración de la técnica se utilizó el banco de pruebas Hartridge 800 y el probador de inyectores del taller Calibraciones técnicas (Av. Quebradaseca N° 21-52 Bucaramanga). Cada sensor y cada cable a pesar de estar hechos aparentemente con los mismos materiales y dimensiones, presenta cierta variación de sensibilidad, capacitancia y resistividad. Pruebas preliminares hechas en el laboratorio mostraron que ante la misma señal de entrada a la tarjeta de acondicionamiento, existía una variación cercana al 10 % de la presión máxima entre un canal y otro, por lo cual se decidió formar conjuntos (sensor, cable, canal) para la calibración y pruebas. Aunque la técnica se desarrollo para trabajar con 6 sensores y 6 cables (6 conjuntos) solo se pudieron formar dos conjuntos, 1 y 2 por la falta de cables.

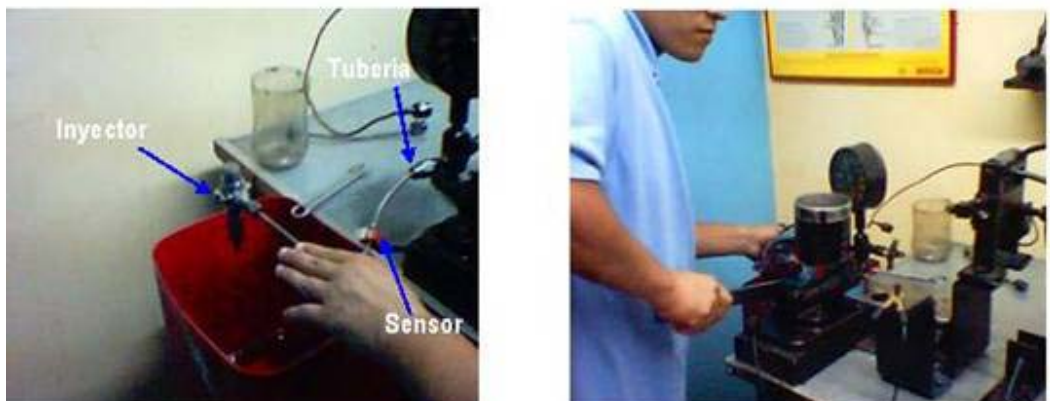
Procedimiento de Calibración

Se inició la calibración en el probador de inyectores por tiempo y comodidad, pero la prueba tuvo que ser suspendida debido a la poca precisión ocasionada por varios factores entre los cuales se destaca: ruido introducido al sistema por la vibración de la tubería, la frecuencia de bombeo no se mantenía en un régimen constante, por la naturaleza del accionamiento del probador (manual), la utilización de una frecuencia de muestreo baja.

El siguiente procedimiento se realizó para cada uno de los conjuntos cable, sensor y canal, en el banco de prueba de bombas Hartridge 800.

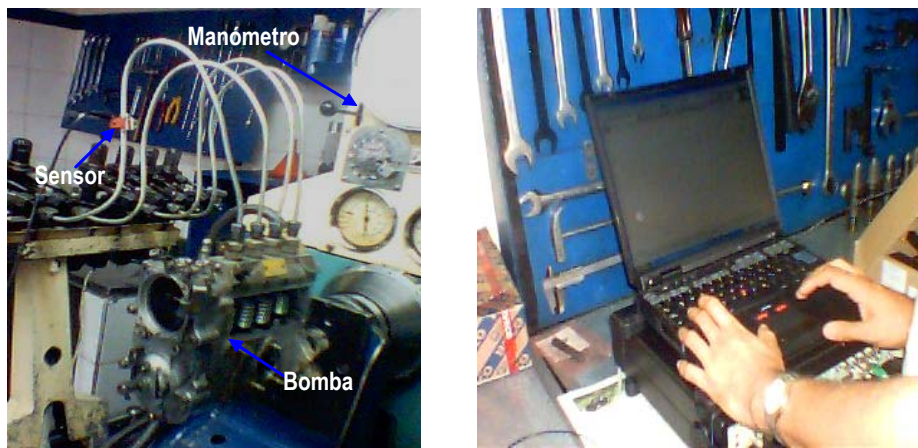
En el probador de inyectores se calibró un inyector de orificios múltiples a varias presiones. El inyector calibrado se ubicó en el manifold de inyectores del banco Hartridge 800 como se observa en la figura 55.

Figura 55. Calibración en el probador de Inyectores



En el banco Hartridge 800 se instala el sensor (y su respectivo cable) en la tubería que une la bomba con el inyector y se colocó en funcionamiento.

Figura 56. Calibración de la señal de presión en el banco Hartridge 800



Para la calibración se utilizó una bomba en línea marca Bosch PES M de cuatro cilindros montada en el banco Hartridge, accionada a 400 rpm. Se realizaron cuatro pruebas con diferentes presiones de apertura del inyector, 1950, 2400, 2500 y 2800 psi. Las lecturas en el manómetro del probador fueron aproximadas debido a la oscilación del indicador analógico.

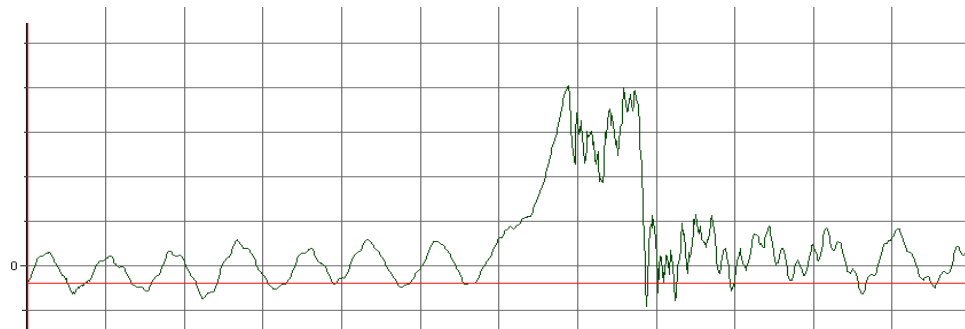
El sistema fue configurado con una frecuencia de muestreo de 10000 muestras/seg.

Se varió la constante de amplificación de la señal obtenida hasta hacer coincidir la amplitud del pico de presión con el valor fijado en el inyector para los dos conjuntos como se muestra en la figura 57, obteniéndose los datos de la tabla 3.

Tabla 3. Resultados obtenidos en el proceso de calibración

Presión (psi)	Conjunto 1		Conjunto 2	
	Voltaje (V)	Factor (V/P)	Voltaje (V)	Factor (V/P)
1950	2.29	851.5283	2.15	906.9768
2400	2.82	851.0638	2.65	905,66
2500	2.96	844.5945	2.75	909.0909
2800	3.3	848.4848	3.10	903.2258
	\bar{X}	848.92	\bar{X}	906.33
	S	3.17	S	2.45

Figura 57. Curva calibrada a 2800psi



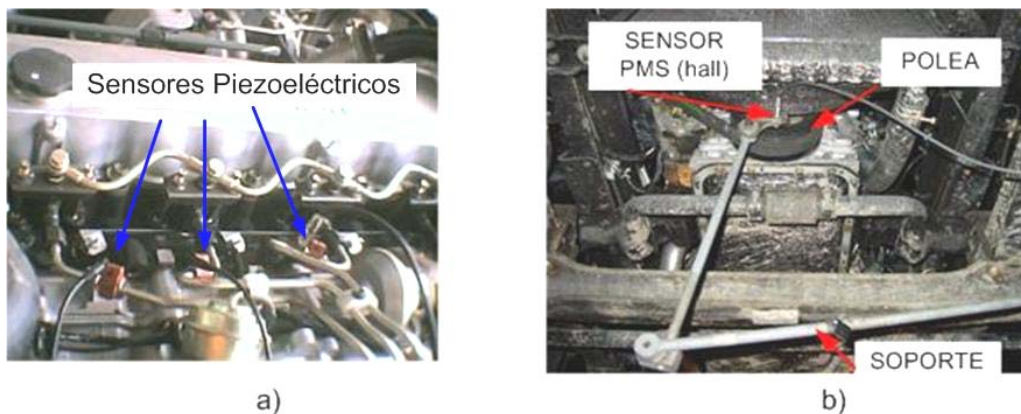
Producto del proceso de calibración, el factor de calibración se tomó igual a la media de los valores obtenidos, para el conjunto 1 el factor es **848.92 psi/V** y para el conjunto 2 es **906.33 psi/V**. Estos factores se introdujeron en el software y multiplican la señal que se recibe de la Tarjeta de adquisición para escalarla. Como se mencionó en el capítulo anterior, el software se desarrolló con la posibilidad de realizar calibraciones posteriores en bancos de ensayos o motores nuevos.

