



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
"PEDRO RUIZ GALLO"**



**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**

**TESIS**

**Para Optar el Título Profesional de:**

**INGENIERO MECÁNICO  
ELECTRICISTA**

**"Diseño de un sistema de inyección mixta  
agua-combustible para un motor Diesel y mejorar  
la eficiencia del grupo electrogeno de la Central  
Termica de Reserva Fria Eten"**

**Presentado Por:**

**Larrea Santa Cruz, Luis Felipe**

**ASESOR:**

**Ing. Mendez Cruz, Oscar**

**Lambayeque – Perú  
Diciembre del 2019**



# **UNIVERSIDAD NACIONAL "PEDRO RUIZ GALLO"**



**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**

## **TESIS**

**Para Optar el Título Profesional de:**

**INGENIERO MECÁNICO  
ELECTRICISTA**

**"Diseño de un sistema de inyección mixta  
agua-combustible para un motor Diesel y mejorar  
la eficiencia del grupo electrogeno de la Central  
Termica de Reserva Fria Eten"**

**Presentado Por:**

**Larrea Santa Cruz, Luis Felipe**

**Aprobado por el Jurado Examinador**

<b>Presidente</b>	<b>: Dr. Salazar Mendoza, Anibal Jesus</b>
<b>Secretario</b>	<b>: M.S.c. Aguinaga Paz, Amado</b>
<b>Miembro</b>	<b>: Ing. Tapia Asenjo, Robinson</b>
<b>Asesor</b>	<b>: Ing. Mendez Cruz, Oscar</b>

**Lambayeque – Perú  
Diciembre del 2019**



# UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”



**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**

## **TESIS**

### **TITULO**

**“Diseño de un sistema de inyección mixta  
agua-combustible para un motor Diesel y mejorar  
la eficiencia del grupo electrogeno de la Central  
Termica de Reserva Fria Eten”**

### **CONTENIDOS**

**CAPITULO I: PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN.**

**CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.**

**CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO.**

**CAPITULO IV: PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN**

**CAPITULO V: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS  
RESULTADOS.**

**CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

**CAPITULO VII: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.**

**CAPITULO VIII: ANEXOS.**

**AUTOR:** Larrea Santa Cruz, Luis Felipe

---

**PRESIDENTE**

---

**SECRETARIO**

---

**MIEMBRO**

---

**ASESOR**

## **DEDICATORIA**

Dedicado a mi madre y padre que fueron mi inspiración a seguir adelante y nunca rendirme, gracias por todo esto es por ustedes.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco en primer lugar a Dios por haberme guiado por el camino de la felicidad, a mis padres quienes han sido el pilar fundamental en mi vida, a mi abuelita que estuvo apoyándome siempre y a mi abuelo que me cuida desde el cielo, a mis amigos y jefes, gracias por todos los consejos y motivación que me han permitido que llegue a la exitosa culminación de mi tesis y a los docentes y maestros que me han acompañado durante el largo camino, brindándome siempre su orientación con profesionalismo ético en la adquisición de conocimientos y afianzando mi formación.

**Felipe Larrea**

## RESUMEN

El trabajo de investigación que se ha desarrollado, está enfocado al diseño y optimización de un Sistema de Inyección para Motores Diesel parte de un Grupo Electrónico, en donde la formación de una mezcla de Aire-Combustible a la cual se le inyectará Agua Desmineralizada por medio de la inyección directa, de manera que se logre una combustión eficiente a la vez que se minimicen las emisiones contaminantes.

Este sistema es muy interesante e innovador ya que es aplicable a los motores Diesel, con el sistema de inyección del tipo directa, que se encuentran actualmente en explotación para sistemas de inyección de combustible, prácticamente funciona en forma paralela al Sistema de inyección directa de combustible. Este sistema permite inyectar agua desmineralizada dentro de la cámara de combustión justo instantes antes que se produzca la máxima compresión y produzca la implosión, el agua se evapora para evaporarse consume una cantidad de calor, baja la temperatura dentro de la cámara de combustión.

Es necesario tener presente que en los motores Diesel se quema una mezcla heterogénea Aire-Combustible, esta combinación se comenzara a formarse dentro del cilindro desde el momento que penetra la primera gota de combustible pero que, una vez producida la implosión y el período de rápida combustión, coexiste, generalmente durante un tiempo, la formación de la mezcla con la propia combustión y por tanto la velocidad con la que ésta progresa está condicionada por aquélla a lo que la inyección de micro gotas de agua mejorara el proceso después de la combustión disminuyendo la temperatura en la cámara lo que generara vapor enfriando la cámara de combustión y eso disminuirá los gases de escape mejorando la relación de compresión, esto permite inyectar más masa de combustible, y se permite que se forme menos Óxido de Nitrógeno (NOx) quedando mejor preparando para la próxima combustión.

**PALABRAS CLAVES:** Diseño, Inyección de agua, motor Diesel, mezcla heterogénea, agua desmineralizada, combustión, implosión, relación de compresión, Grupo Electrónico.

## **ABSTRACT**

The research work that has been developed is focused on the design and optimization of an Injection System for Diesel Engines part of a Generating Group, where the formation of an Air-Fuel mixture to which it is injected with Water Demineralizes by means of of direct injection, in order to achieve efficient combustion while minimizing pollutant emissions.

This system is very interesting and innovative since it is applicable to diesel engines, with the injection system of the direct type, which are currently in operation for fuel injection systems, practically works in parallel to the direct fuel injection system. This system allows demineralized water to be injected into the combustion chamber just moments before maximum compression occurs and implosion occurs, water evaporates to evaporate, consumes a quantity of heat, lowers the temperature inside the combustion chamber.

It is necessary to bear in mind that in Diesel engines a heterogeneous Air-Fuel mixture is burned, this combination will begin to form inside the cylinder from the moment the first drop of fuel penetrates but, once the implosion and the fast period have taken place combustion, coexists, generally during a time, the formation of the mixture with the own combustion and therefore the speed with which this one progresses is conditioned by that to which the injection of micro drops of water will improve the process after the combustion decreasing the temperature in the chamber will generate steam and that will decrease the exhaust gases improving the compression ratio, allows to inject more mass of fuel, it is allowed to form less Nitrogen Oxide (NOx) and is better prepared better for the next combustion.

**KEY WORDS:** Design, Water injection, Diesel engine, heterogeneous mixture, demineralized water, combustion, implosion, compression ratio, Power Plant.

## ÍNDICE

DEDICATORIA.....	4
AGRADECIMIENTO .....	5
RESUMEN .....	6
ABSTRACT .....	7
ÍNDICE .....	8
ÍNDICE DE TABLAS .....	10
ÍNDICE DE FIGURAS .....	11
INTRODUCCIÓN .....	14
CAPITULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	15
1.1.    Realidad Problemática:.....	15
1.2.    Formulación del Problema: .....	16
1.3.    Delimitación de la Investigación.....	16
1.4.    Justificación e importancia de la investigación .....	17
1.5.    Limitaciones de la Investigación .....	17
1.6.    Objetivos de la Investigación .....	18
1.6.1.    Objetivo General.....	18
1.6.2.    Objetivos Específicos .....	18
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....	19
2.1.    Antecedentes de Estudios .....	19
2.2.    Desarrollo de la temática correspondiente al tema investigado .....	20
2.2.1.    El modelo energético mundial .....	20
2.2.2.    Motores de combustión interna .....	21
2.2.3.    Los motores MEC y MEP en la actualidad .....	31
2.2.4.    Atomización de la gota. ....	54
2.2.5.    Inconvenientes y desafíos que presenta la inyección de agua.....	59
2.2.6.    Campos de aplicación de los Sistemas de inyección de agua .....	59
2.3.    Definición conceptual de la terminología empleada.....	60
2.3.1.    Grupo Electrónico - Partes.....	60
2.3.2.    Motor Diesel .....	61
2.3.3.    Generador Eléctrico.....	78
2.3.4.    Sistema eléctrico y de control.....	81
2.3.5.    Sistemas de inyección con acumulador “Common Rail” .....	83
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO .....	98



3.1.	Tipo y diseño de investigación .....	98
3.1.1.	Tipo de investigación .....	98
3.1.2.	Diseño de Investigación .....	98
3.2.	Población y Muestra .....	98
3.3.	Hipótesis .....	98
3.4.	Variables – Operacionalización .....	98
3.5.	Métodos y Técnicas de investigación .....	101
3.6.	Descripción del(os) instrumento(s) utilizado(s) .....	101
3.7.	Análisis Estadístico e interpretación de los datos .....	102
CAPÍTULO IV: PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN .....		103
4.	Cálculos y Dimensionamiento .....	103
4.1.	Cálculo de Consumo de combustible en el Motor Diesel de Grupo Auxiliar de la Central Térmica de Reserva Fría Eten.....	103
4.2.	Cálculos en la Selección de la bomba. ....	104
4.3.	Diseño del circuito hidráulico .....	111
4.4.	Dimensionamiento del Circuito de combustible: Sistema de Alimentación. ....	117
4.5.	Diseño de la inyección .....	124
CAPÍTULO V: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS ....		127
5.1.	Planteamiento del Escenario. ....	127
5.2.	Modelo Planteado .....	129
5.3.	Necesidades de Agua desmineralizada:.....	129
5.4.	Propuesta Técnica .....	130
5.4.1.	Componentes del Sistema .....	130
5.4.2.	Selección de los equipos .....	130
5.5.	Metrado.....	136
5.6.	Evaluación Económica del Proyecto.....	137
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		140
6.1	Conclusiones .....	140
6.2	Recomendaciones .....	140
CAPÍTULO VII: REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....		142
ANEXOS .....		145

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características técnicas del motor en el que se va a ensayar.....	53
Tabla 2: Características del ciclo, del motor que se va a ensayar.....	53
Tabla 3: Propiedades del combustible y el agua Adaptado.....	56
Tabla 4: Operacionalización de las Variables.....	101
Tabla 5: Especificaciones técnicas del Grupo Auxiliar.....	106
Tabla 6: Velocidades recomendadas para fluidos en tuberías.....	113
Tabla 7: Parámetros para dimensionamiento de Cisterna de almacenamiento.....	121
Tabla 8: Datos del Agua desmineralizada.....	131
Tabla 9: Características tubos ASTM A53.....	133
Tabla 10: Valor Referencial para el suministro de materiales para el sistema inyección.....	138
Tabla 11: Relación de Combustible-Agua desmineralizada.....	138
Tabla 12: Costos de fabricación y montaje de Tanque de almacenamiento de agua desmineralizada.....	140

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Representación Suministro Nivel mundial.....	20
Figura 2: Diagrama de funcionamiento de un motor diésel .....	21
Figura 3: Ciclo de motor Diesel estándar de aire.....	25
Figura 4: Eficiencia del Motor Diesel.....	27
Figura 5: Balance de Calor del Motor Diesel.....	26
Figura 6: Mezcla Pobre.....	28
Figura 7: Flujo en la selección de salida de un orificio de inyección.....	31
Figura 8: Montaje de sistema de inyección de agua en el conducto de admisión.....	34
Figura 9: Montaje de sistema de inyección de agua directa en el cilindro.....	34
Figura 10: Esquema de sistema de inyección de agua directa al cilindro.....	35
Figura 11: Esquema de un sistema de alta eficiencia de cogeneración mediante un motor térmico.....	36
Figura 12: Comparación teórica de los ciclos ideales de un motor con inyección de agua y zin.....	37
Figura 13: Montaje de sistema de inyección directo al cilindro, mezclado con el combustible .....	38
Figura 14: Montaje de sistema de inyección de agua en el conducto de escape.....	39
Figura 15: Control de la válvula de escape y del inyector de agua.....	40
Figura 16: Esquema y control de sistema de inyección de agua para un motor de encendido provocado.....	42
Figura 17: Esquema de control del motor, para un motor de Escondido provocado.....	42
Figura 18: Presión del cilindro para diferentes valores del cociente Agua/Combustible.....	43
Figura 19: Diferentes reducciones de presión para diferentes cantidades de agua e incrementos de Presión, y los valores de la presión máxima del cilindro para diferentes cantidades de agua.....	43
Figura 20: Grado de inquemados, comparando el sistema de inyección de agua o sin él. Grado de aprovechamiento del combustible comparando la inyección de agua a otro motor sin el sistema.....	44
Figura 21: Comparación de la potencia, respecto la que se alcanzaría sin usar este sistema, para diferentes grados de carga y diferentes revoluciones.....	46
Figura 22: Comparación de la potencia, respecto la que se alcanzaría sin usar este sistema, para diferentes grados de carga a diferentes revoluciones.....	46
Figura 23: Comparación de la temperatura de los gases de escape, respecto la que se alcanzaría sin usar este sistema, para diferentes grados de carga a diferentes revoluciones.....	47
Figura 24: Comparación de la eficiencia, respecto la que se alcanzaría sin usar este sistema, para diferentes grados de carga a diferentes revoluciones.....	47
Figura 25: Comparación de la distribución de temperaturas en un motor de 2T, con el uso y no uso del sistema de inyección de agua.....	48
Figura 26: Comparación de la turbulencia que se crea en el cilindro, si se usa o no el sistema de inyección de agua.....	50