8.2. METODOLOGÍA PARA REALIZAR LAS PRUEBAS

A continuación se describe el procedimiento para llevar a cabo con éxito las pruebas al sistema de inyección en motores Diesel mediante la técnica desarrollada para el prototipo DIAGMA-D100. Para un mejor entendimiento revisar la figura 32 donde se muestra claramente los componentes de la cadena de medición.

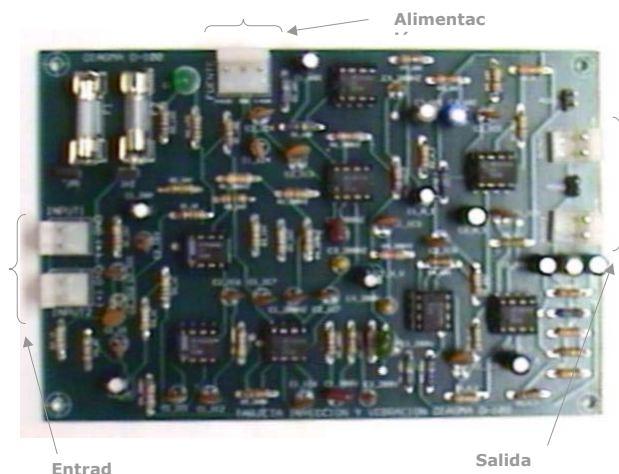
1. Se monta el sensor piezoeléctrico en la línea de inyección (Fig. 58a) evitando colocarlo en superficies sucias, superficies con curvaturas o muy calientes (temperaturas mayores a 70 °C).

Figura 58. Instalación de los sensores



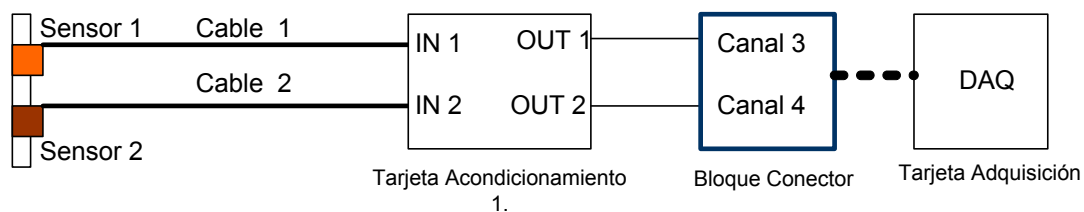
2. Se monta el sensor inductivo Hall apoyado sobre una base metálica, ésta debe ser externa al vehículo, para evitar vibraciones del motor que induzcan errores de medición; el imán se monta en cualquier parte de la polea siempre y cuando se garantice que las dos muescas de la polea (fija y móvil) coinciden la una a la otra. Para esto es necesario colocar el motor en un cambio suave (cuarta o quinta) y mover lentamente el vehículo hasta lograr la máxima coincidencia posible antes de colocar el imán.
3. Instalación de la tarjeta de acondicionamiento de señales de presión: en esta tarjeta se efectúa la amplificación y filtrado de las señales del sensor piezoeléctrico, cada tarjeta tiene dos canales, se conecta en IN el cable del sensor, en OUT el cable que va al correspondiente canal en el bloque conector, y se alimenta con el cable de 3 patas (+12 V,-12 V y ground) proveniente de la fuente. El led indicador debe encenderse, si esto no ocurre se debe revisar la conexión, ver figura 59.

Figura 59. Tarjeta de Acondicionamiento de la señal de presión



El cable 1 y el sensor 1 se deben conectar canal 1 de la tarjeta de acondicionamiento y esta a su vez al canal 3 del bloque conector para conformar el conjunto 1 (canal 1 en el software) . Para el conjunto 2 (canal 2 en el software) se conecta el cable 2 al sensor 2 y al canal 2 de la tarjeta de acondicionamiento y después al canal 4 del bloque conector. Ver figura 60.

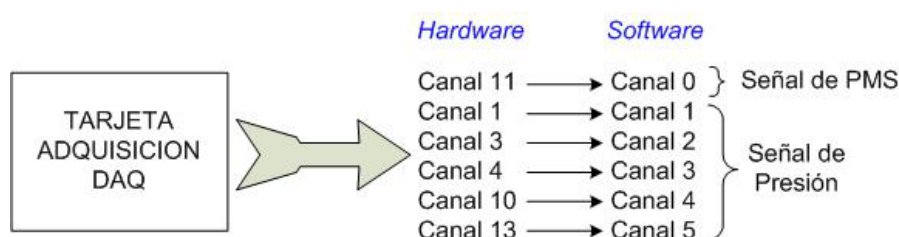
Figura 60. Conexión requerida para sensor de presión 1 y 2.



4. Instalación de la tarjeta de acondicionamiento de señal PMS. La tarjeta se alimenta con +5V y ground tomados de la fuente, en HALL se conecta el cable proveniente del sensor y en OUT el cable que va al canal 11.

5. Conectamos los canales en el bloque conector, según la tabla 2. Para la técnica es necesario conectar en paralelo el contador del bloque conector con los terminales de la señal del sensor hall (canal 11).
6. Se Abre el Panel Frontal del Software: Se abre labview, Se hace clic en Abrir archivo y se busca el archivo InyeccionPF.VI en la carpeta C:\Misdocumentos\DiagmaenLiv\soporte1\.
7. Se enciende la fuente de alimentación.
8. Configuración de canales: Dependiendo de los cilindros que se vayan a analizar, se configuran los canales en la ventana de configuración (ver figura 51), así, por ejemplo si queremos analizar el cilindro 1, debemos manifestarle al software con que conjunto se esta adquiriendo esta señal para identificarla plenamente basándonos en la homologación de canales físicos y virtuales como se observa en la figura 61.

Figura 61. Homologación de canales físicos y virtuales



9. Se enciende el motor y se comprueba los niveles de ruido, la varianza de la señal debe ser menor que 1. Durante toda la prueba el motor debe estar en régimen de ralentí.

10. Se inicia la prueba, después de dar click en Iniciar Prueba. La prueba dura 30 segundos, pasado este tiempo se puede guardar el resultado.

8.3. LÍMITES DE ALERTA.

En el mundo del diagnóstico y calibración de los sistemas de inyección Diesel, no existe un rango de buen funcionamiento para el AAI. Simplemente, el fabricante da un valor, y el rango permisible de funcionamiento lo deja abierto a la experiencia del técnico. Siempre se trata de llevar al valor del AAI lo más cercano al valor recomendado sin tener conciencia de cuanto afecta el desempeño del motor una desviación de medio grado respecto a dicho valor.

Como rango inicial, para esta técnica se plantea una desviación de $\pm 5\%$ para que no se afecte el desempeño del motor basados en la experiencia de los técnicos de Calibraciones Técnicas Ltda. Lo mas sano es llevar a cabo pruebas con parámetros controlados para determinar un rango real. Por ahora se recomienda emplear esta técnica para diagnostico predictivo fundamentada en el análisis de tendencias de los parámetros que la metodología maneja, determinando los límites de alerta y alarma para cada motor en particular.

El límite de alerta para la presión de inyección máxima es más difícil de determinar, debido a que el fabricante del motor no suministra este parámetro. Como referencia se propone un límite basado en los estudios de Henein [21] de $\pm 7\%$ de la presión máxima determinada en un motor nuevo.

La meta a largo plazo de esta metodología es determinar la presión máxima de los motores más representativos en nuestro medio, así como sus límites de alerta y alarma reales.

8.4. ENSAYOS DE LABORATORIO

Las pruebas y ajustes finales del equipo fueron realizadas en el laboratorio de máquinas alternativas LMTA adscrito a la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS.

Las pruebas realizadas en el laboratorio se hicieron en un motor KIA BESTA 2200 (figura 62), acondicionado en un proyecto de pregrado en 1998 para ser usado en las prácticas de la cátedra Máquinas Alternativas, las características referentes al sistema de inyección se encuentran en la tabla 4.

Figura 62. Motor KIA BESTA 2200 ubicado en el LMTA

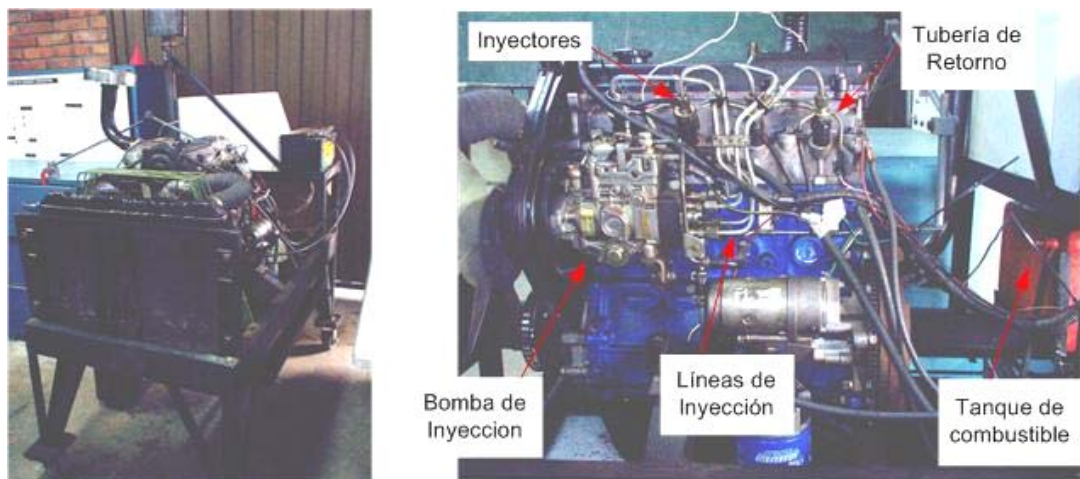


Tabla 4. Características sistema de inyección motor KIA BESTA 2200

Bomba de inyección	Tipo VE (Rotativa)
Tipo de Inyector	Agujeros múltiples
Presión de Apertura Inyector	1920 psi (13,2 Mpa)
Regulación de la inyección	2 ° antes PMS
Tipo de Cámara	Indirecta (remolino)
Número de Cilindros	4
Orden de encendido	1 3 4 2
Velocidad en Ralentí	700-750 rpm

En la figura 63, se muestra el reporte final de una prueba realizada al motor KIA BESTA 2200. En este reporte se observa una velocidad de ralentí (801 rpm) por encima de la recomendada (700-750 rpm) manifestándose en un mayor consumo de combustible y un aumento del AAI. El AAI está 2,1 grados por encima del recomendado, esto se debe al aumento de las revoluciones y a la pérdida de regulación del motor. La presión residual no es representativa, lo cual indica que la válvula de descarga se encuentra en buen estado.

El motor no se encuentra en buenas condiciones, por lo cual se recomienda revisar los inyectores 1 y 4, así como regular el inicio de la inyección en la bomba Bosch VE.

Figura 63. Prueba motor KIA BESTA 2200.



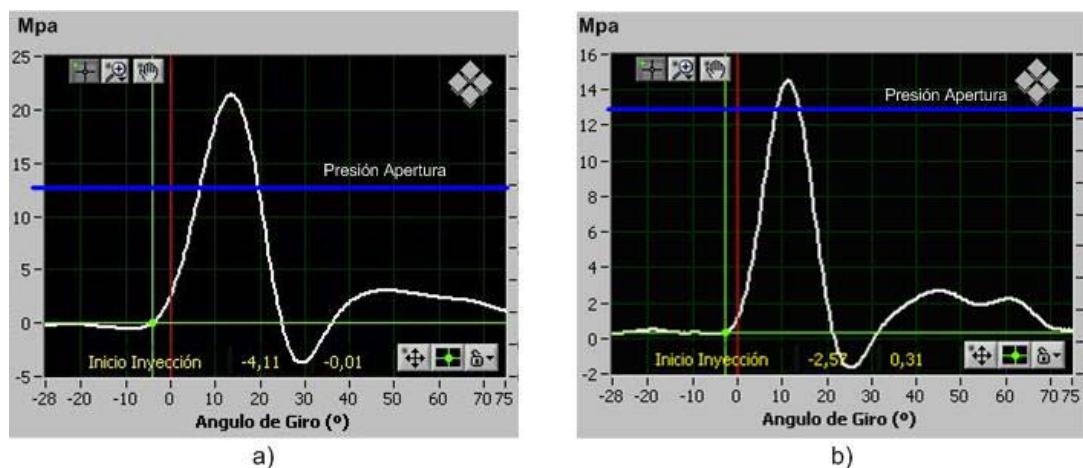
Para simular una falla en el motor, se aflojaron cada uno de las conexiones de los inyectores del motor hasta que se observara una fuga de combustible como se muestra en la figura 64. Este proceso se realizó con cada uno de los cilindros, uno a la vez y sin cuantificar la cantidad de combustible fugado.

Figura 64. Falla Inducida. Soltura línea de inyección lado inyector



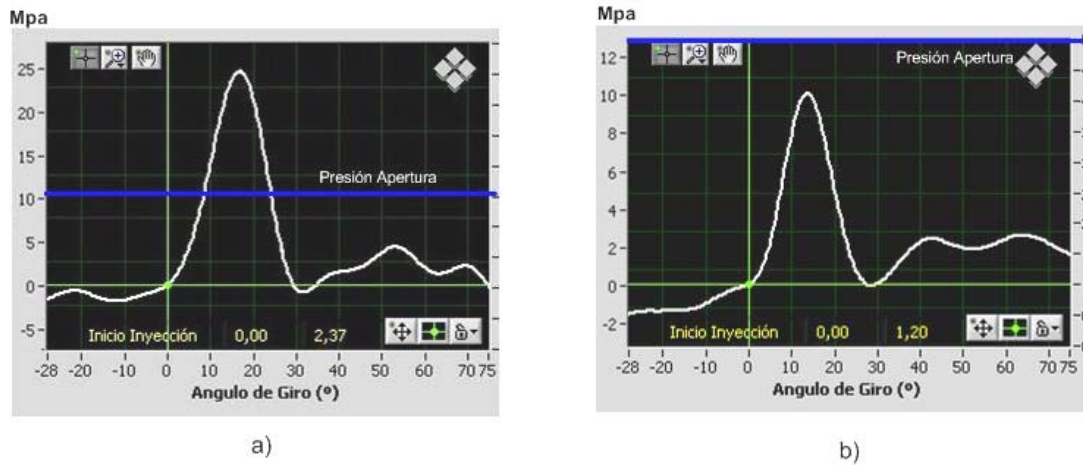
En la figura 65 se muestra el diagrama de presión de inyección del cilindro 1. En la parte a) se muestra la curva obtenida con el sistema original y en b) con la falla inducida. La línea de color azul representa la presión de apertura del inyector recomendada por el fabricante (1920 psi). De la figura 65b es claro que el combustible inyectado en el cilindro 1 disminuye considerablemente al disminuir la presión por la fuga de combustible hacia el exterior, manifestándose en la disminución de la velocidad del motor de 804 a 780 rpm. La reducción en la velocidad afectó el AAI, reduciéndolo 1,5°.

Figura 65. Presión de inyección en el cilindro 1.