Figura 27: Apariencia de la mezcla de combustible diésel, y agua al 10%.....	51
Figura 28: Evolución de las temperaturas en el interior del cilindro, a lo largo de la carrera del pistón, función de la concentración de agua.....	52
Figura 29: Esquema de sistema de motor con inyección de agua sobrealimentado.....	52
Figura 30: Comparación de presión del cilindro para diferentes configuraciones de EGR e inyección de agua .....	54
Figura 31: Intervalo de valores de presión media del cilindro, con diferentes configuraciones de inyección de agua y de EGR .....	55
Figura 32: Intervalo de valores de emisiones de NOx y partículas, con diferentes configuraciones de EGR y agua.....	55
Figura 33: Representación del grado de atomización de la gota función de los números adimensionales. Para diferentes presiones. ....	57
Figura 34: Tamaño de gota más frecuente para diferentes métodos de inyección.....	58
Figura 35: Distribución del tamaño de gota: según la dirección y el momento en el que se inyecte.....	59
Figura 36: Bloque Motor.....	62
Figura 37: Junta Culata.....	63
Figura 38: Camisa de Cilindro.....	64
Figura 39: Pistón.....	65
Figura 40: Anillos.....	65
Figura 41: Bulón.....	66
Figura 42: Biela.....	67
Figura 43: Culata Individual .....	68
Figura 44: Cámara de Combustión.....	68
Figura 45: Válvula de Admisión y Escape.....	69
Figura 46: Árbol de levas.....	70
Figura 47: Cigüeñal.....	72
Figura 48: Cojinete Principal.....	72
Figura 49: Cojinete de Empuje.....	73
Figura 50: Sistema de circulación de combustible.....	75
Figura 51: Inyección Common Rail.....	76
Figura 52: Cylinder on Demand (Modificación en el Cigüeñal y Eje de Levas) .....	76
Figura 53: Sistema de Refrigeración.....	77
Figura 54: Sistema de Aire de arranque e Instrumentos.....	78
Figura 55: Sistema de Lubricación.....	79
Figura 56: Generador.....	80
Figura 57: Diagrama de funcionamiento del Alternador.....	81
Figura 58: Descripción del sistema UNIC C3.....	82
Figura 59: Esquema de un sistema Common Rail en un motor de 4 cilindros.....	85
Figura 60: Módulos del sistema Common Rail.....	87
Figura 61: Etapa de alta presión del sistema Common Rail.....	88
Figura 62: Acumulador de presión.....	90
Figura 63: Sensor de alta presión, Curva del sensor de alta presión.....	91
Figura 64: Esquema de una válvula limitadora de presión.....	92
Figura 65: Estructura de un inyector piezoeléctrico.....	94
Figura 66: Estructura de un inyector.....	95
Figura 67: Sección de una tobera de inyector de tetón.....	97
Figura 68: Sección de una tobera de inyector de orificios.....	98
Figura 69: Diagrama de ciclo diesel.....	108

Figura 70: Curvas de inyección de un sistema convencional (Izquierda) y de un sistema de un sistema Common Rail (derecha).....	128
Figura 71: Curva de selección de bomba.....	135
Figura 72: Tanque de almacenamiento.....	133
Figura 73: Filtros.....	136
Figura 74: Inyector tipo teton.....	137

## INTRODUCCIÓN

Una de las partes principales del Grupo Electrógeno es el motor Diésel a la vez de esta máquina térmica uno de los temas con más interés ha suscitado en los últimos tiempos ha sido el sistema de inyección de combustible. Este interés no es casual, ya que, del buen funcionamiento de este sistema dependerá en gran medida la calidad de la mezcla aire-combustible a la cual se le inyectará agua desmineralizada, y a su vez, de ésta dependerán parámetros tan importantes como son el rendimiento del motor y la emisión de contaminantes, más aun teniendo en cuenta las cada vez mayores exigencias en materia anticontaminante.

Es indudable que, si se pretenden mejorar las prestaciones del sistema de inyección de combustible, primero es necesario comprender profundamente todos los fenómenos involucrados en el propio sistema de inyección utilizados en la actualidad, entrando con un mayor nivel de detalle en el sistema de inyección Common Rail.

Posteriormente se aborda la descripción del flujo interno en toberas de inyección, donde se exponen los principales fenómenos que afectan al comportamiento del flujo: turbulencia, desprendimiento de capa límite, cavitación, etc. así como la influencia que la geometría de la tobera tiene en cada uno de estos fenómenos.

Sin embargo, a pesar de la influencia que tiene la configuración de los orificios de inyección sobre los procesos del inyección de combustión, se podrá mejorar la combustión con el sistema de inyección de agua que funcionará justo instantes antes que se produzca la máxima compresión y produzca la implosión, ayudará a preparar la cámara para la próxima combustión, esto conllevará a mejorar la relación de compresión lo que mejora la eficiencia (10%-25%) del motor diésel y esto repercutirá en el Generador a su vez en toda la eficiencia del Grupo electrógeno.

# CAPITULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

## 1.1. Realidad Problemática:

Como es de conocimiento general, en los motores Diesel a nivel Internacional, Nacional o local la combustión se realiza entre el combustible que se inyecta al aire comprimido caliente, cuya temperatura es de 450-550°C y la presión de 3 a 4 MPa ( 300 a 400 Kg/cm<sup>2</sup> )

Gran influencia sobre el proceso de la combustión en los motores Diesel ejerce el modo de organización del proceso de mezclado del combustible inyectado con el aire caliente que se encuentra comprimido en la cámara de combustión, así como la duración del período de retraso de la combustión.

Hay que tener en cuenta la influencia de algunos factores sobre el proceso de combustión en el motor Diesel, tales como:

- Propiedades de los combustibles, es decir, sobre la estructura y la composición química elemental del combustible, que influyen sustancialmente sobre la duración del período de retraso de la inflamación. Cuanto mayor sea el contenido de hidrocarburos parafínicos en el combustible tanto mayor será su número de Cetano y por consiguiente más corto el período de retraso y más suave el funcionamiento del motor.
- Las propiedades Físicas del combustible, su viscosidad, tensión superficial y volatilidad, también tienen influencia sobre el proceso de la combustión. Los dos primeros influyen sobre la calidad de pulverización, mientras que la volatilidad lo hace sobre la velocidad de formación de la mezcla aire- combustible.
- La relación de compresión: A medida que aumenta la relación de compresión, se eleva la presión y la temperatura del aire en el instante que comienza la inyección. Como consecuencia, los retrasos de la inflamación se reducen, la velocidad de crecimiento de la presión se reduce y el funcionamiento del motor es más suave.

- Angulo de avance a la inyección del combustible: Cuando el avance a la inyección es grande aumentan los retrasos de la inflamación, ya que la presión y la temperatura del aire en el instante del comienzo de la inyección disminuyen.
- Calidad de la pulverización y duración de la alimentación de combustible: El grado de pulverización mejora al elevar la presión de inyección.
- Frecuencia de rotación: La variación de la frecuencia de rotación del cigüeñal influye sobre el coeficiente de llenado del cilindro (y por consiguiente sobre la presión del aire al final de la compresión), la calidad de pulverización del combustible, la intensidad del movimiento en torbellino del aire y sobre el estado térmico de la cámara de combustión.

Teniendo en consideración lo anterior y los problemas propios de la combustión es que se está planteando este trabajo de Investigación que consiste en el diseño y optimización de la inyección de agua en la cámara de combustión de un Grupo Electrógeno, para obtener una mezcla aire-agua combustible de modo de lograr una combustión más eficiente y a la vez disminuir los gases contaminantes.

## **1.2. Formulación del Problema:**

¿En qué medida el diseño de un sistema mixta usando aire combustible e inyección de agua contribuirá a mejorar la eficiencia del grupo auxiliar Wartzila 20 V34DF-A2 en la central Térmica de la planta de Reserva Fría de Eten?

## **1.3. Delimitación de la Investigación**

Esta investigación se realizó en la planta de la central reserva fría de Eten, en el Grupo Wartzila cuando funcione quemando gas oíl como Combustible.

El espacio geográfico, lugar donde se llevó a cabo la investigación fueron Los ámbitos de la planta que se encuentra en el camino a Eten y que pertenece a la Empresa COBRA SA.



El encargado de realizar la investigación es el Br. Felipe Larrea Santa Cruz y tendrá una duración aproximada de 6 meses.

#### **1.4. Justificación e importancia de la investigación**

Este tema de investigación es relativamente nuevo desde la segunda Guerra mundial, al obtener una mezcla aire- combustible agua como resultado de inyectar agua en la cámara de combustión y fue realizado por Bosh, pues como resultado de la inyección de agua y aprovechando la transformación física del agua al transformarse en vapor tomando calor de la cámara de combustión y por lo tanto disminuyendo la temperatura de la misma con lo que se logra que ingrese mayor cantidad de combustible por un lado mejorando la potencia cuando aumenta la carga; aumenta la relación de compresión mejorando la combustión, permite también que se forme menos óxidos de nitrógeno disminuyendo la contaminación ambiental, y por otro lado también disminuir la cantidad de CO<sub>2</sub>.

Implementando este diseño de sistema de inyección mixta aire- agua a un Grupo Auxiliar se contribuirá a disminuir el consumo de combustible, disminuir los decibeles (ruido) y a la vez reducir óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) que son producidos por la combustión por la alta temperatura de la cámara de combustión, lo que conllevará a mejorar la eficiencia del Grupo Electrónico de 8.4 MW (Wartsila 20V34DF) de la empresa EMCI-COBRA ubicada en Reque- Chiclayo.

#### **1.5. Limitaciones de la Investigación**

Actualmente, ningún grupo electrónico usa la inyección de agua para mejorar la combustión en la cámara, de manera de disminuir la emisión de gases contaminantes que tienden a mejorar la eficiencia del motor y limpieza de la cámara de combustión eliminando los residuos sólidos como carbonilla, hollín y otros gases del ciclo anterior.

Por lo tanto, no existe información técnica al respecto, salvo la suministrada por Bosh desde la segunda guerra mundial en el uso de los motores de avión y en motores de combustión interna de Tanques en la segunda guerra mundial

## **1.6. Objetivos de la Investigación**

### **1.6.1. Objetivo General**

Diseño de un sistema inyección de agua para mejorar la eficiencia del grupo auxiliar de la “**Central Térmica de Reserva Fría Eten**”.

### **1.6.2. Objetivos Específicos**

1. Analizar el rendimiento del grupo electrógeno de la Central Térmica de Reserva Fría Eten.
2. Evaluar los principales parámetros de un sistema de inyección mixta
3. Evaluación técnica-económica del sistema de inyección mixta agua-combustible.

## **CAPITULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Antecedentes de Estudios**

En el ámbito de los sistemas de producción de potencia los motores de combustión interna alternativos encuentran su aplicación en: la generación de energía eléctrica (motores que accionan generadores eléctricos desde potencias de menos de 1 kW hasta potencias de más de 80 MW), - los sistemas propulsivos (automoción, vehículos agrícolas y de obras públicas, marítima, ferroviaria, aérea), otras aplicaciones (motobombas, motosierras, otras herramientas motorizadas, etc.). A partir de los años cincuenta del pasado siglo comienza en el estado de California la preocupación por las emisiones gaseosas de los motores de combustión interna alternativos de automoción y aparecen las primeras normativas para su regulación en dicho estado. Posteriormente, estas normativas se extienden al resto de EEUU y otros países como Japón y más tarde a Europa. Las sucesivas crisis del petróleo de 1973 y la de 1979 y la preocupación asociada por el posible agotamiento del petróleo, así como por la contaminación atmosférica conduce el desarrollo de los motores, no ya sólo en el campo de la automoción si no también en otros campos, por el camino de la mejora integral de todas sus prestaciones no sólo de la potencia específica (kW/l), como había sido hasta entonces, si no también del consumo específico y de las emisiones gaseosas y sonoras. Así, la normativa que regula estos parámetros ha ido haciéndose cada vez más restrictiva y ha supuesto un gran reto para la industria del motor ya que la reducción conjunta de estos parámetros (consumo y emisiones gaseosas y sonoras) y aumento de la potencia específica es un objetivo difícil de conjugar. En esta hoja de ruta, la dieselización de la potencia instalada con motores alternativos a nivel mundial ha crecido sobremanera en las últimas décadas del pasado siglo y en lo que va de éste. Esta dieselización, en el contexto expresado anteriormente, ha supuesto un acicate notabilísimo en el desarrollo y mejora del diseño de estos motores en todas sus aplicaciones. Como es sabido, a causa del principio de funcionamiento de los motores Diesel, el proceso de combustión y por ende el sistema de formación de mezcla, del que

depende los Sistemas de Inyección en Motores Diesel fuertemente aquél, es de vital importancia. Este trabajo se circunscribe en este contexto y trata de completar e integrar la formación del autor en este campo. No trata por tanto de presentar nada nuevo si no de tratar de manera estructurada los sistemas de inyección de los motores Diesel recopilando lo publicado en distintas referencias bibliográficas e integrándolo en un cuerpo de doctrina con un hilo conductor. Los objetivos del trabajo pueden resumirse en dos puntos:

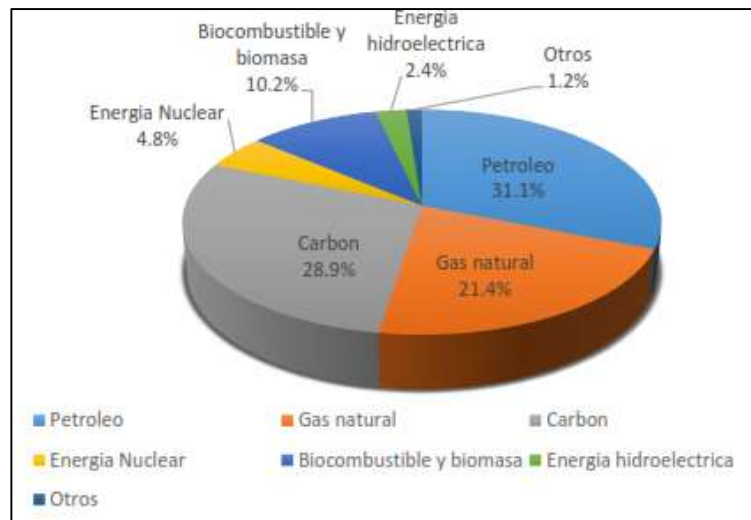
- Realizar una revisión ordenada e integral de los sistemas de inyección de los motores Diesel (parámetros que los caracterizan, principio de funcionamiento, elementos esenciales, control) desde los más simples a los actuales más sofisticados y precisos.

## **2.2. Desarrollo de la temática correspondiente al tema investigado**

### **2.2.1. El modelo energético mundial**

Desde el advenimiento de la revolución industrial, el consumo energético mundial ha crecido de forma continuada. En 1890 el consumo de combustibles fósiles alcanzó al de biomasa utilizada en la industria y en los hogares. En 1900, el consumo energético global supuso 0,7 TW ( $0,7 \times 10^{12}$  Watts).

El modelo energético mundial actual se basa casi en su totalidad en el consumo de combustibles fósiles en el 2013 es de 31.1% corresponde al petróleo, 21.4% corresponde al gas natural y el 28.9% corresponde al carbón, lo cual nos da el 81.4% que sería el total.



**Figura 01: Representación Suministro Nivel mundial.**

*Fuente: El autor*

### 2.2.2. Motores de combustión interna

El motor Diesel es un motor de combustión interna alternativo de encendido por compresión. La combustión de la mezcla se inicia por el autoencendido del combustible que tras ser inyectado en la cámara de combustión al final de la fase de compresión se ha evaporado y mezclado con el aire. Los motores Diesel son los motores de combustión interna alternativos más eficientes, pudiendo sobrepasar un rendimiento del 50% en el caso de los grandes motores lentos. El menor consumo de combustible tiene como resultado un menor nivel de contaminación, esto destaca la importancia del motor diesel. Pueden ser diseñados para trabajar con un ciclo de 2 o de 4 tiempos dependiendo de su aplicación. En la automoción casi siempre se usa el de 4 tiempos; las principales aplicaciones del de 2 tiempos son en el campo naval y el ferroviario, y en los motores estacionarios para la generación de energía eléctrica.