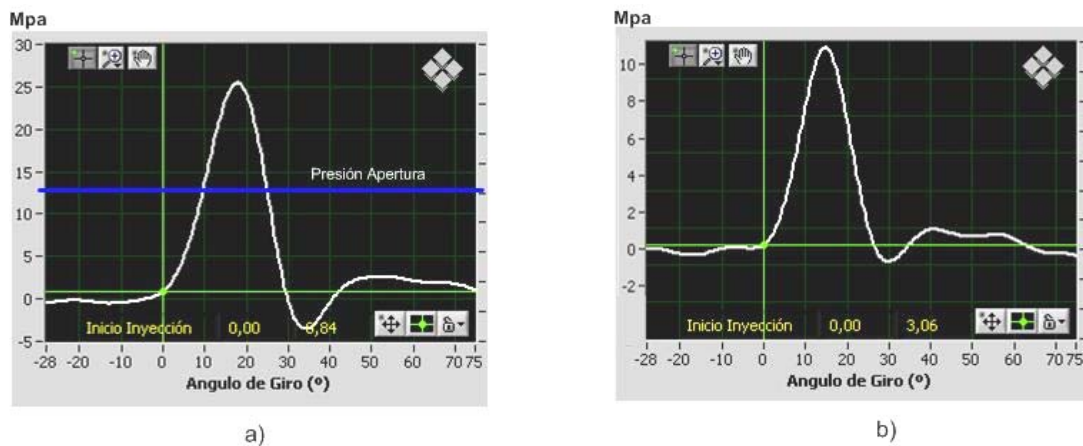
La figura 66 representa el comportamiento de la presión en la línea de inyección en el cilindro 2 antes y después de inducir la falla. No se alcanza a elevar la presión en la línea de inyección lo necesario para abrir el inyector y depositar combustible en la cámara.

Figura 66. Presión de inyección en el cilindro 2.



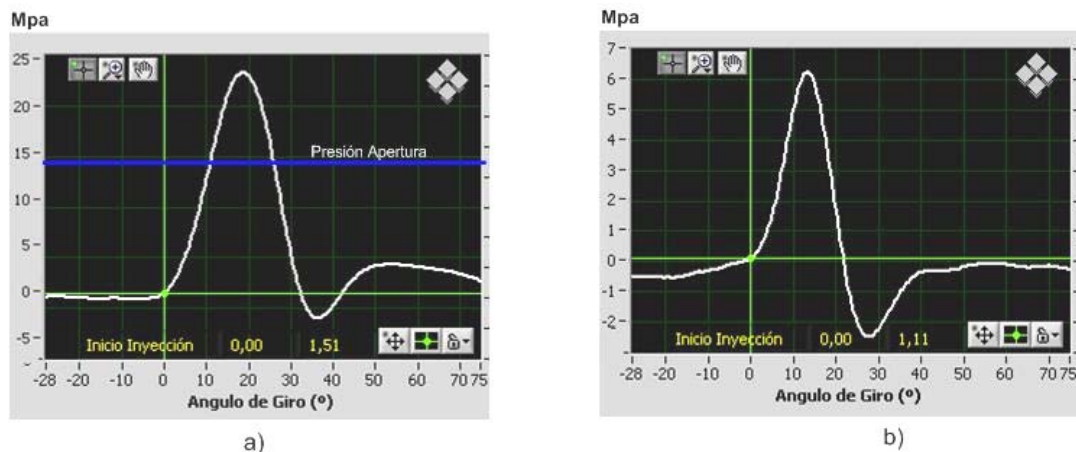
En la figura 67 se observa el comportamiento de la presión en el cilindro 3; al igual que en la línea del cilindro 2, la presión no se eleva lo suficiente para abrir el inyector. Respecto a la presión máxima las dos líneas, cilindro 2 y 3 tuvieron comportamiento similar.

Figura 67. Presión de inyección en el cilindro 3



En la figura 68 se observa una disminución considerable de la amplitud del ancho del pulso de presión, así como la duración del pulso que pasó de 30° a 20°.

Figura 68. Presión de inyección en el cilindro 4.



8.5. PRUEBAS EN CAMPO

El motor KIA BESTA 2200 se utiliza muy poco en los buses de transporte urbano. No es un motor comercial y su aplicación esta relegada a vehículos pequeños como el mostrado en la figura 69. Por lo tanto, las pruebas se enfocaron a los dos motores más representativos el NKR 4JB1-TC y el NPR 4GH1-T.

8.5.1. Pruebas en Campo de un Motor KIA BESTA 2200

Se realizaron pruebas en un motor KIA BESTA 2200 con el sistema de inyección recientemente calibrado para confrontar su estado con el motor utilizado en el laboratorio. En la figura 69, se muestra el motor utilizado, y el sensor de presión instalado en la línea de inyección del cilindro 2.

Figura 69. Motor KIA BESTA 2200 monitoreado en campo



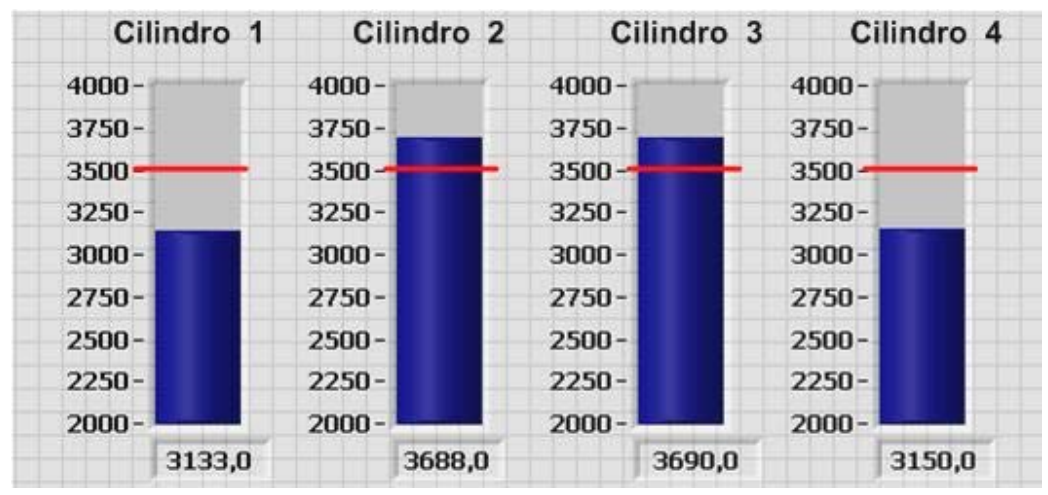
En la figura 70 se ilustra el reporte final capturado de la línea de inyección del cilindro 2. La presión máxima de este motor se encuentra alrededor de 3500 psi (24,1 Mpa) y el AAI determinado fue de 2,7°. La velocidad de ralenti determinada fue de 730 rpm, ubicándose dentro del rango recomendado 735-750 rpm.

Figura 70. Reporte Prueba en campo Motor KIA BESTA 2200



Tomando como referencia el valor de presión máxima (3500 psi) calculado en campo para el motor KIA BESTA, y basados en el rango permisible de $\pm 7\%$, es decir, ± 250 psi, podemos concluir en base a la figura 71, que la presión de inyección en los cilindros 1 y 4 del motor del laboratorio esta por debajo del rango (3250 psi) . Manifestándose en una vibración excesiva del motor.

Figura 71. Presión Máxima en cada cilindro Motor KIA (laboratorio)



8.5.2. Pruebas en Campo de un Motor NPR 4HG1-T

La mayoría de buses de transporte urbano (75%) del área metropolitana de Bucaramanga funcionan con motores NPR 4HG1-T Chevrolet, por lo cual se realizaron algunas pruebas en estos motores. Primero se tomaron datos en un chasis nuevo, en el concesionario CODIESEL ubicado en la Autopista a Girón Km. 7.

Los datos técnicos referente al sistema de inyección de este motor se encuentran consignados en la tabla 5.

Tabla 5. Características sistema de inyección motor NPR 4HG1-T

Bomba de inyección:	Lineal (Bosch)
Tipo de Inyector:	Agujeros múltiples
Presión de inyección:	2616 psi
Regulación de la inyección:	9 ° antes PMS
Tipo de Cámara:	Directa
Número de cilindros	4
Orden de encendido:	1 3 4 2
Velocidad en Ralentí	725-750 rpm

Se sabe que el hardware y el software producen un desfase entre la señal de presión y PMS, al no existir una forma práctica de calcular el error inducido, el software tiene la opción de patronar una señal de un motor nuevo a un ángulo de inyección conocido y confiable como en el caso de motores nuevos. En este caso, se calibraron las señales para un ángulo de inyección de 9°.