- **Proceso de Combustión**

El proceso de combustión en el motor Diesel que influye fuertemente en factores tales como el rendimiento, las emisiones de los gases de escape y el nivel de ruido, depende en gran medida de cómo se prepara la mezcla aire-combustible.

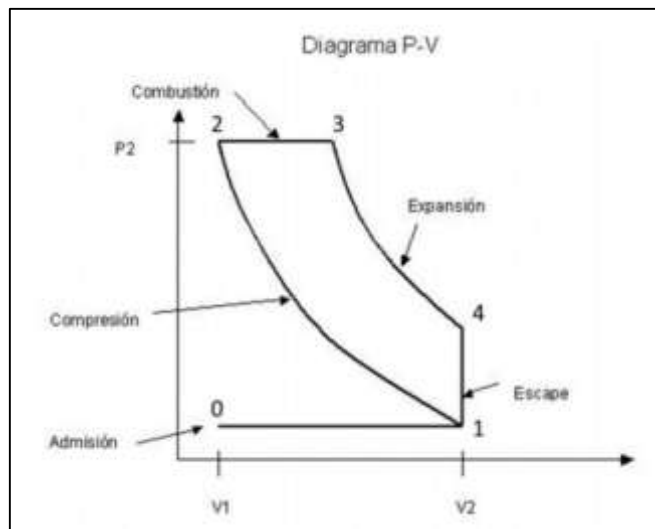
Los parámetros de la inyección más influyentes en la calidad de la mezcla formada son principalmente:

- Inicio de la inyección
- Curva de inyección y duración de la inyección
- Presión de inyección
- Número de inyecciones

En los motores diésel, los gases de escape y el ruido de la combustión, se pueden reducir en gran parte con medidas dentro del motor, es decir, controlando el proceso de **combustión**.

#### 2.2.2.1. Ciclo diésel de 4 tiempos o cuatro carreras

En los motores diésel, el ciclo de trabajo se realiza en dos giros del eje cigüeñal y está conformado por: admisión, compresión, combustión o explosión y escape. La figura siguiente nos indica el ciclo de funcionamiento del motor diésel teórico.



**Figura 02: Diagrama de funcionamiento de un motor diésel.**

*Fuente: El autor*

*(0 – 1) Carrera de admisión o aspiración:*

Se abre la válvula de admisión, cuando el pistón está en el punto muerto superior (PMS), gira el cigüeñal, el pistón se desplaza hacia el punto muerto inferior (PMI) y permite la entrada de aire dentro del cilindro.

*(1 – 2) Carrera de compresión:*

Idealmente el proceso es isentrópico (entropía constante) Se cierra la válvula de admisión, gira el cigüeñal, el pistón se desplaza hacia el punto muerto superior (PMS) y comprime el aire contenido dentro del cilindro, aumentando su temperatura y presión.

*(2 – 3) Calentamiento instantáneo de la sustancia a presión constante:*

Las válvulas se mantienen cerradas y el pistón se encuentra en el PMS dentro del cilindro. En este instante entra el combustible pulverizado a través del inyector y se mezcla con el aire caliente generando la ignición con múltiples explosiones las cuales encienden parte del combustible. Se mantiene la presión, pero el volumen aumenta (aire + combustible).

*(3 – 4) Carrera de expansión o de trabajo, idealmente el proceso es isentrópico:*

Al inflamarse la mezcla se produce una transformación de la energía química del combustible en energía calórica produciéndose los gases de la combustión los mismos que hacen que el pistón descienda rápidamente hacia el PMI completando el giro del cigüeñal.

*(4 – 1) Rechazo o expulsión instantánea de los gases de la combustión a volumen constante:*

Se mantiene constante el volumen, pero existe una transferencia de calor inmediatamente a través de las paredes desde adentro de la cámara de combustión hacia fuera de la misma.

*(1 – 0) Carrera de escape:*

Se abre la válvula de escape para la eliminación de los gases quemados producidos en la combustión, además se cede el calor a la atmósfera. El pistón sube hasta el PMS, para repetirse el ciclo.

#### **2.2.2.2. Combustión Diesel.**

En los motores de unidades por compresión (Diesel) la combustión se produce cuando el combustible que se inyecta en estado líquido, pasa al estado gaseoso, atomizado por medio de los inyectores y mezclándose con el aire para utilizar todo el oxígeno necesario. Tras este fenómeno, la combustión se genera en puntos localizados de la cámara de combustión por autoencendido.

Si atendemos bien, observamos que la mezcla y la combustión, son procesos que se producen de la forma prácticamente instantánea y además, sin límite entra el combustible que se está mezclando con el aire nuevo y el que se está quemando.

Bajo estas premisas, el combustible no tiene nada de tiempo para poder formar la mezcla, lo que condiciona mucho las características del sistema de inyección y funcionamiento de motor, limitando al dosado admisible (proporción de los componentes de la mezcla) como el régimen de giro.

Ahora bien, si nos fijamos tanto en los motores de gasolina como Diesel, los elementos que cuentan para que se generen la mezcla son muy similares, quiere decir que, ambos sistemas cuentan con depósitos de combustible, conductos, bombas de combustible, Filtros de combustible, Bomba de inyección, tubería de alta presión para los inyectores.

El modo en que trabajan es muy semejante. Por un lado, de la bomba de suministro (normalmente de paletas) eleva el gasoil desde el depósito hasta la bomba de alta presión, alimentándola con una presión de lo más constante posible (0,75 bar), haciendo pasar el combustible por un filtro, donde eliminará tanto las burbujas que puedan existir como partículas que pueden dañar la bomba de inyección y los inyectores.

Hay que prestar mucha atención a los filtros en estos tipos de motores, ya que deben tener un mantenimiento adecuado para que el sistema de inyección trabaje correctamente.

Por otro lado, la bomba de inyección es encargada de suministrar la cantidad necesaria de combustible, ejerciendo a su vez de regulador, y con la presión necesaria, para que, cuando el combustible entre a la cámara, se distribuya de forma que pueda combinarse con el aire disponible dentro del cilindro.



Esta leva, esta arrastrada por medio del motor, con el fin de que la combustión sea la más eficiente posible, el inicio de esta ha de estar bien calibrado, de modo que el inicio se adelante o se retrase según el punto de funcionamiento. Para esto las bombas tienen una serie de sistemas correctores, que actualmente son sistemas de regulación electrónica.

Las bombas de inyección, hasta hace unos pocos años, han estado generando presiones alrededor de 1000 bar. En la actualidad las presiones máximas se encuentran entre los 1500 y 2000 bar.

Para poder producir tanta presión deben ser elementos muy robustos al igual que los conductos que transportan el combustible a esas presiones. Estos conductos se fabrican con tubos de acero sin soldadura, con unos diámetros interiores de hasta 2 mm y paredes de 3 mm.

En cuanto a conductos hay tantos como cilindros e inyectores tenga el motor. Dado que en su interior se genera fuertes efectos dinámicos, es conveniente que todas las tuberías tengan la misma geometría (longitud y calibre) con el fin de que las sobrepresiones producidas afectan a todos por igual.

Los últimos componentes de la cadena son los inyectores. Estos se encargan de repartir el combustible dentro del cilindro.

La punta de los inyectores contiene orificios a través de los cuales reparte el combustible inyectado. Estos orificios están tapados o cerrados por medio de la aguja del inyector en estado de reposo mediante un resorte o muelle; este se mueve en el momento que la presión alcanzada unos valores mínimos, y es en este punto, cuando el combustible levanta la aguja liberando los orificios, a través de los cuales entra a gran velocidad en la cámara de combustión. Dicho chorro de gas Oil se rompe evaporándose y mezclándose con el aire para generar la mezcla.

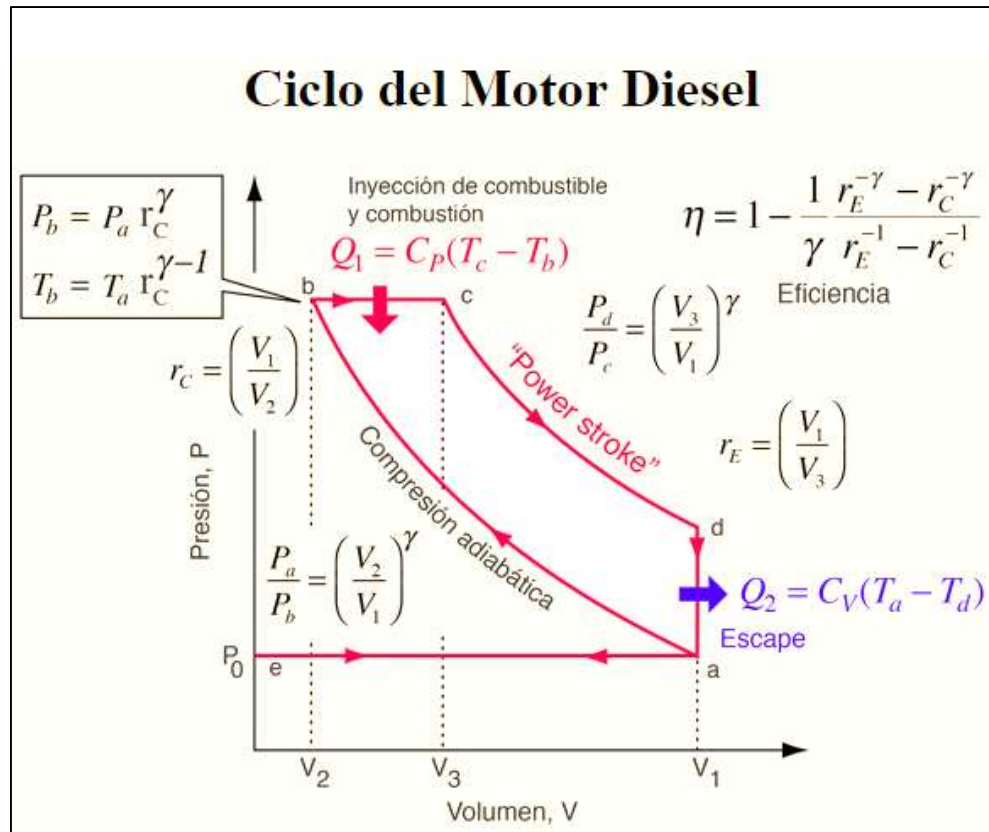
#### **2.2.2.3. Eficiencia del Ciclo Diesel**

En el ciclo Diesel la compresión y la descarga de potencia de este ciclo son adiabáticos, se puede calcular la eficiencia a partir de los procesos a presión y a volumen constantes. Las energías de entrada y salida y la eficiencia, se pueden calcular a partir de las temperaturas y calores específicos:

$$Q_1 = C_p(T_c - T_b)$$

$$Q_2 = C_v(T_a - T_d)$$

$$\text{Eficiencia} = \eta = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} \quad (1)$$



**Fig.03: Ciclo de motor Diesel estándar de aire**

Fuente: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/thermo/diesel.html>

Es conveniente expresar esta eficiencia en términos de la relación de compresión  $r_c = V_1/V_2$  y la relación de expansión  $r_E = V_1/V_3$ .

- La eficiencia se puede expresar en términos de los calores específicos y temperaturas la eficiencia se puede escribir (según nomenclatura del autor)

$$\eta = 1 - \frac{1}{K} \frac{r_p^k - r_c^{-\gamma}}{(r_p \cdot r_c^{k-1} \cdot T_1 - r_c^{K-1})}$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{K r_c^{k-1} (r_p - 1)}$$

- Eficiencia del motor Wartsila W20V34DF:

<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Eficiencia del motor: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ La tasa entre la energía del combustible de entrada y la energía producida.</li> </ul> </li> <li>■ Eficiencia eléctrica: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ La tasa entre la energía del combustible de entrada y la energía eléctrica producida.</li> </ul> </li> <li>■ Eficiencia efectiva: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ El grado de utilización del ingreso de combustible versus la salida eléctrica o mecánica.</li> </ul> </li> <li>■ Eficiencia total: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ La cantidad de energía de combustible total que se puede convertir en electricidad y calor.</li> </ul> </li> <li>■ La eficiencia efectiva es un buen indicador de la condición del motor y debe entonces seguirse de cerca.</li> <li>■ Cuando la eficiencia efectiva desciende, el consumo de combustible del motor y la temperatura del gas de escape se elevan y tanto los costos de combustible como los de motor sufren.</li> </ul>	<p>Grupo electrógeno 50 Hz/ 750 rpm</p>	
		Eficiencia eléctrica [%]
	W9L20	41,8
	W20V32	46,2
	W20V32GD	44,7
	W20V34DF	44,8 (44,3)
	W20V34SG	46,3
	W20V32	46,0
	W18V46	46,8
	W18V46GD	45,3
	W18V50DF	48,0 (45,4)
	W18V50SG	48,6

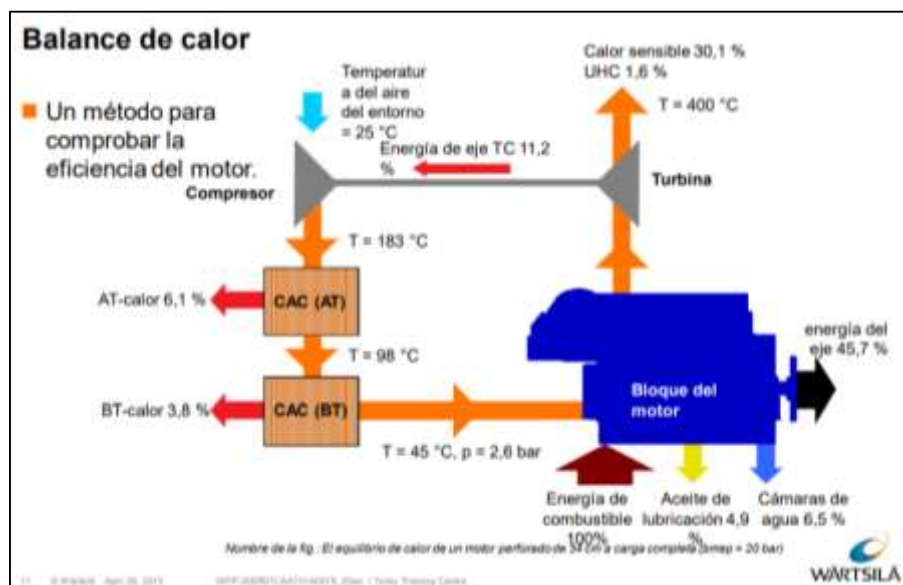
En modo combustible líquido.