Se realizaron 10 pruebas en cada línea de inyección con el fin de determinar la presión máxima media de cada cilindro. La presión máxima determinada fue de 5280 psi, presión superior a la del motor KIA BESTA (3600 psi). Esto se debe principalmente al diseño de las cámaras de combustión, en el KIA la inyección es indirecta mientras que en el NPR es directa.

Figura 72. Presión de Inyección en el cilindro 1 de un NPR nuevo.



Las velocidad del motor (726,5 rpm) esta dentro del rango recomendado por el fabricante (725-750 rpm).

Se realizaron pruebas en dos buses con motores NPR 4GH1-T, con igual tiempo de servicio, aproximadamente 6 meses. Los dos motores se presentaron un AAI de 8,7 y 9,2°. Para un AAI de 9°, el rango de buen funcionamiento quedaría en 8,55° y 9,45°. Lo cual nos indica que la regulación de las bombas de inyección de los dos buses se encuentran en buen estado.

La presión máxima solo pudo ser hallada en tres de los cuatro cilindros por interferencia de la carrocería. Los dos buses presentan una presión máxima de 5180 psi y 4998 psi. Ubicándose dentro del rango permisible (4912 -5651.74 psi).

Figura 73. Pruebas en campo. Motores NPR en buses de Servicio Público.



8.5.3. Pruebas en Campo de un Motor NKR 4BJ1-TC

Se realizaron pruebas al camión NKR 4BJ1-TC de la universidad Industrial de Santander, por ser un motor nuevo y tener más aplicación en el transporte urbano que el motor KIA BESTA, principalmente en busetas pequeñas y colectivas. En la figura 72, se ilustra el montaje del sensor Hall y el imán en la polea del cigüeñal. El montaje es más sencillo de lo que parece. La información técnica referente al sistema de inyección se registra en la tabla 6

Figura 74. Pruebas en campo. Motor NKR 4BJ1-TC



Tabla 6. Características sistema de inyección motor NKR 4BJ1-TC

Bomba de inyección	Tipo VE (Rotativa)
Tipo de Inyector	Agujeros múltiples
Presión de apertura del inyector	2631 psi
Regulación de la inyección	14 ° antes PMS
Tipo de Cámara	Directa
Número de cilindros	4
Orden de encendido	1 3 4 2
Velocidad en Ralentí	750-790 rpm.

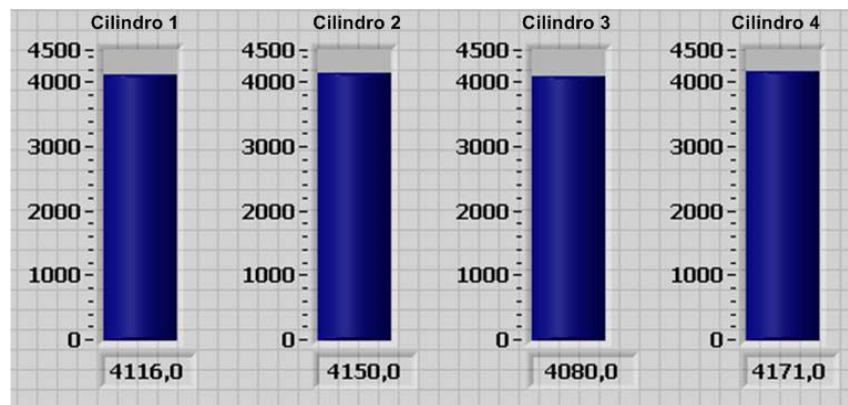
En la figura 75 se muestra el reporte final de la prueba realizada. Para la prueba se utilizó la configuración de AAI que se traía del motor NPR nuevo. El AAI con la metodología desarrollada fue de 13,7° frente a 14° que trae el motor de fábrica. La velocidad en ralentí 726,1 rpm esta dentro del rango recomendado por el fabricante 750-790 rpm.

Figura 75. Prueba cilindro 4. NKR



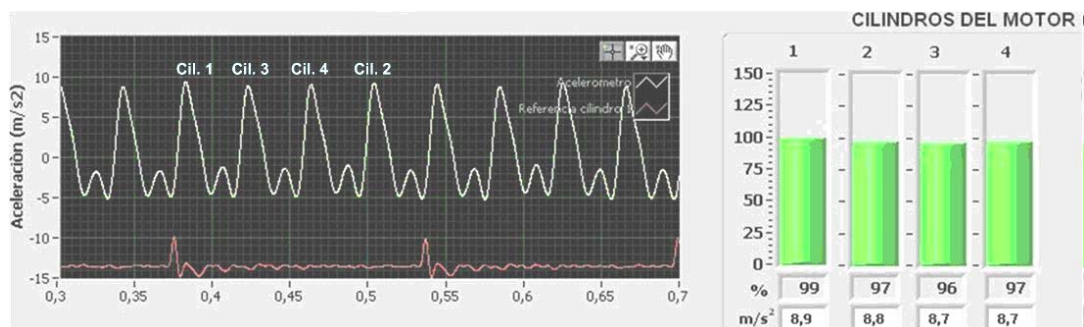
En la figura 76 se muestra la presión máxima de inyección promedio de todos los cilindros. De esta figura se puede concluir que en todos los cilindros se inyecta el combustible a la misma presión aproximadamente, la cantidad de combustible inyectado es la misma.

Figura 76. Presión de inyección en los cilindros del motor NKR



El funcionamiento uniforme en todos los cilindros se corroboró con una prueba de vibración realizada con la técnica desarrollada en el grupo de investigación DIAGMA-D100. En la figura 77 se puede observar una amplitud de los picos de aceleración de cada uno de los cilindros muy cercanos entre sí.

Figura 77. Señal de aceleración Motor NKR



En base a lo expuesto anteriormente, se puede concluir que el sistema de inyección del motor NKR monitoreado, se encuentra en óptimas condiciones.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se participó en un grupo de investigación multidisciplinar patrocinado por Conciencias y conformado por entes de la universidad Industrial de Santander como las escuelas de ingeniería Mecánica, ingeniería Electrónica y el CEIAM.

Se desarrollo una metodología para el diagnostico del sistema de inyección en motores Diesel la cual puede determinar de forma no intrusiva algunos de los parámetros más importantes en el proceso de inyección como lo son: La velocidad de ralentí, el ángulo de avance de la inyección (AAI), la presión máxima de inyección. Los parámetros anteriores se obtienen de una forma rápida y fácil.

Los límites de alerta se establecieron basados en un estudio hecho por Heinen [21] y en la experiencia de los técnicos de inyección Diesel. Se recomienda realizar más pruebas en una población representativa (no menor de 20 muestras) de motores nuevos y en servicio para determinar con más certeza los limites de alerta y alarma tanto para la presión máxima y el AAI, ya que el fabricante no da un rango de funcionamiento sino un valor.

No se encontraron referencias de presión máxima de inyección de los motores monitoreados en ninguno de los manuales consultados. El fabricante no maneja la presión máxima de inyección como parámetro de mantenimiento o calibración.

Se recomienda realizar pruebas de fallos inducidos en motores NPR 4GH1-T por ser el motor más popular en el sector de transporte urbano de la ciudad de

Bucaramanga para relacionar el comportamiento de la presión de inyección con una falla conocida.

Las cámaras de inyección directa como las del NPR y NKR trabajan con una presión más alta que las cámaras de inyección indirecta (KIA BESTA).

En la calibración del sistema de inyección mediante bancos de pruebas inducen error debido al tipo de instrumentación que se maneja (analógica), la carencia del aceite recomendado para las pruebas (ISO 4113 para el NPR 4GH1-T), la utilización de inyectores y tuberías de inyección no recomendadas.

En algunos buses es muy difícil y casi imposible el acceso a algunos inyectores por el reducido espacio disponible que presenta la configuración de la carrocería, este factor limita la aplicación de la técnica para determinar la presión en alguno de los cilindros, se recomendaría revisar los diseños de las carrocerías por que en algunos casos es muy engorroso hasta para el mismo técnico bajar la bomba o un inyector.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARCOUMANIS, C. y FAIRBROTHER, R. Development and Validation of a Computer Simulation Model for Diesel Fuel Injection Systems, Technical paper 1994, Pag. 149-16.
2. ASMAS, Alan. *Motores Diesel y Sistemas de Inyección*, Editorial Parafino, 2ª edición, 1991.
3. BOSCH. *Diesel-Engine Management 2nd*. Editorial Robert Bosch. Stuttgart Alemania, 1999.
4. BENTLEY, Jhon. *Sistemas de Medición Principios y Aplicaciones*. Editorial Continental segunda edición , México 1993
5. BLANK, Leland. *Ingeniería Económica*, Editorial McGraw Hill. México 1992 3a Edición.
6. HENEIN, Naeim y ROZANSKI, James. A Technique for the Diagnosis of Malfunctions in Diesel Injection Systems. SAE paper 780033, 1978.
7. HEYWOOD, Jhon. *Internal Combustion Engine Fundamentals*, Editorial McGraw Hill, USA 1998.
8. HOLMAN, P. Jack. *Métodos Experimentales Para Ingenieros*. Editorial Mc Graw Hill. México 1986 4ª Edición.
9. JÓVAJ, M. S. *Motores de Automóvil*. Editorial MIR MOSCÚ, Rusia 1982.

10. KIIJÄRVI, Jukka. *Diesel Fuel Injection System Simulation*. PhD thesis, Universidad de Tecnología de Helsinki, 2003.
11. LEE, H. y RUSEL, M., *Mathematical Model of Diesel Fuel Injection Equipment Incorporating Non-linear Fuel Injection*. ImechE Vol. 216 pp 191-204
12. LEE, J. y LEE, V., *Bouncing of the Diesel Injector Needle at the Closing Stage*, ImechE Vol. 216 pp 221-231 paper 2002.
13. MACIAN, Vicente, *Mantenimiento de Motores de Combustión Interna Alternativos*, publicaciones Universidad politécnica de Valencia, España 1993.
14. MANUAL KIA BESTA, workshop.1997
15. MAY, Ed. *Mecánica Para Motores Diesel, Teoría, Mantenimiento y Reparación*, Tomo II, editorial Mc Graw Hill, 1ª edición 1988.
16. MIRALLES DE IMPERIAL, Juan. *El Motor Diesel en el Automóvil*, Ediciones Ceac, Barcelona 1985, pag. 414 a 424.
17. MIRALLES DE IMPERIAL, Juan. *Inyección y Combustión Motores Diesel*, Ediciones CEAC, primera edición 1984.
18. MIRÓ, Am y PUERTA, A. *Medida de Precisión de Velocidad Angulo de Avance en Motores Diesel*, Revista Electrónica Industrial, N° 108, 1981 Pag. 67-89
19. NATIONAL INSTRUMENTS. *Measurement and Automation*. catalogo 2003. National instruments. Austin texas, USA 2003

20. PALLAS, Areny Ramon. *Sensores y Acondicionamiento de Señales*, Barcelona España. Editorial Alfaomega, 2001.
21. RAKOPOULOS, C. y HOUNTALAS, D. A Simulation Analysis of a Diesel Engine Fuel Injection System Fitted With a Constant Pressure Valve, *Energy Convers. Mgmt Vol. 37. N° 2* pp. 135-150, 1996.
22. SENA, *Mecánica Diesel*, tomo 3 fascículos del 17 al 23, Santa fe de Bogota, 1993
23. SHULZ, Erich J. *Diesel Mechanics*, editorial McGraw Hill, 2a Edición. USA 1983

ANEXO A. ANÁLISIS ECONÓMICO

ANÁLISIS ECONÓMICO

La viabilidad económica y los beneficios obtenidos de la implementación de la técnica se analizarán desde dos perspectivas, primero desde una empresa de transporte urbano del área metropolitana de la ciudad de Bucaramanga y desde los propietarios de los automotores.

En la tabla 1, se muestra de forma detallada los componentes necesarios para desarrollar la técnica con sus respectivos costos calculados

Tabla 1 Costos de los elementos necesarios para desarrollar la técnica

ITEM	VALOR	
	Cant x (\$ Dólares)	\$ Pesos ¹⁵ Colombianos
Sensores Piezoeléctricos KG-60 de AVL	6 x (217)	6'669.700.00
Cables monofónicos de AVL	6 x (189)	2'904.500.00
Sensor de efecto Hall, Autonics PR5	1 x (78)	200.000.00
Computador Portátil con puerto para tarjeta PCMCIA	1 x (1240)	3'170.000.00
Tarjeta de Adquisición, tipo PCMCIA Nacional Instrument (NI)	1 x (1095)	2'804.700.00
Bloque conector CB 68 LP y correa de NI	1 x (85)	218.000.00
Tarjeta de Acondic. presión Diagma D-100	1 x (600)	1'536.800.00
Tarjeta de Acondicionamiento Hall	1 x (59)	150.000.00

¹⁵ Para la conversión de monedase se uso TRM promedio de octubre igual a \$2561.33 (Banco de la República)

Fuente bipolar de ± 12 V, 5V	1 x (39)	100.000.00
Licencia Labview 7.0	1 x (586)	1'500.000.00
Software	1 x (200)	513.000.00
Mueble	1 x (40)	103.000.00
Producción Intelectual	1x (1200)	3'074.000.00
Valor Total		22'943.700.00

ANÁLISIS PARA LA EMPRESA DE TRANSPORTES

La implementación de esta técnica por parte de una empresa de transporte tiene dos ventajas. La primera, es un buen negocio y la segunda, es disminuir las paradas de sus buses en servicio, la emisión de gases, el ruido y la vibración lo cual conlleva a un mejoramiento de la prestación del servicio ante sus clientes (pasajeros). Para la evaluación del proyecto se tomara como tasa del inversionista el 16,5 %, tasa que cubre la DTF (7,3¹⁶) y un porcentaje de riesgo del sector tecnológico (9,2).

Costo Inicial

Es el dinero que se desembolsa para adquirir el equipo y colocarlo en funcionamiento, incluye costo del equipo, capacitación del operario, publicidad etc.

P= Costo Inicial del Equipo = \$24'000.000.00

¹⁶ Basado promedio mensual mes octubre 2004

Vida Útil del equipo

Es el periodo de tiempo en el cual el equipo funciona correctamente. Se tomaron 5 años de vida útil, basándose en los datos suministrados por los fabricantes de los componentes. Cabe destacar que la mayoría de los buses sus motores son de cuatro cilindros, por lo cuál al finalizar la vida útil 2 sensores y 2 cables estarán en muy buenas condiciones.

Horizonte=5 años.

Valor de Salvamento

Es el valor comercial del equipo al finalizar su vida útil. Para ser conservativos se asumirá que el equipo no tendrá valor alguno al finalizar su vida útil.

Costos de operación

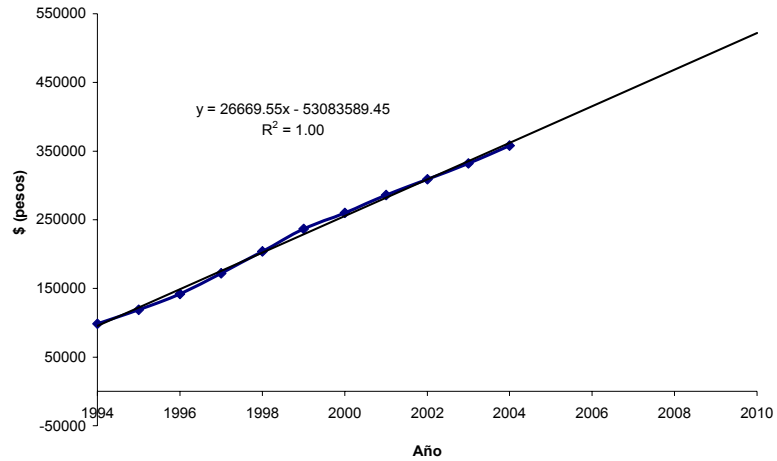
Sueldo del operador: 1.3 Salarios mínimos legales mensuales.

Como el análisis se esta haciendo en periodos anuales, en el año se le habrá pagado 15 salarios (incluyendo primas, vacaciones cesantías, aux. transporte). La capacitación se asume en el valor inicial del equipo.

Para hallar el valor del sueldo mínimo, se utilizo la información de los salarios de los últimos 10 años, extrapolando a los 5 años que se necesitan como horizonte del análisis.