**Figura 4: Eficiencia del Motor Diesel**

Fuente: Catálogo del fabricante

#### 2.2.2.4. Balance de Calor.

Se le denomina balance, porque la suma del trabajo y de las pérdidas (salidas) debe ser igual al trabajo que puede desarrollar la energía suministrada (entradas). De toda la energía térmica del combustible empleada sólo se utiliza una parte para producir trabajo útil, mientras que el resto se consumirá según el siguiente gráfico:



**Figura 5: Balance de Calor del Motor Diesel**

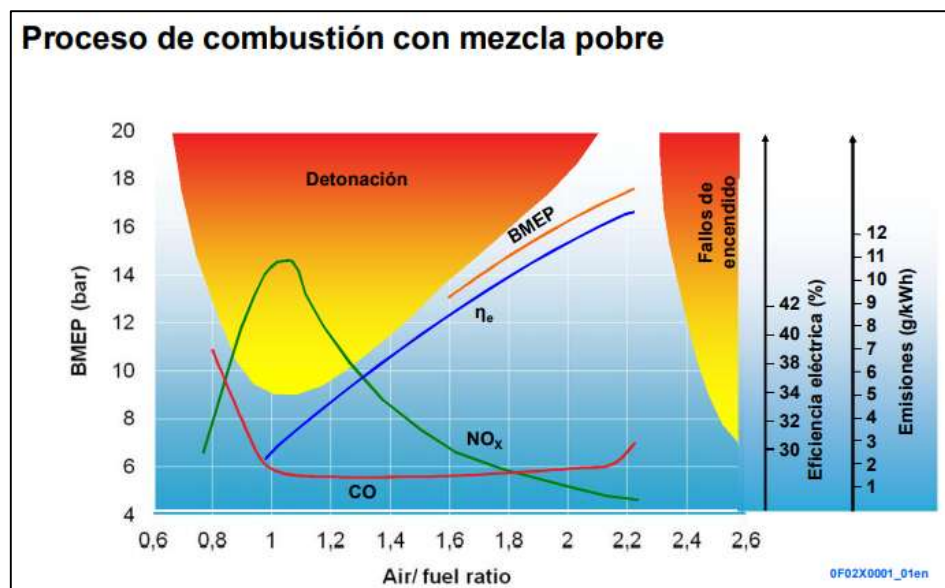
*Fuente: Manual O&M Wartsila*

#### 2.2.2.5. Combustión con Mezcla Pobre

Es el proceso en donde no es necesario que la mezcla sea estequiométrica, o sea, que tenga unas proporciones más o menos fijas de aire y combustible, por lo que pueden funcionar con dosados relativos menores a la unidad.

Una mezcla pobre es generalmente cuando existe mayor cantidad de aire que la que corresponde a la mezcla estequiométrica.

- El funcionamiento teórico de este tipo de motor,



**Figura 6: Mezcla Pobre**

*Fuente: Manual O&M Wartsila*

#### 2.2.2.6. Flujo de Cantidad de movimiento

La medida del flujo de la Cantidad de Movimiento está basada en la medida de la fuerza de impacto del chorro. Una de las partes del motor Diesel que más interés ha suscitado en los últimos años es el sistema de inyección. Del buen funcionamiento de este sistema dependerá en gran medida la calidad de la mezcla aire/combustible, y a su vez, de ésta dependerán parámetros tan importantes como son el  $\eta$  (eficiencia) del motor y la emisión de contaminantes, más aún teniendo en cuenta las cada vez mayores exigencias en materia anticontaminante.

Es indudable que, si queremos mejorar las prestaciones del sistema de inyección, primero es necesario comprender todos los fenómenos involucrados en el proceso de inyección, y más concretamente, la geometría de los orificios de descarga.

De la geometría de estos dependerá las características del flujo interno, y de las condiciones del flujo justo a la salida del orificio dependerá al comportamiento del chorro de inyección.

Sin embargo, a pesar de la influencia que tiene la configuración de los orificios de inyección sobre los procesos de inyección y combustión, la física del flujo en el interior de estos orificios es actualmente muy poco conocido, Este desconocimiento está justificado en parte por la enorme dificultad de estudiar al flujo interno, debido principalmente a los siguientes factores:

- Las pequeñas dimensiones de los orificios. Estos suelen tener longitudes características de 1 mm y diámetros que están en décimas de mm.
- Alta velocidad del flujo. Debido a los altos gradientes de presión a los que es tan sometidos las toberas con el fin de favorecer los fenómenos de atomización.
- Pulverización del chorro en pequeñas gotas y los procesos de mezcla de Aire/Combustible, la velocidad del flujo en el interior de los orificios puede llegar a varios cientos de m/s.
- El flujo es fuertemente transitorio, con duraciones de inyección máximos del orden del milisegundo, en los que el flujo está fuertemente influenciado por la dinámica de la aguja, sobre todo al principio y al final de la inyección, y sometido a condiciones ambientales de temperatura y presión muy variables.
- Estas características hacen que el estudio experimental del flujo en el interior de los orificios de las toberas de inyección sea de bastante complicado.

Con el fin de ayudar a mejorar la comprensión sobre el proceso de inyección, la física del flujo interno y la influencia que tiene ésta sobre el comportamiento del chorro, aquí se presenta una nueva técnica

experimental en la cual se mide el **flujo de cantidad de movimiento (fcdM)** de un chorro de inyección.

Este parámetro se muestra como uno de los más importantes a la hora de estudiar experimentalmente el proceso de inyección ya que:

- Desde el punto de vista del estudio del flujo interno en la tobera de inyección, la medida del fcdM aporta mucha más información que simplemente medir el flujo masico, ya que, utilizando estas dos medidas, es posible obtener parámetros tan importantes como la velocidad de salida o la sección de paso efectiva.
- Desde el punto de vista del estudio del chorro, es bien conocido que parámetros tan importantes como penetración, ángulo o aire englobado dependen en gran medida del fcdM.

#### **2.2.2.7. Flujo de cantidad de movimiento de un Chorro**

La cantidad de movimiento, 0 momento lineal, se define como el producto de la masa y la velocidad en un instante determinado. Por lo tanto, al igual que la velocidad se tratará de una magnitud vectorial.

Trasladando este concepto a un fluido a través de una sección se obtiene el flujo de cantidad de movimiento.

Conceptualmente el fcdM se puede entender como el producto del flujo masico y la velocidad.

- La fórmula general para calcular el fCdM a través de una superficie de control dada se define mediante la ecuación:

$$\dot{M} = \int_{SC} \rho V (V \cdot n) dA$$

$\dot{M}$  : Flujo de cantidad de movimiento

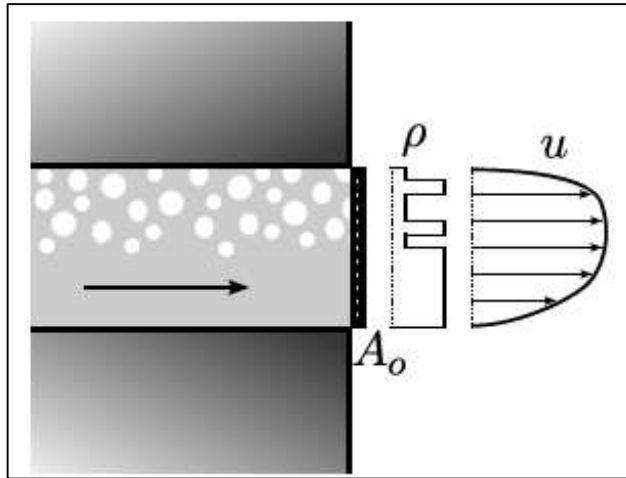
$V$  : Velocidad

$dA$  : Diferencial de área

$n$  : Vector unitario normal

- $\dot{M}$ ,  $V$  y  $n$  tiene carácter vectorial.

- Aplicando esta fórmula la sección de salida de un orificio de inyección se tiene ver figura, y considerando



**Fig. 7: Flujo en la sección de salida de un orificio de inyección**

*Fuente: Arcoumanis, C., (2000)*

$h_g$  = Flujo de la sección de salida de un orificio de inyección

- Únicamente la componente axial perpendicular a la superficie de control, se obtiene la ecuación

$$\dot{M} = \int_{A_0} \rho u^2 dA$$

$A_0$  = Área Geométrica

$u$  = Velocidad en la dirección axial

$\rho$  = Perfil de densidad

Este perímetro será pues el flujo de cantidad de movimiento a la salida del chorro sobre el que estamos hablando.

### 2.2.3. Los motores MEC y MEP en la actualidad

En la actualidad el diseño se ha ido modificando tanto en los motores MEP y MEC, para conseguir principalmente tres objetivos.

- Mejores rendimientos.
- Mayores prestaciones.

- Menores emisiones de contaminantes.

Los motores MEC en la actualidad, constan de inyección directa de combustible, 4 válvulas por cilindro y se trabaja con una tecnología cada vez más avanzada en la sobrealimentación. Las emisiones de CO<sub>2</sub> son comedidas pero el mayor problema lo tienen con las emisiones de NO<sub>x</sub> y partículas, las cuales con las normativas anticontaminación obliga a realizar post-tratamiento de los gases, que son muy costosos pero necesarios para poder homologar el producto. Los motores MEP en la actualidad, se está optando por la inyección directa y 4 válvulas por cilindro al igual que los de encendido por compresión. Se está optando por una fuerte sobrealimentación y reducir la cilindrada del motor “Downsizing”, compensando la baja potencia a bajas revoluciones con la sobrealimentación. El problema de estos motores es el bajo rendimiento y el consumo específico comparado con un motor MEC, para ello es necesario aumentar el rendimiento del ciclo que es dependiente de la relación de compresión, sin que se auto inflame la mezcla

#### **2.2.3.1. Métodos de Inyección de agua.**

La inyección de agua consiste en inyectar agua mezclada con combustible en el cilindro (Cámara de combustión), en un determinado tiempo, medido por el ángulo recorrido por el cigüeñal, bajo unas condiciones de presión y temperatura, con un ángulo respecto a la horizontal (en este caso representado por la base del cilindro), todo ello realizado mediante diferentes procedimientos según el tipo de motor y prestaciones buscadas. Inyectar agua conlleva variaciones en el proceso de combustión:

- Disminuir la temperatura máxima, con ello podemos aumentar las relaciones de compresión, conseguir mejores rendimientos, y mejores potencias indicadas.



$$\text{Ecuación del rendimiento ideal. } \eta = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \dots \dots \dots (1)$$

***Ecuación 1: Ecuación del rendimiento ideal***

**C**

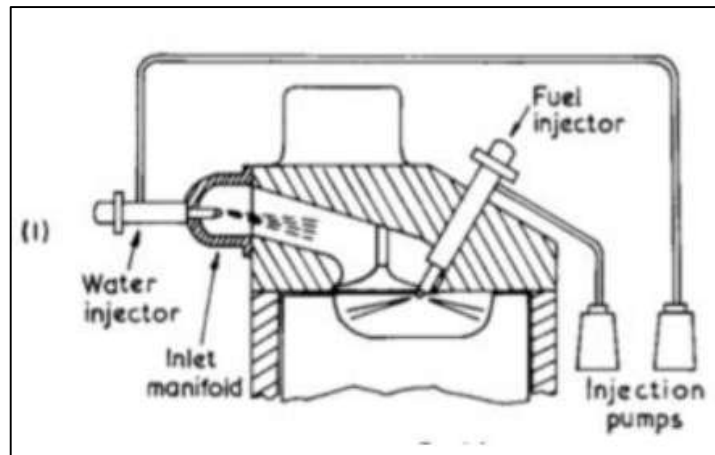
- Temperatura de formación, aproximadamente a partir de 1400°C
- Un mayor control de las presiones y temperaturas a lo largo del ciclo termodinámico.
- Una menor temperatura de los gases de escape provoca dos mejoras sustanciales:
- Debido a los ciclos elementales de Diesel, una máquina térmica funciona entre un foco caliente y un foco frío. Cuanto mayor es la diferencia de nivel térmico entre ambas mayor trabajo podremos obtener de la misma.

$$\eta = 1 - \frac{T_c}{T_f} \quad (3)$$

***Ecuación: Ecuación del ciclo elemental de Diesel***

#### **2.2.3.1.1. Inyección en el conducto de admisión de aire.**

Se inyecta agua en el conducto de la admisión de aire mediante un inyector de diámetro elevado (+-0,50mm), a una presión de 175 Atm, aproximadamente. La inyección de agua se realiza en el punto muerto superior del cilindro. Este mecanismo de inyección posee un límite de la mezcla de agua/combustible, en el cual no se produce encendido, por la excesiva humedad de la mezcla. En el trabajo de Mingrui et al [5] el mecanismo usado es una bomba de agua externa accionada por el cigüeñal del motor, que se une por tuberías de cobre, a los inyectores.

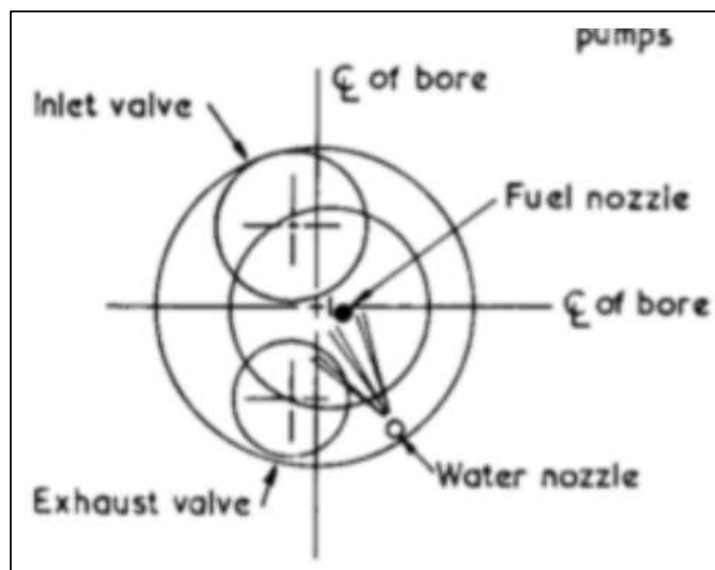


**Figura 8: Montaje de sistema de inyección de agua en el conducto de admisión**

*Fuente: G. Greeves, 1977.*

#### 2.2.3.1.2. Inyección de agua directa al cilindro.

Se inyecta agua directamente al cilindro por medio de una bomba e inyectores independientes. En este caso se usan inyectores de diámetro menor (+0,32mm), y convenientemente de tres orificios, a una presión de 165 Atm. Para llevarlo a cabo, se usa una bomba auxiliar, accionada por el cigüeñal del motor, y unida al inyector por medio de tubería de cobre. Presenta la ventaja de poder variar además de la **relación de Agua/Combustible**, seleccionar el tiempo exacto en el que se realiza la inyección pudiéndose retrasar o adelantar en función de las especificaciones que se quieran conseguir.