En el primer año el trabajador recibirá \$7'582'736.85.oo con un incremento anual de \$520.000.oo, ver

Figura 1. Sueldo Mínimo Legal mensual 1994-2010



Otros costos de operación: Incluyen arrendamiento de un local para guardar el equipo, servicios básicos, publicidad y papelería. En el primer año se asumirá como costo de operación \$4'000,000 a una tasa del 10%, como lo muestra la figura 2b.

Figura 2. Diagramas de flujo de los costos de operación



Ingresos primer año

Representado por los ingresos producto de la realización de los diagnósticos en un año.

Valor por diagnostico: \$20,000.00

Número Mínimo de Buses Requeridos por mes: 100 (ver figura 3)

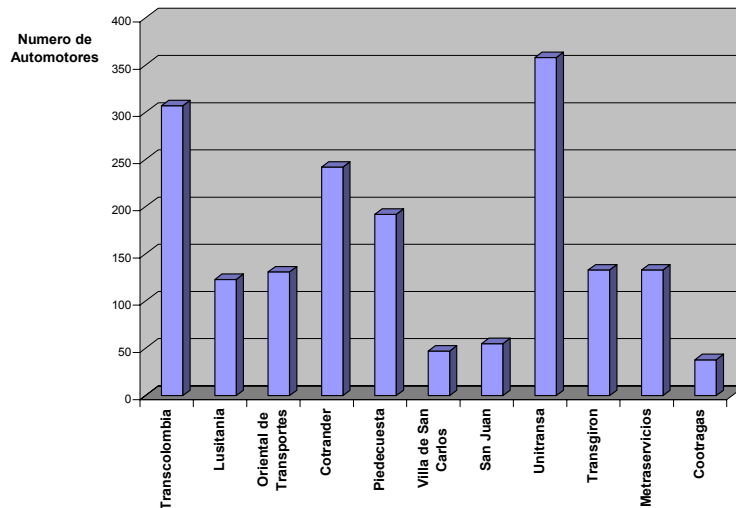
Frecuencia de inspección de cada Bus: Cada 3 meses

Diagnósticos promedios por año: 1200

Ingreso anual: \$24'000.000 con un incremento del 10% anual.

De la figura 3, se muestra la distribución de buses de transporte público por empresas. De esta figura es claro que las únicas empresas con capacidad de cumplir con el número mínimo de buses son Unitransa y Transcolombia. Para las otras empresas les tocaría asociarse o que un tercero les prestara el servicio.

Figura 3. Número de Buses de servicio urbano de B/manga



Fuente: Encuesta realizada por el grupo Diagma D-100

En la figura 4 se observa el diagrama de flujo de los costos de operación y los ingresos, la resta de los dos rubros más el costo inicial del equipo conforman el diagrama de flujo neto, figura 4.

Figura 4. Diagrama de flujo costos operación Vs Ingresos.

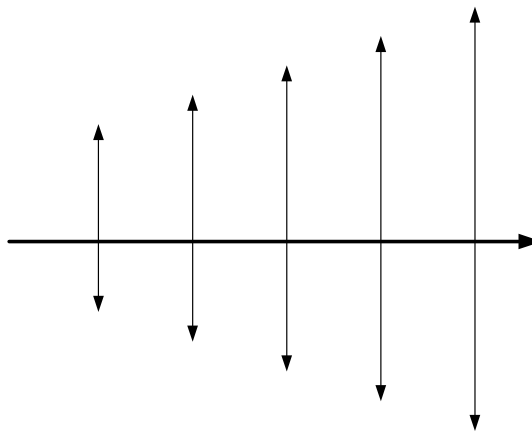
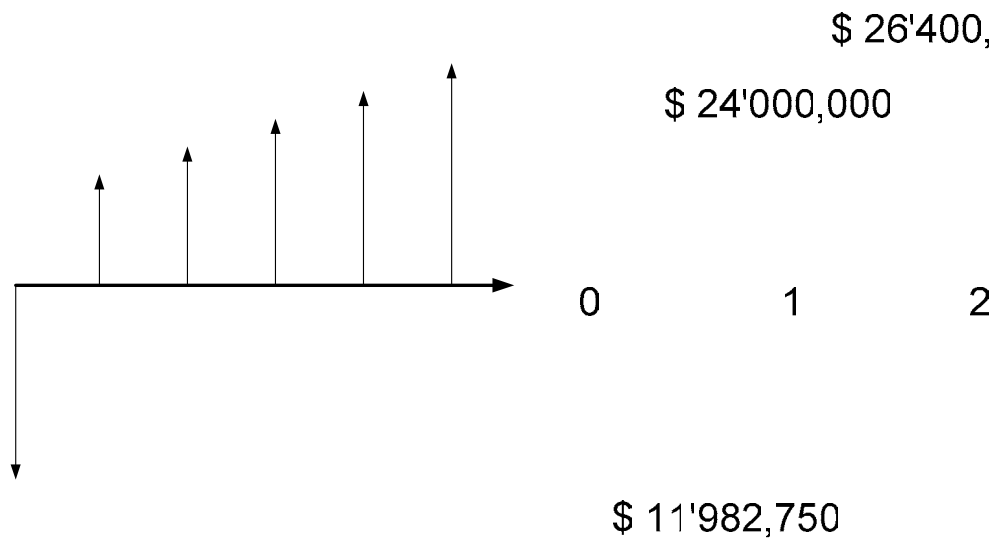


Figura 5. Diagrama de flujo neto



Cálculo de la TIR

$$0 = \$ 12'017,300 * (P/F, i\% , 1) + \$ 13'457,300 * (P/F, i\% , 2) + \$ 15'093,200.7 * (P/F, i\% , 3) + \$ 16'944,700 * (P/F, i\% , 4) + \$ 19'033,400 * (P/F, i\% , 5) - \$ 25'000.000$$

Resolviendo la expresión anterior

TIR= 48 %

Comparando la tasa del inversionista del **16,5%** frente a la TIR de **48 %**, podemos concluir que es un buen negocio para el inversionista, por tratarse de un proyecto de innovación tecnología, el cual garantizará un mejor funcionamiento del sistema de inyección Diesel de los buses de transporte urbano e intermunicipal.

Los beneficios obtenidos por la implementación de la técnica por parte de la empresa de transporte urbano son:

- Buena rentabilidad.
- Implementación de un programa de Mtto. Preventivo.
- Mejoramiento en la prestación del servicio de los buses afiliados a dicha empresa.
- Mayor competitividad frente a otras empresas del sector.

ANÁLISIS PARA EL PROPIETARIO

Costos de operación

Trabajar con presiones de inyecciones mayores que las recomendadas producto de una alta presión de apertura del inyector acelerando el desgaste en los émbolos y componentes de las cámaras de presión en la bomba de inyección, así como los problemas vistos en la sección en el capítulo 2, incrementando no solo los costos de mantenimiento correctivo, también los de operación y lucro cesante.

Con presiones de inyecciones altas, el caudal de combustible inyectado es mayor que lo normal, generalmente el caudal excedente esta entre 1 a 3 ml por 400

emboladas a 800 rpm¹⁷ (velocidad de ralenti para muchos motores) por cada inyector defectuoso. A manera de ejemplo, en promedio un bus que trabaja en el área metropolitana de Bucaramanga realiza 3 recorridos diarios con una duración cada uno de 2 horas, asumiendo que un bus dura funcionando en una condición equivalente a 800 rpm 10 horas de las 12 horas del recorrido y por falta de calibración se desperdician 2 ml de combustible por cada 400 emboladas y un solo inyector esta defectuoso.

Combustible perdido por día

$$2ml * \left(\frac{800 \frac{rev}{min}}{400rev} \right) * \frac{10 * 60min}{dia} = 2400 ml/dia = 0,64 gal/dia$$

Combustible perdido por mes

$$0,64 gal/dia * 25 dia/mes = 16 gal/mes$$

Valor combustible perdido x mes¹⁸

$$16 gal/mes * 3246 \left(\frac{\$}{gal} \right) = \$52000 / mes$$

Es decir, un propietario puede perder en promedio **\$52 000 mensuales** en combustible no aprovechado por no tener bien calibrado el sistema de inyección, situación que se agudiza a medida que corre el tiempo por el desmonte de los

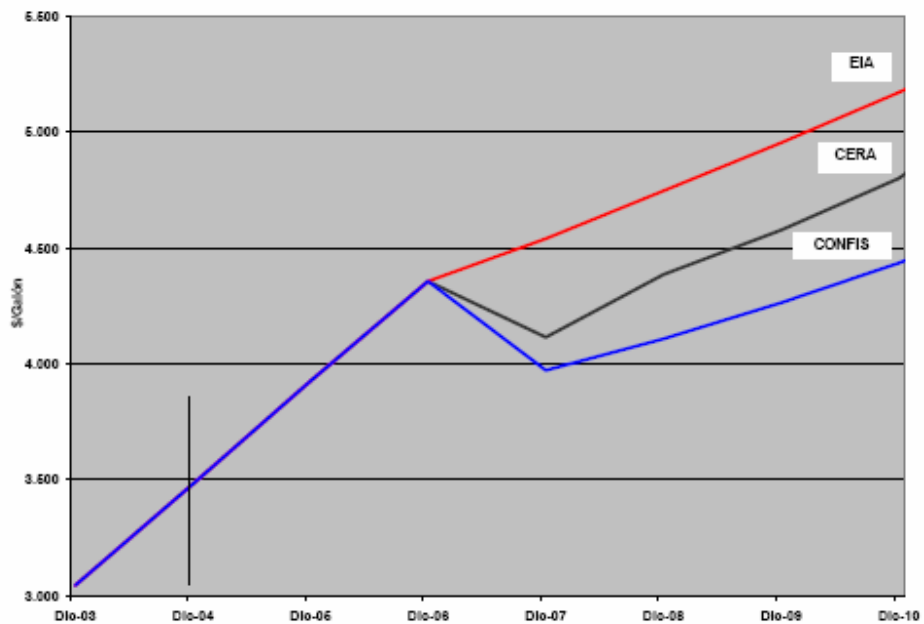
¹⁷ Dato dado por personal de calibraciones Técnicas Ltda. basado en 15 años de experiencia.

¹⁸ El precio del galón de ACPM en el mes de octubre/2004 fue en promedio de \$3246.

subsidios en los hidrocarburos como lo muestra la figura 6, en donde se representan proyecciones hechas por la Escuela de Ingeniería de Antioquia (EIA), CERA y el CONFIS en donde predicen que en 5 años el precio del ACPM podría incrementarse entre un 80 y 100% (Tasa muy superior al incremento del valor de las pruebas con la técnica implementada) lo cual indica que cada día es mas costoso desperdiciar combustible.

Para un buen seguimiento de tendencia del estado del sistema de inyección, al bus se le haría una revisión cada 3 meses con un costo de \$20.000 frente a \$156.000 desperdiciados en combustible.

Figura 6. Proyecciones precio ACPM



Fuente: www.upme.gov.co

Costos de Mantenimiento

Trabajar el sistema de inyección con altas presiones de inyección acelera el desgaste de los componentes de la bomba y los inyectores, incrementando los costos de mantenimiento de estos componentes.

Actualmente la sola verificación de la bomba en un banco de pruebas cuesta en promedio \$60 000 (incluido el desmontaje) y la calibración \$80 000. Como se mencionó desde la introducción, esta técnica no pretende reemplazar las pruebas hechas en el banco sino detectar inicios de fallas de tal forma que se pueda programar la reparación o inspección de la bomba o inyectores con tiempo evitando paradas en servicio, sobre costos en los repuestos y daño de otros componentes del motor.

Como conclusión desde el punto de vista económico, la utilización del servicio de diagnóstico por parte del usuario con la técnica desarrollada en este trabajo puede representar las siguientes ventajas:

- Ahorro de combustible.
- Disminución en el desgaste de componentes del motor por mala calibración del sistema de inyección.
- Reducción de los costos de mantenimiento.
- Confiabilidad del automotor en la prestación del servicio.
- Mejoramiento en la calidad del servicio prestado al usuario.

ANEXO B. FICHA TÉCNICA DEL SENSOR HALL UTILIZADO

Geartooth Speed Sensors



- ▶ [Back To Main Products Page](#)
- ▶ [Sensor News](#)
- ▶ [Sensor FAQs](#)
- ▶ [Operating a Speed Sensor](#)
- ▶ [Operating a Reed Sensor](#)
- ▶ [Technical Articles](#)
- ▶ [Find a Rep](#)
- ▶ [Ask a Question](#)
- ▶ [Application Help](#)
- ▶ [Request a Sample](#)
- ▶ [Request a Catalog](#)

Search Site

Check Distributor Stock

INDUSTRIAL-GRADE GEARTOOTH SPEED SENSORS

Industrial-grade, Hall effect geartooth speed sensor with adjustable stainless steel housing.

- Sense Motion of Ferrous Geartooth Targets
- Near-Zero Speed Sensing Capability
- Immune from Hostile Environments
- Not Subject to Rotational Orientation
- High-Speed Capability
- Reverse Battery Protection to -24Vdc
- Wide Operating and Storage Temperature Range
- M12 Integral Connector Meets IEC60947 - 5 - 2
- Meet all IEC (International Electrotechnical Commission) Requirements for Heavy Industrial Environments, Assuring Immunity from:
 - Electrostatic Discharge
 - Electrical Transients
 - Radiated Electric Field
 - Conducted Energy



[download PDF](#)

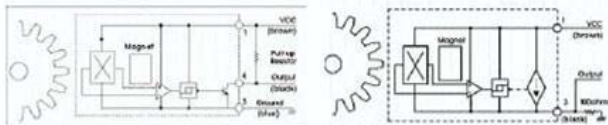
GS1001 - GS1004 SPECIFICATIONS

Part #	Operating Voltage Range (VDC)	Supply Current mA max.	Output	Output Saturation Voltage mV max.	Output Current mA max.	Operate Temp Range, C	Storage Temp Range, C	Thread	Barrel Length	Cable	Connector
GS100101	4.5 to 24	6	sink	700	25	-40 to 105	-40 to 106	M12-1	65mm		12mm circular
GS100102	4.5 to 24	6	sink	700	25	-40 to 125	-40 to 126	M12-1	65mm	22 AWG x 1m BBB	
GS100201	4.5 to 24	6	sink	700	25	-40 to 105	-40 to 106	M10-1	65mm		12mm circular
GS100202	4.5 to 24	6	sink	700	25	-40 to 125	-40 to 126	M10-1	65mm	22 AWG x 1m BBB	
GS100301	5 to 24	20	2-wire leads	—	—	-40 to 125	-40 to 126	M10-1	65mm	20 AWG x 1m BBB	
GS100301	4.5 to 24	6	sink	700	25	-40 to 105	-40 to 106	5/8" - 18	2.56"		12mm circular
GS100302	4.5 to 24	6	sink	700	25	-40 to 125	-40 to 126	5/8" - 18	2.56"	20 AWG x 1m BBB	
GS100303	5 to 24	20	2-wire leads	—	—	-40 to 125	-40 to 126	5/8" - 18	2.56"	20 AWG x 1m BBB	
GS100401	4.5 to 24	6	sink	700	25	-40 to 105	-40 to 106	3/4" - 16	2.56"		12mm circular
GS100402	4.5 to 24	6	sink	700	25	-40 to 125	-40 to 126	3/4" - 16	2.56"	22 AWG x 1m BBB	
GS100403	5 to 24	20	2-wire leads	—	—	-40 to 125	-40 to 126	3/4" - 16	2.56"	20 AWG x 1m BBB	

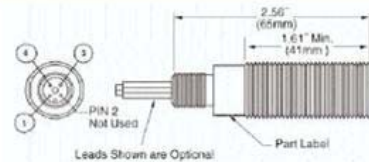
Interface recommendations

Notes: For sensors with integral connectors, mating cordsets are available from Cherry. Request Part Number AS000203 for a straight female connector or AS000204 for a right-angle female connector.

OPEN COLLECTOR SINKING BLOCK DIAGRAM



DIMENSIONS



ANEXO C. DIAGRAMA DE FLUJO *SubVI DETECTOR DE PULSOS.*