**Figura. 9: Montaje de sistema de inyección de agua directa en el cilindro.**

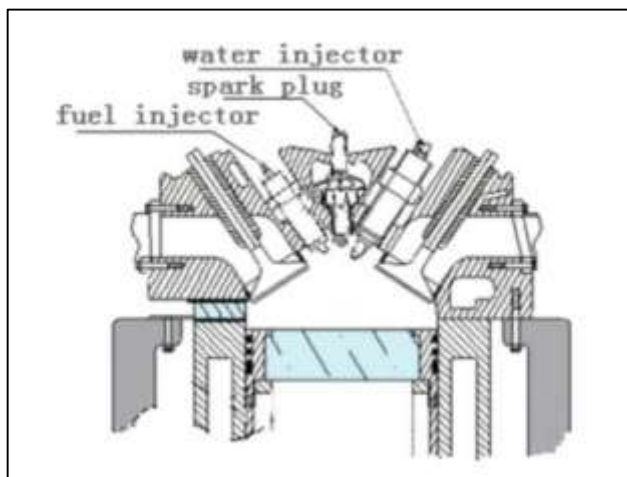
*Fuente: G. Greeves, 1977.*

En los estudios de Fabio Bozza se inyecta el agua directamente en el cilindro en un motor de gasolina de 2 cilindros y 8 válvulas.

El método que se ha usado, con un controlador modular VVA se controlan las válvulas de admisión mediante un sistema electrohidráulico y con dos puertos de inyección, uno por cada cilindro, se inyecta el agua justo en el punto de PMS. Este motor está acompañado de una sobrealimentación mediante turbocompresor, caracterizado por una máxima velocidad de rotación de 255,000 rpm, lo cual hace mucho más eficiente el diseño.

En los trabajos de Mingrui et al. [6] se establece un sistema de inyección mediante inyector diferenciado de agua y combustible controlados mediante la ECU del motor. En un motor mono cilíndrico de encendido provocado.

Los estudios reflejan que el sistema es mucho más eficiente si se combina con un cilindro asimétrico que eleva la turbulencia de los fluidos de mezcla y consigue una mayor homogeneización de la mezcla.



**Figura 10: Esquema de sistema de inyección de agua directa al cilindro.**

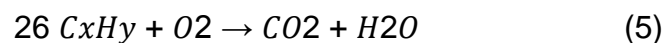
*Fuente: W. Mingrui, 2017*

Los investigadores Fabian Hoppe, describen un sistema de inyección de agua en el cilindro, el cual para un mayor rendimiento y eficiencia del sistema se recurre al uso de ciclos no convencionales, el ciclo Miller. Se establece la inyección en un motor mono-cilíndrico (MEP) con una entrada de admisión y una salida de escape en disposición simétrica. La relación de compresión es de 13.5, más elevada de lo habitual para un motor de

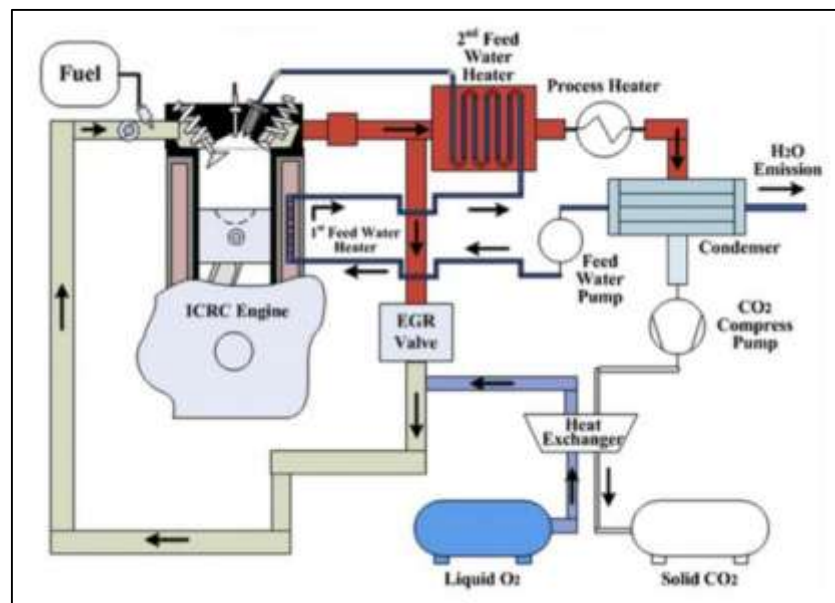
encendido provocado, lo cual provoca un mejor rendimiento térmico del ciclo.

En el ámbito de la Cogeneración, y de la producción eléctrica, los investigadores Zhi-Jun Wu., establecieron un sistema de alta eficiencia, con el uso combustible Oxyfuel e inyección de agua. Orientado a un motor MEP. Se establece un sistema el cual el agua que va a ser inyectada es previamente pasada por dos etapas de radiadores. La primera etapa es de utilidad para refrigerar el motor haciéndose pasar el agua por las paredes del motor. La segunda etapa refrigera los gases de escape. Finalmente, el agua es inyectada en el cilindro a una temperatura más elevada que en los anteriores casos lo que provoca un menor efecto, no obstante, se ha conseguido aprovechar el elevado calor específico de agua para tareas de refrigeración.

- Reacción del Oxyfuel:

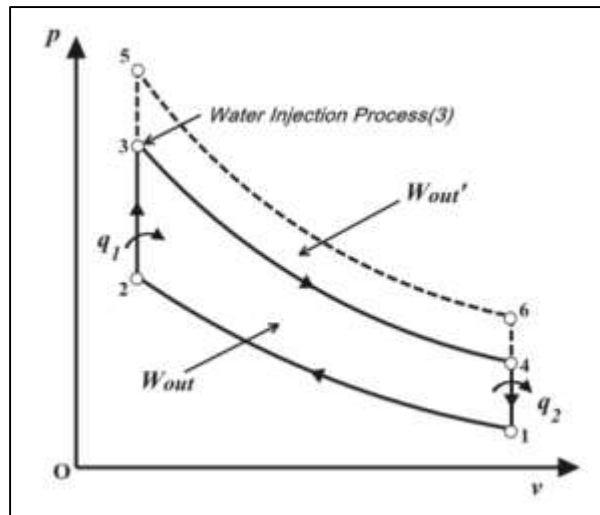


**Ecuación 5: Reacción del Oxyfuel**



**Figura 11: Esquema de un sistema de alta eficiencia de cogeneración mediante un motor térmico.**

Fuente: Z.-J. Wu, 2014.



**Figura 12: Comparación teórica de los ciclos ideales de un motor con inyección de agua y sin.**

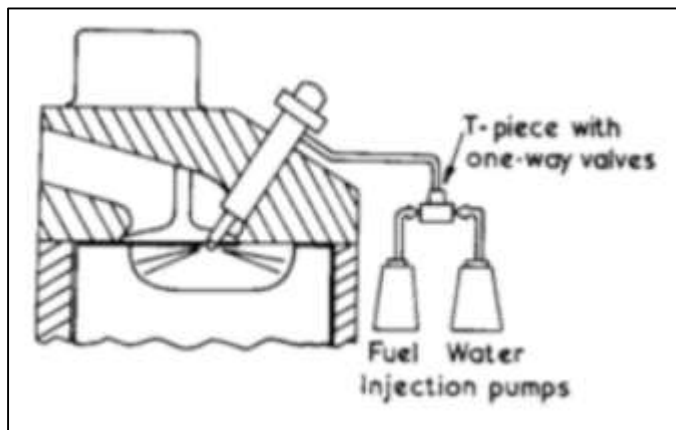
*Fuente: Z.-J. Wu, 2014*

Siguiendo con el ámbito de los motores industriales, los estudios de B.Tesfa. Proponen usar un motor de encendido por compresión que funciona con biodiesel, y usar el sistema de inyección de agua para reducir las emisiones de NOx. El biodiesel es uno de los combustibles renovables que mejores prestaciones se obtienen y además pueden funcionar en un motor que funciona con diésel sin ningún tipo de modificación adicional. El mayor problema que presentan este tipo de combustible, son las elevadas temperaturas que se alcanzan, lo que provoca la abundante formación de óxidos de nitrógeno. Mediante la inyección de agua estas emisiones se reducirán, haciendo de este combustible mucho más apto.

#### **2.2.3.1.3. Inyección de agua directa al cilindro, mezcla con el combustible.**

Se inyecta agua junto al combustible en una mezcla lo más homogénea posible, a través del mismo inyector de combustible usado en el proceso convencional. Se podrá realizar por medio de:

- A) Un depósito intermedio en el que se realiza la mezcla de agua combustible en la proporción deseada, y éste es bombeado a través de tubería de cobre, a los inyectores del cilindro.
- B) Dos bombas, independientes una para el combustible y otra para el agua, las cuales se unen inmediatamente antes del inyector por una válvula en T. [5]



**Figura 13: Montaje de sistema de inyección directo al cilindro, mezclado con el combustible.**

**Fuente:** M. E. A. Fahd, 2013.

En el trabajo de Tesfa se propone además de la inyección de agua directa en el cilindro. Como solución alternativa, Inyectar de manera directa el agua mezclado con el combustible. Tesfa et al., concluyen que resulta esencial la mezcla del agua con algún agente emulsificante, para garantizar una buena homogeneización de la mezcla. También se establece como contra, que el uso de este tipo de sistema implica un complejo control, especialmente control del caudalímetro de ambas especies, para garantizar que el cociente agua/combustible, es exactamente el necesario.

#### **2.2.3.1.4. Inyección de agua en el colector de escape.**

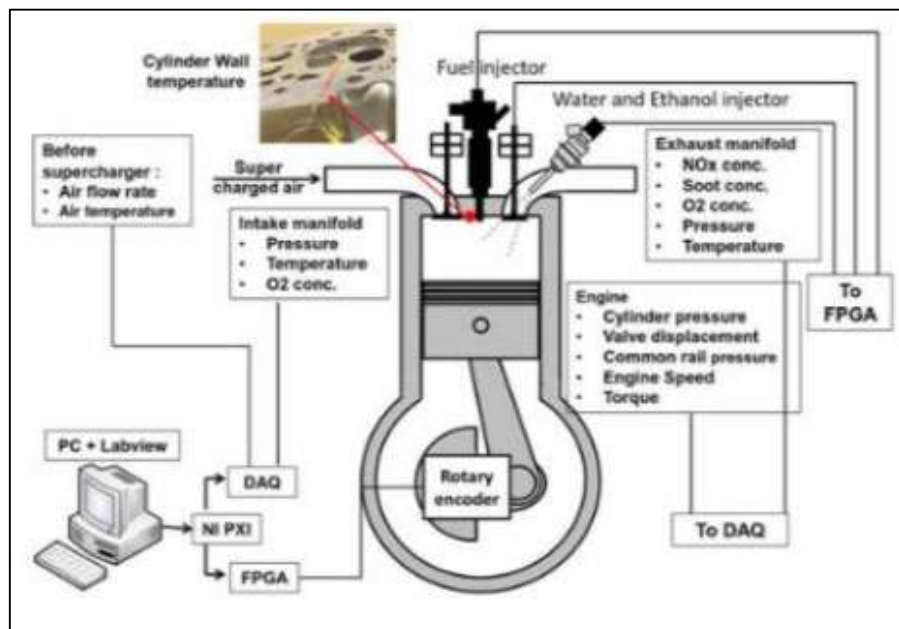
La inyección de agua se realiza en el colector de escape, surge para solucionar las desventajas que presentan los anteriores sistemas.

El objetivo de este método es utilizar los gases de escape y la entalpia de vaporización del agua y reducir las emisiones de NOx, y disminuir la temperatura de combustión ( $T_{max}$ ), especialmente útil en los motores de encendido por compresión.

El agua se introduce en el cilindro, en el colector de escape, por medio de un inyector de alta presión. El agua se introduce en el cilindro por medio de la válvula de escape, recirculando también parte de los gases de escape, y mezclándolos con el aire fresco que se obtiene del colector de admisión.

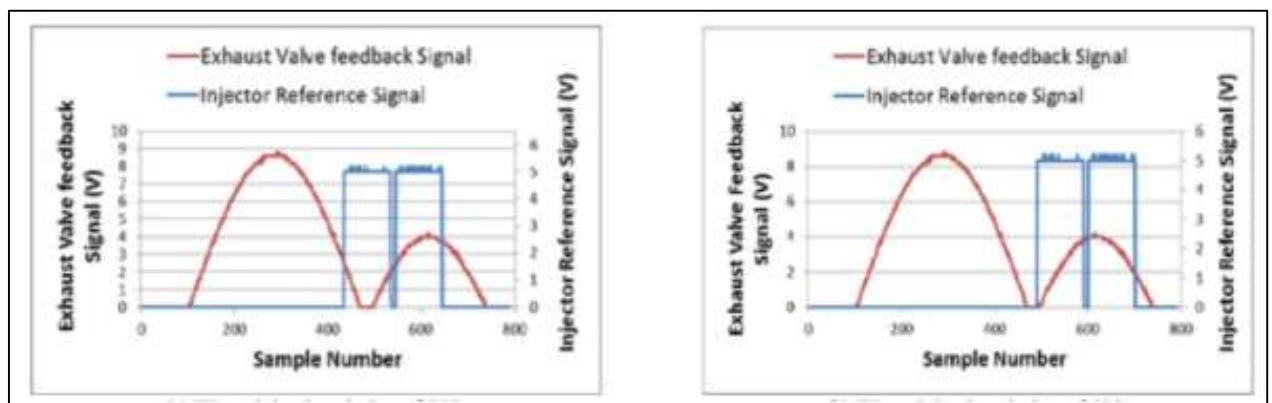
El objetivo de este método es eliminar la evaporación de agua en el cilindro y restar el calor de vaporización del agua durante el proceso de combustión. Para llevarlo a cabo, Bozza colocan un inyector de agua en el colector de escape y una bomba de alta presión accionada por el cigüeñal del motor. Además, es necesario que las válvulas se abran y cierren independientemente.

Como se ha dicho en el párrafo anterior, los estudios de Bozza, establecen como ventaja la de poder regular de manera más sencilla la temperatura maximizando su efecto debido a que siempre se encontrará en los rangos óptimos de temperatura.



**Figura 14: Montaje de sistema de inyección de agua en el conducto de escape.**

*Fuente: M. Nour, H. Kosaka, 2016.*



**Figura 15: Control de la válvula de escape y del inyector de agua.**

*Fuente: M. Nour, H. Kosaka, 2016.*

Las variables operativas de este sistema, y que hay que combinar de manera óptima para obtener el mejor resultado son: El tiempo de inyección (regula la cantidad de agua que entrará en el cilindro), y el instante en el que se inicia la inyección y el tanto por ciento de EGR.

Así mismo como otra aplicación adicional se establece el uso de la inyección de agua para potenciar el ciclo de Rankine que será accionado por los gases de escape del motor de combustión. Esto ha sido estudiado por Zhi-Jun Wu, los cuales proponen introducir el sistema de inyección de agua en el conducto de escape en un motor mono cilíndrico de encendido provocado que usa combustible propano. El estudio propone distintos valores de inyección de agua para los cuales en la turbina no se produzcan condensados pero la temperatura de estos gases sea la menor obteniéndose así una mayor densidad y con ello una mayor potencia de sobrealimentación.

En los estudios de Lezhong Fu, se demuestra como mejora la eficiencia del ciclo termodinámico cuando se implementa un ciclo de Rankine en serie con el motor. Este ciclo obtiene como ciclo de calor entrante los gases del escape del MCIA. Los resultados de estos estudios demuestran que la evaporación de la mezcla de agua durante el proceso de compresión mejora el rendimiento térmico indicado y varía en gran medida en función de la ley de inyección que se utilice. Al utilizar el proceso de inyección de agua la presión media indicada aumenta. Además, se aprecia una reducción del nivel de emisiones contaminantes.

Una elevada cantidad de agua inyectada puede provocar problemas con la estabilidad del ciclo y el grado de variabilidad aumente en gran medida. Por esto se debe de usar una cantidad baja y en un periodo de tiempo corto. Cabe resaltar que la eficiencia mejora, no tanto con la ley de inyección es decir inyectar en un punto o en otro, y si es muy dependiente de una atomización adecuada.



### 2.2.3.2. Inyección de agua dependiendo del tipo de motor.

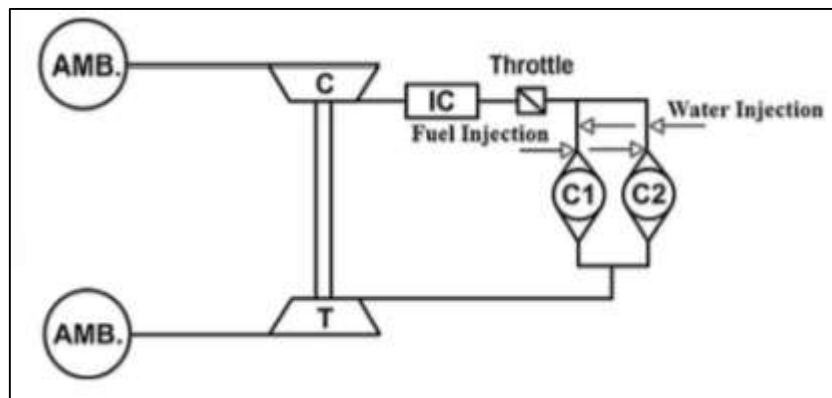
Según el tipo de motor que sea, ya sea MEP o MEC la inyección de agua se usa de manera diferente.

#### 2.2.3.2.1. Motor de encendido provocado.

En los motores de encendido provocado, que se utilizan principalmente en el sector del transporte y automoción, el objetivo de la inyección de agua es reducir la temperatura de autoinflamación del combustible.

Estos motores que funcionan con combustible de alto octanaje, especialmente en motores de altas prestaciones, que suelen tener una velocidad lineal media alta, es necesario encontrar un mecanismo que permita aumentar la potencia sin que implique un aumento de la cilindrada, ya que esto originaría un aumento del consumo específico además de penalizar las emisiones.

El método más idóneo para este tipo de motores es el que permite disminuir la temperatura de la mezcla en mayor medida. Esto se consigue mediante la mezcla de agua y combustible, inyectándolo de forma directa en el cilindro. Resulta muy ventajoso si se ve combinado junto con un sistema, el cual, potenciaría aún más los efectos, debido a las temperaturas más controladas y menores.

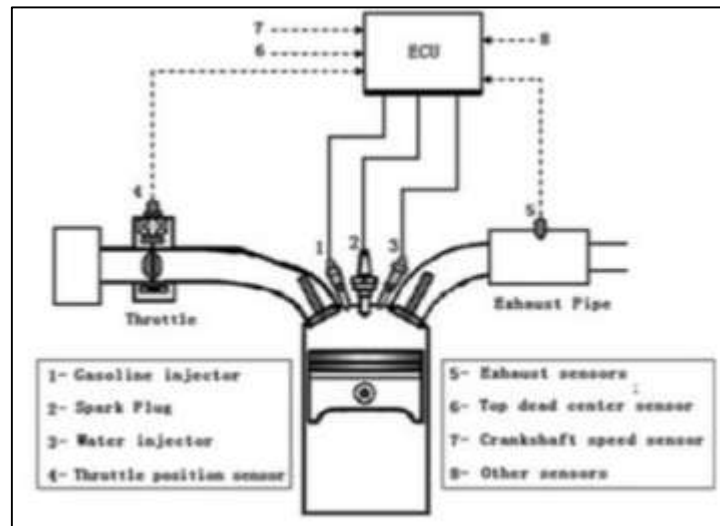


**Figura16 : Esquema y control de sistema de inyección de agua para un motor de encendido provocado.**

*Fuente: F. Bozza, 2016.*

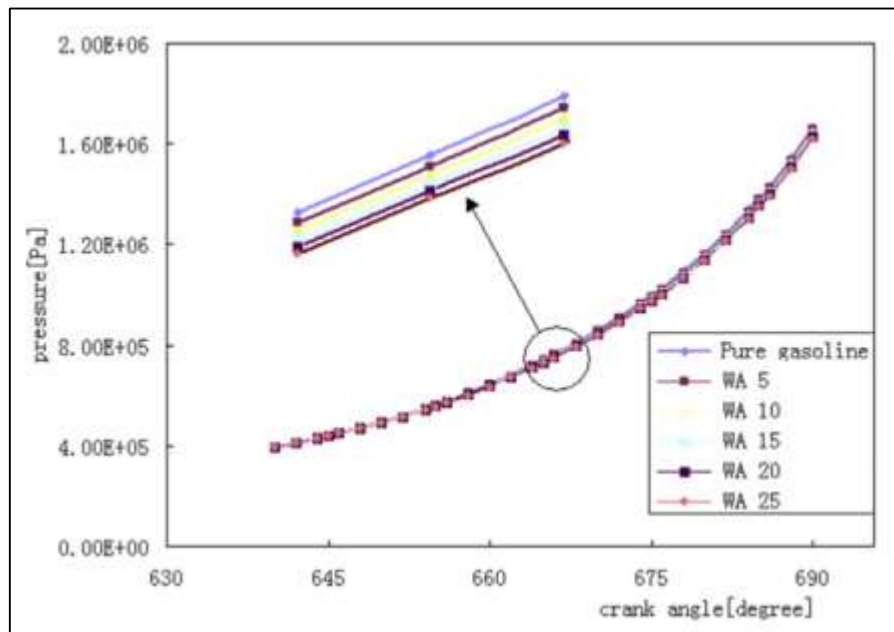
Cabe resaltar que el sistema a bajos regímenes de carga no resulta aconsejable. Esto es debido a que en motores MEP se trabaja siempre con dosado estequiométrico o en ocasiones se trabaja por encima de este

mismo. Universidad de Valladolid (Uva) 35 Por tanto, la elevada densidad con respecto al sistema sin inyección y la alta probabilidad de que se produzcan inquemados, hace que el sistema no sea rentable hasta que, por lo menos, no se haya alcanzado un 35% del grado de carga. Debido a la influencia del grado de carga en la efectividad del sistema, hace necesario que se controle el sistema de inyección mediante la ECU.



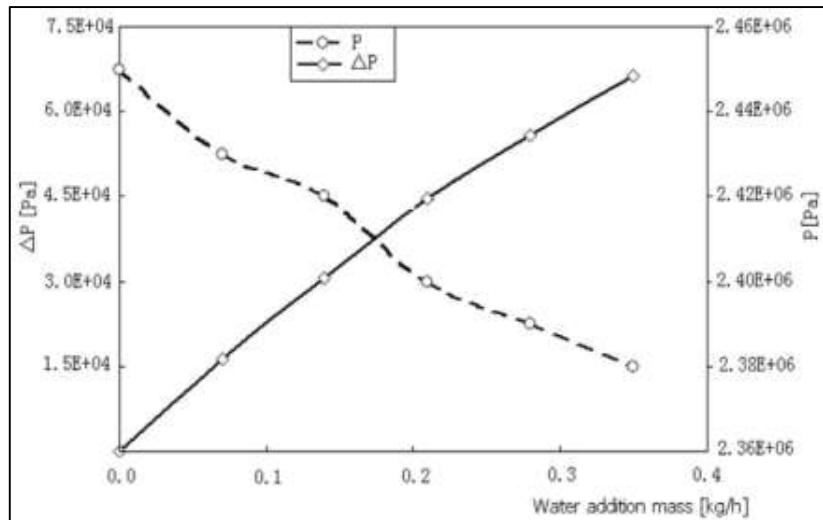
**Figura 17: Esquema de control del motor, para un motor de Escondido provocado.**

**Fuente:** W. Mingrui, 2017.



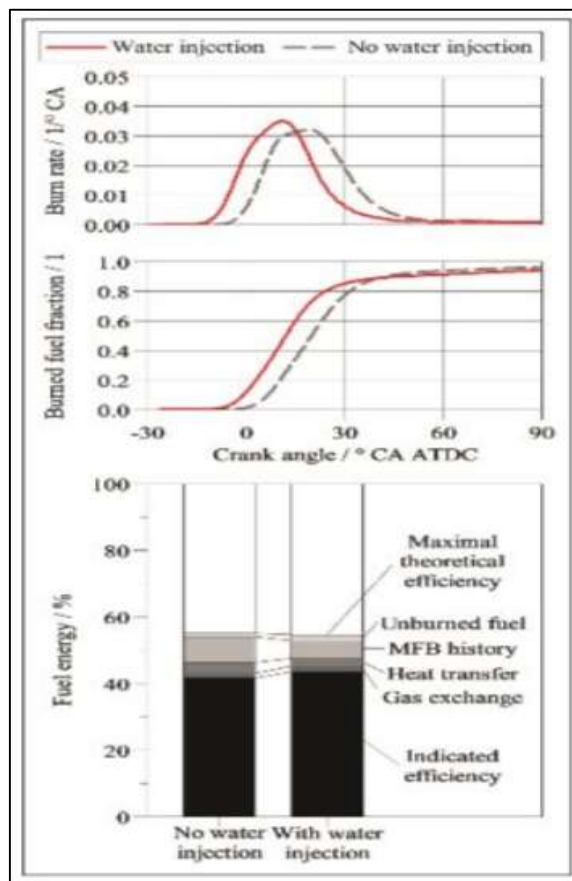
**Figura 18: Presión del cilindro para diferentes valores del cociente Agua/Combustible.**

**Fuente:** W. Mingrui, 2017.



**Figura 19: Diferentes reducciones de presión para diferentes cantidades de agua y incrementos de Presión, y los valores de la presión máxima del cilindro para diferentes cantidades de agua.**

Fuente: W. Mingrui, 2017.



**Figura 20: Grado de inquemados, comparando el sistema de inyección de agua o sin él. Grado de aprovechamiento del combustible comparando la inyección de agua a otro motor sin el sistema.**

Fuente: J. D. Fabian Hoppe,, 2015.

Respecto al par y la potencia, se aprecia claramente cómo se produce una mejora del par a altos regímenes de giro. Para bajos regímenes de giro, se observa como para el motor ensayado, se sigue prácticamente la misma curva. Es decir, para bajos regímenes de giro las prestaciones del motor no se ven afectadas, pero sí que se aprecian en lo referente a emisiones y temperaturas máximas. Para altos regímenes de giro se aprecia una pequeña mejora de las prestaciones y las mismas ventajas en emisiones, temperaturas.... además de una temperatura de entrada a la turbina mucho menor, lo que mejora el rendimiento del ciclo de turbina de gas, además de dejar a disposición del diseñador un posible aumento de la relación de compresión del sistema de sobrealimentación obteniéndose unas mayores

#### **2.2.3.2.2. Motor de encendido por compresión.**

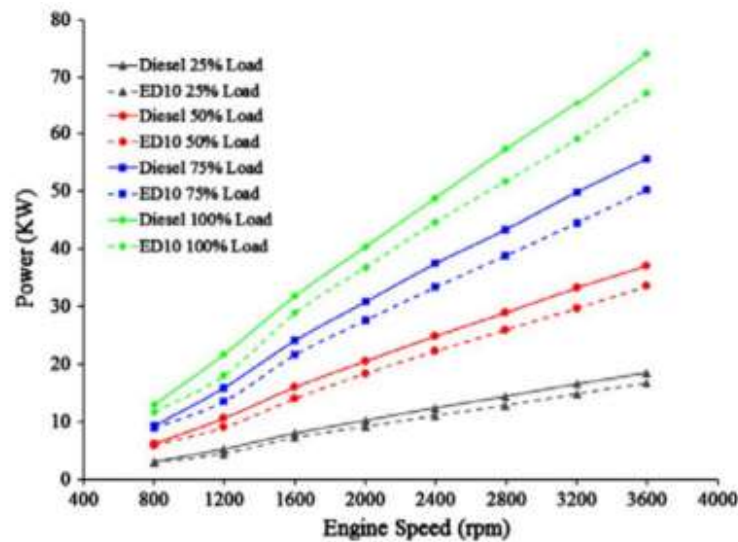
Para los motores de encendido por compresión que funcionan habitualmente con el ciclo Diésel, su relación de compresión es del orden del doble respecto a un motor de encendido provocado y por tanto una elevada temperatura a lo largo del ciclo. Esto, junto con las normativas anticontaminación, hace que se use la inyección de agua para aquellos motores de grandes cilindradas, los cuales las emisiones de NOx son muy elevadas.

Con el uso de este sistema podemos reducir hasta un 70 % las emisiones de NOx, y evitar hacer “traping” en los catalizadores de escape o incluso post-tratamientos de gases que perjudican en gran medida las prestaciones del motor, además de encarecer el producto.

El método por el cual se va a realizar la inyección del agua depende en gran medida del grado de reducción de NOx que deseemos realizar, esto es debido a que, en su mayoría, a mayor cantidad de agua menos cantidad de NOx, no obstante, la emisión de CO, de inquemados o cenizas también aumenta en gran medida.

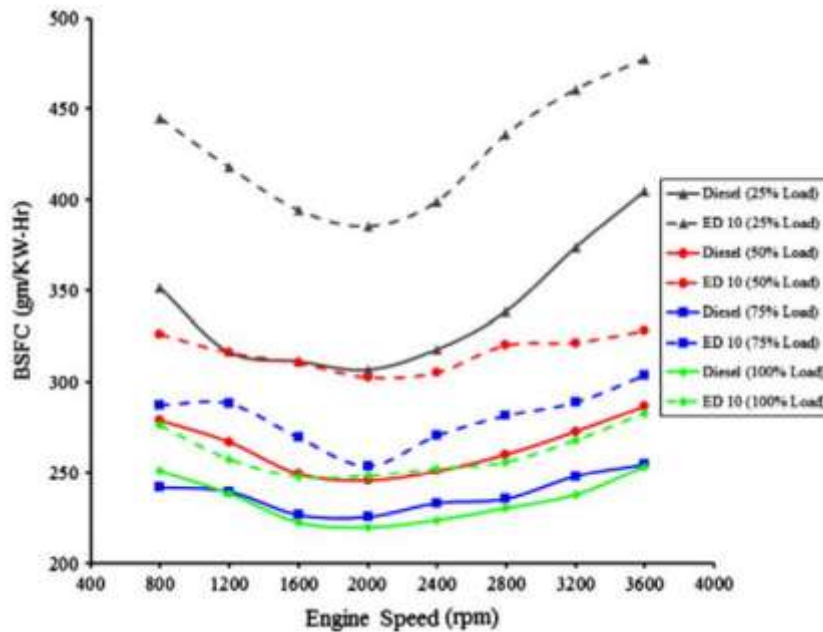
Con respecto al par y la potencia: la presión media del cilindro es aproximadamente semejante a diferentes grados de carga y velocidades angulares. No obstante, la combinación diésel-agua, produce menos

potencia indicada, comparada con la que se obtendría si no se usara este sistema, esto implica que el consumo específico sea mayor. Por otra parte, es importante remarcar una reducción en la temperatura de los gases de escape, lo que favorece el trabajo y duración de los sistemas de post-tratamiento en las últimas etapas del escape.



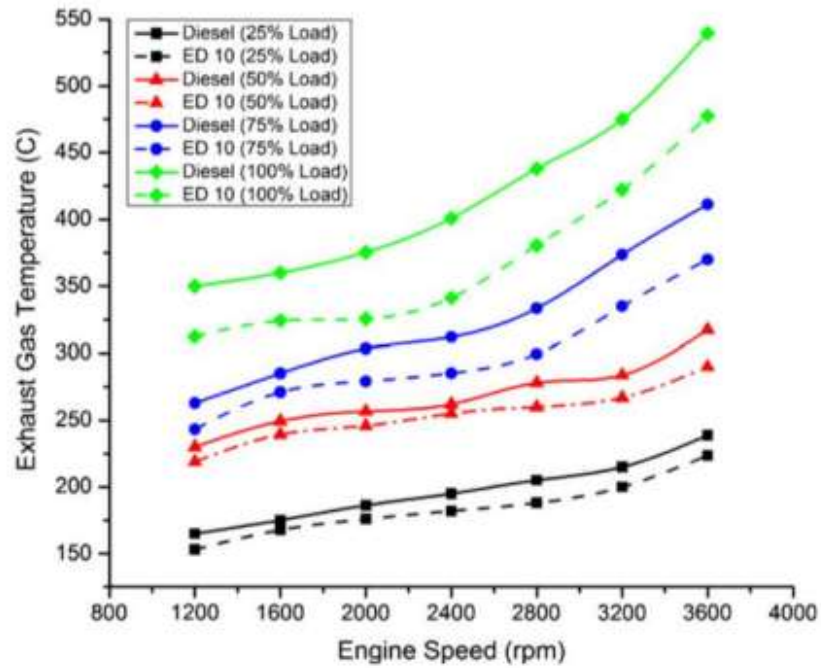
**Figura 21: Comparación de la potencia, respecto la que se alcanzaría sin usar este sistema, para diferentes grados de carga y diferentes revoluciones.**

Fuente: M. E. A. Fahd, 2013.



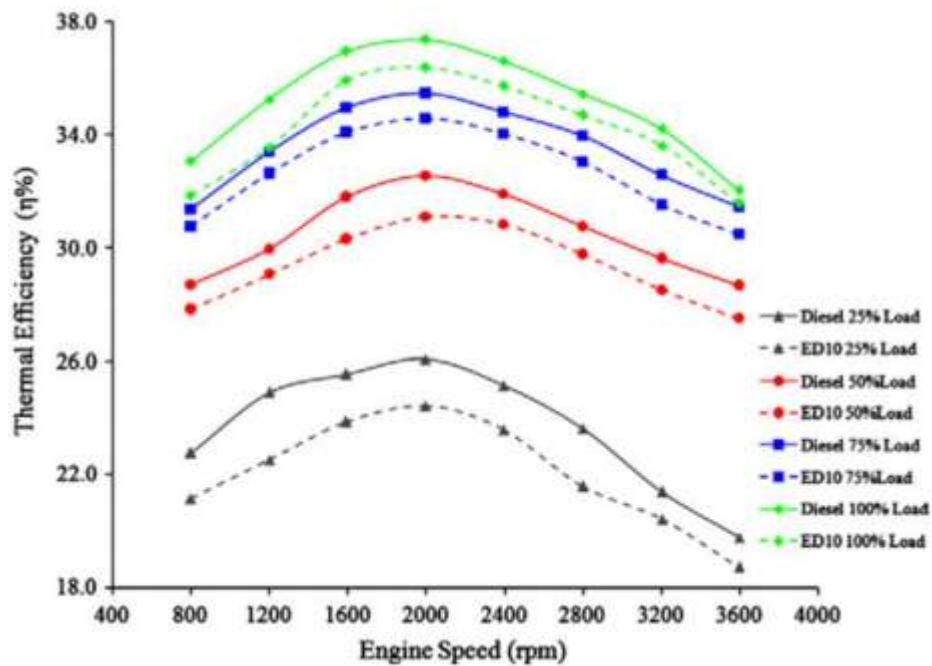
**Figura 22: Comparación de la potencia, respecto la que se alcanzaría sin usar este sistema, para diferentes grados de carga a diferentes revoluciones.**

Fuente: M. E. A. Fahd, 2013.



**Figura 23: Comparación de la temperatura de los gases de escape, respecto la que se alcanzaría sin usar este sistema, para diferentes grados de carga a diferentes revoluciones.**

Fuente: M. E. A. Fahd, 2013.

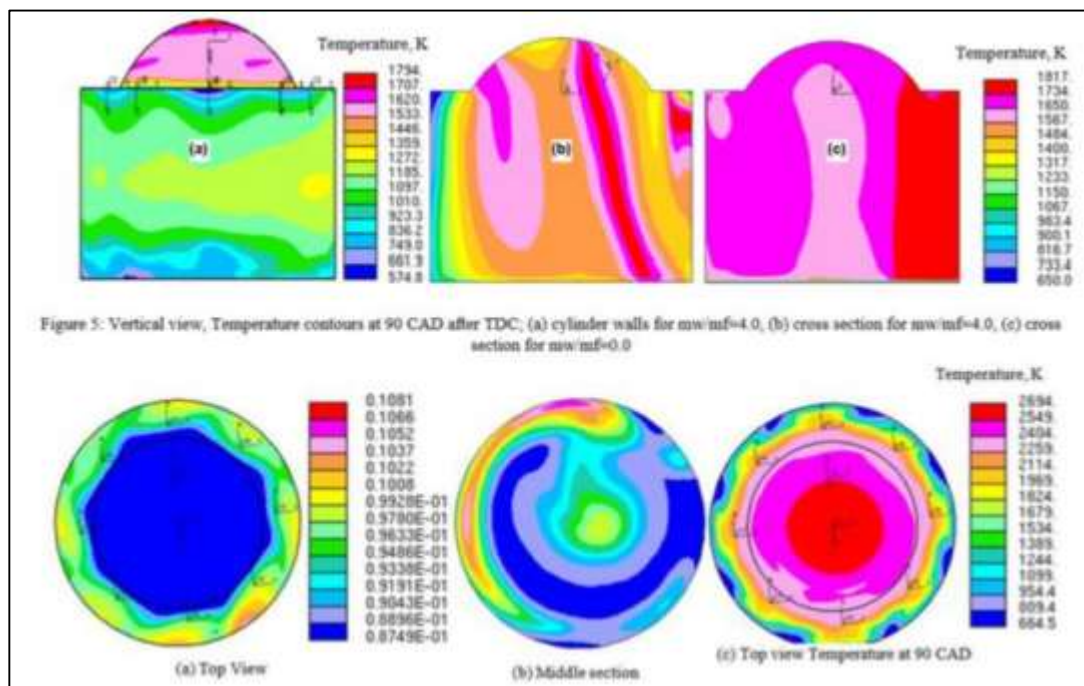


**Figura 24: Comparación de la eficiencia, respecto la que se alcanzaría sin usar este sistema, para diferentes grados de carga a diferentes revoluciones.**

Fuente: M. E. A. Fahd, 2013.

### 2.2.3.2.3. Método de inyección en el conducto de admisión de aire.

Se aprecia una reducción de las emisiones de NO<sub>x</sub>, según va aumentando el cociente de Agua/Combustible, para estimar un grado de ganancia, aproximadamente el motor reduce las emisiones de Nox en un 30%, para una relación de 0,5. En los experimentos también se aprecia un aumento de las emisiones de CO, y cenizas, incluso de emisiones de HC. Esto se explica debido a que el agua hace que se retrase la ignición del combustible, y más aún si el motor es de tipo MEC, por tanto, parte del combustible puede quedar sin reaccionar. La obtención de inquemados aumenta el consumo específico del motor. Este problema se soluciona de una manera muy eficiente, aumentando la relación de compresión del motor, o bien del sistema de sobrealimentación. Los estudios realizados en un motor 2T, por parte de Mohamed I.Hassan, establecen una disminución sustancial de la temperatura de combustión mostrándose en un diagrama de temperaturas obtenido por CFD.



**Figura 25: Comparación de la distribución de temperaturas en un motor de 2T, con el uso y no uso del sistema de inyección de agua.**

*Fuente: M. I. Hassan and A. T. Brimmo, 2015.*

### 2.2.3.2.4. Inyección directa en el cilindro.

A través de este método de inyección se consiguen reducciones de las emisiones de Nox importantes, y de igual manera se han obtenido un aumento de las cenizas y CO, según el cociente Agua/Combustible, va

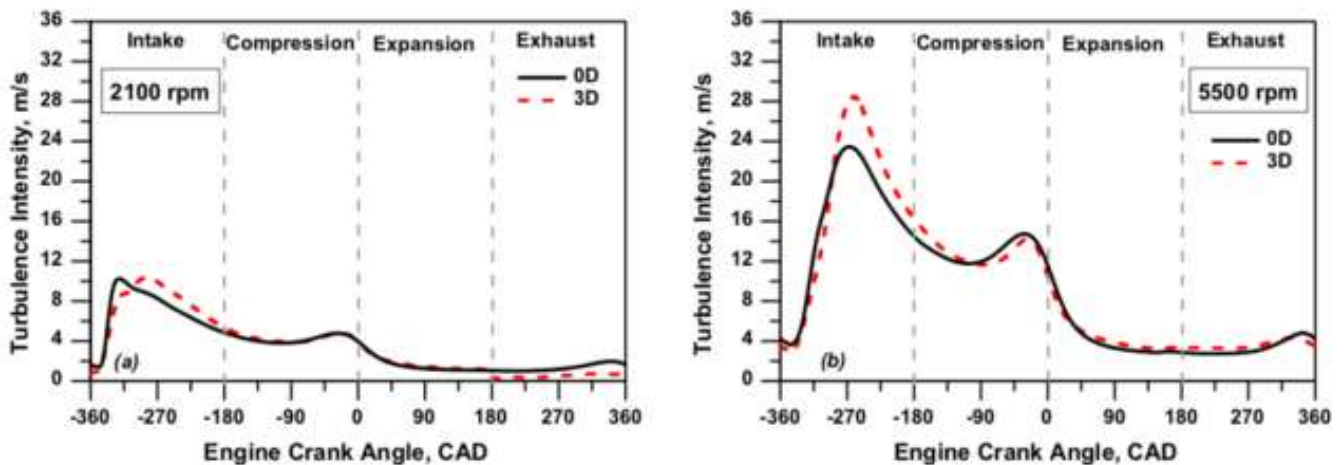


aumentando. La ventaja de usar este sistema es que permite la variabilidad del instante en el que se comienza la inyección, y para valores anticipados, por ejemplo, inyección a 10-15 grados después del punto muerto superior, se consiguen reducciones similares de emisiones de Nox, con menores aumentos de cenizas y CO. Los estudios de Fabio Bozza establecen la mejoría del uso de la inyección de agua directa en el cilindro para prevenir la autoinflamación del combustible. Llegándose a las siguientes conclusiones:

- Autoinflamación: La autoinflamación ocurre cuando el combustible entra en combustión de manera espontánea debido a las altas presiones y temperaturas que se alcanzan dentro de la cámara de combustión. O Se define un incremento de presión límite que se establece con la siguiente expresión

$$\Delta P_{autoinflamacion} = \frac{R}{c_v} * \frac{x_u * mf * LHV}{V_{autoinflamacion}} \quad (6)$$

La inyección de agua combinado con un buen diseño del pistón ayuda a aumentar la turbulencia y con ello homogeneizar la mezcla.



**Figura 26: Comparación de la turbulencia que se crea en el cilindro, si se usa o no el sistema de inyección de agua.**

Fuente: F. Bozza, V. De Bellis, and L. Teodosio, , 2016.



#### **2.2.3.2.5. Inyección directa combinada con el combustible.**

El ensayo de la inyección directa combinado con el combustible se ha materializado de la manera B, es decir con dos bombas independientes y una válvula en T, que conecta a la línea de combustible de alta presión con el agua. Con este método, no podemos controlar el instante en el cual se inyecta, es decir se hace en fase junto con el combustible. Se consigue la mayor reducción de emisiones de NO<sub>x</sub>, con respecto a las otras técnicas utilizadas, además se observa que se reducen considerablemente las emisiones de CO y cenizas. Según se va aumentando el cociente de Agua/Combustible, el retraso del autoencendido aumenta más rápidamente por tanto a un cociente de 0,8, el porcentaje de inquemados se dispara, y con ello se produce una disminución muy importante del rendimiento. Existe un valor crítico el cual no permite el encendido, provocando la parada del motor. Para solventar este impedimento, deberemos aumentar la relación de compresión del motor o del sistema de sobrealimentación, análogamente a lo acaecido en el caso número 1. Hay que reseñar que para valores cercanos a 0,2-0,3. Se produce un efecto contrario a la tendencia de los anteriores sistemas. La tendencia es que según se aumenta el Agua/Combustible mayor es la reducción de emisiones de NO<sub>x</sub>, por el contrario, las de CO y cenizas, aumenta. En este caso es, al contrario, todas las medidas mejoran con respecto a no usar inyección de agua. Este fenómeno no está muy estudiado, aunque las hipótesis que más fuerte se establecen es que se producen pequeñas micro explosiones, en el seno de la mezcla provocándose un flujo muy turbulento, esto ayuda a mejorar la homogeneidad de la mezcla y por tanto una mejor combustión. Algunos estudios especifican que con el uso de un emulsionante se puede potenciar aproximadamente un 10% las prestaciones (G. Greeves, 1977).



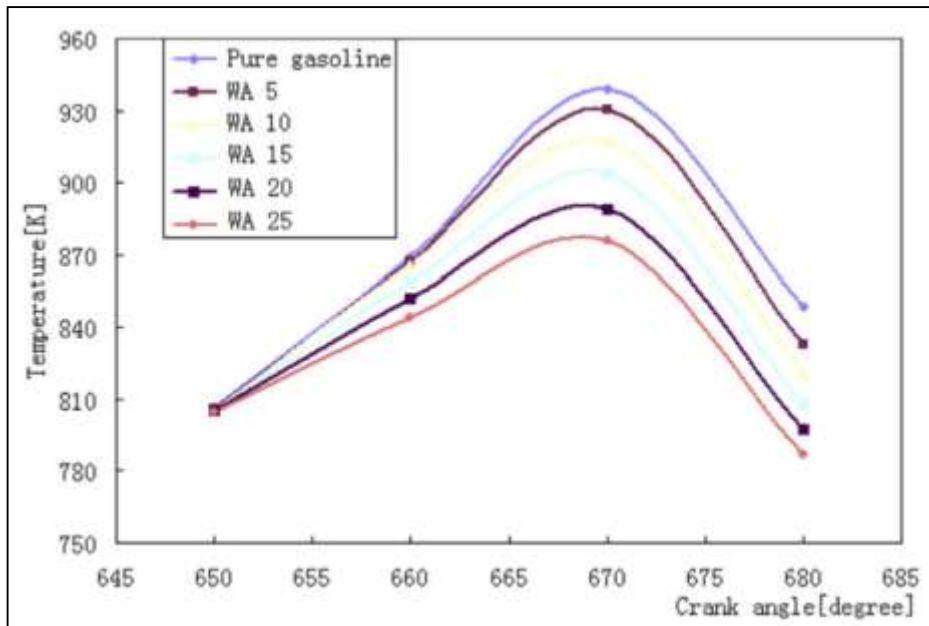
**Figura 27: Apariencia de la mezcla de combustible diésel, y agua al 10%**

*Fuente: E. Arabaci, 2015.*

#### **2.2.3.2.6. Combinación con sistema de EGR.**

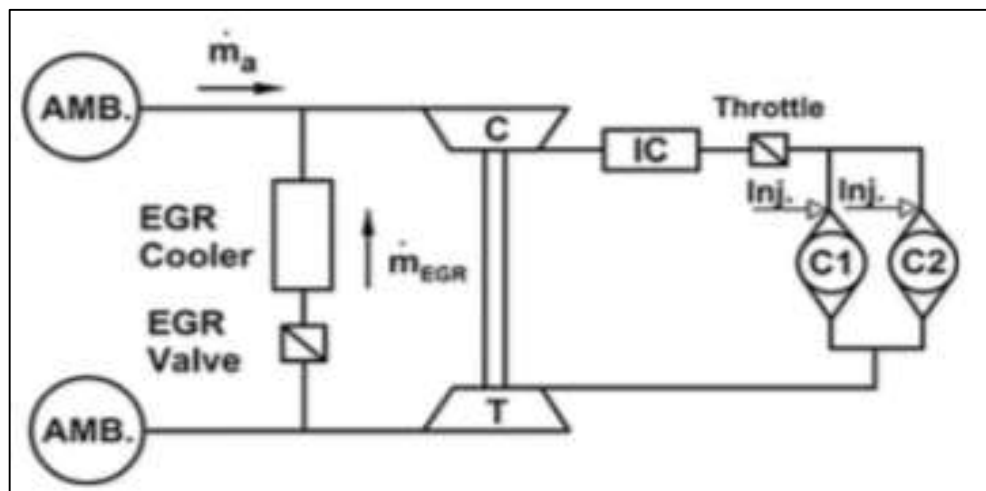
Se detallará este método describiendo el trabajo realizado por Mingrui en el que se ensaya en un motor de gasolina, debido a que este método es ideal para motores gasolina y en especial para aquellos de alto rendimiento. Características del motor en el que ha sido ensayado el sistema:

- Motor de 4 cilindros de encendido provocado, inyección directa del fabricante Ford.
- Relación de compresión de 13:1.
- Revoluciones 2000-3000 rpm.
- Tiempo de inyección de agua 640° hasta 650°. El fundamento de combinar ambos efectos reside en el alto calor de vaporización que requiere el agua, y aprovecharlo, para disminuir la temperatura de la mezcla, y de la cámara de combustión ( $T_{max}$ ).



**Figura 28: Evolución de las temperaturas en el interior del cilindro, a lo largo de la carrera del pistón, función de la concentración de agua.**

Fuente: W. Mingrui, 2017.



**Figura 29: Esquema de sistema de motor con inyección de agua sobrealimentado.**

Fuente: F. Bozza, 2015.

#### 2.2.3.2.7. Inyección de agua en el colector de escape.

La inyección de agua en el colector de escape se estudia a través del trabajo realizado por Nour en un MEC. El motor respecto el que se han obtenido los datos, tiene las siguientes especificaciones:

Engine Type	4-Stroke Single Cylinder DI Diesel Engine
Bore	89mm
Stroke	100mm
Displacement	622 cm <sup>3</sup>
Compression Ratio	15.0
Combustion Chamber	Reentrant type
Injection System	Common Rail Injection System
Injection Nozzle	φ 0.158mm × 8
Intake System	Supercharged
Valve Train	2 Intake Valves and One Exhaust Valve

**Tabla 1: Características técnicas del motor en el que se va a ensayar.**

*Fuente: M. Nour, 2016.*

Engine speed [rpm]	1000
Fuel Injection quantity [mg/cycle]	32
Fuel Injection timing [ATDC]	-6
Water Injection timing [ 0 -720 deg] SOI	350°, 400°
Water Injection amount [mg/cycle]	6, 12, 24 and 40
Intake air temp	65°C
Coolant temp	85°C
Oil temp	70°C
Intake valve lift, IVO, IVC	8 mm, 14° BTDC, 30° ABDC
Exhaust valve lift, EVO, EVC	8 mm, 39° BBDC, 5° ATDC
Exhaust valve reopen lift [mm] and EGR ratio [%]	3mm (10% EGR) and 4mm (25% EGR)
Equivalence ratio for the conventional diesel combustion	0.72

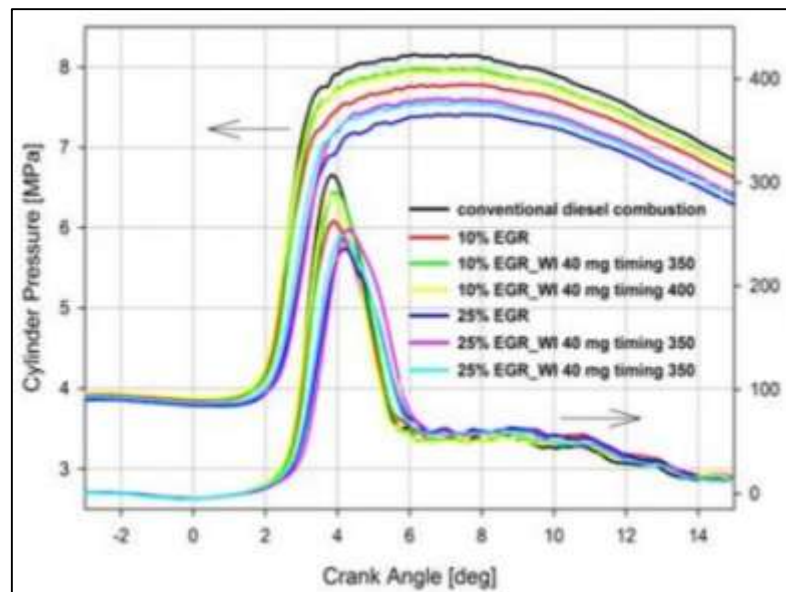
**Tabla 2: Características del ciclo, del motor que se va a ensayar.**

*Fuente: M. Nour, 2016.*

Las variables operativas de este sistema son tres, el instante en el que se empieza la inyección de agua, el tiempo que se inyecta (cantidad), y el tanto por ciento de EGR. Este sistema actúa como recuperador de energía, reintroduciendo la energía térmica de los gases del escape, que no ha sido convertida en energía mecánica y volviéndola a introducir en el cilindro, siendo susceptible de nuevo de producir trabajo.

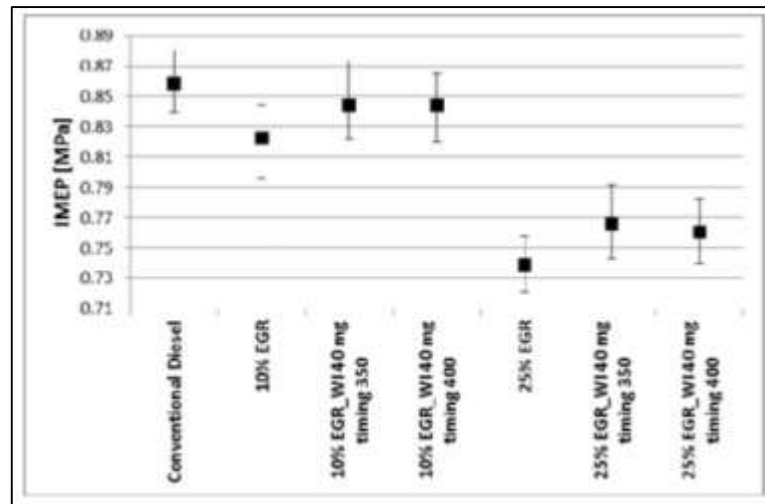
Una inyección más temprana o tardía provoca presiones máximas semejantes, no obstante, cuanto mayor sea el porcentaje de recirculación

de los gases de escape, mayor es el porcentaje de EGR, menor es la presión máxima y menores son sus valores en el entorno del punto muerto superior. Esto se puede explicar porque se introducen gases de alta entalpía en el cilindro y por tanto el salto entálpico del ciclo es menor. La presión máxima del cilindro siempre es menor que si no usamos el sistema, no obstante, siempre es mayor que si sólo se utiliza el sistema de EGR, ya que aprovechamos la energía de vaporización para disminuir el nivel térmico de los gases recirculados. Con respecto a las emisiones de NOx, se reducen drásticamente según aumenta el porcentaje de EGR, y la cantidad de agua inyectada. No obstante, el porcentaje de cenizas y las emisiones de CO aumentan de la misma manera que descienden las emisiones de NOx, y siempre son mayores, así no se usa este sistema.



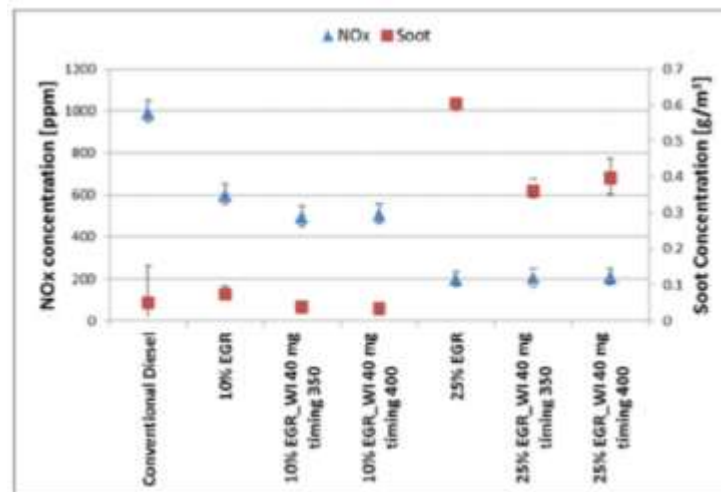
**Figura 30: Comparación de presión del cilindro para diferentes configuraciones de EGR e inyección de agua.**

Fuente: M. E. A. Fahd, 2013.



**Figura 31: Intervalo de valores de presión media del cilindro, con diferentes configuraciones de inyección de agua y de EGR.**

Fuente: M. Nour, 2016.



**Figura 32: Intervalo de valores de emisiones de NOx y partículas, con diferentes configuraciones de EGR y agua.**

Fuente: M. Nour, 2016.

#### 2.2.4. Atomización de la gota.

Uno de los parámetros más importantes a la hora de inyectar agua y mezclarlo de manera efectiva con el aire y el combustible es el tamaño de atomización de la gota, y como se consigue éste. En función de donde se esté inyectando agua, el tamaño de gota puede variar debido a que las condiciones de mezcla no son similares. Para predecir el tamaño de la gota que se va a obtener se va a recurrir al análisis adimensional. Utilizando los números adimensionales:

$$Re = \frac{\rho * v * d}{\mu} \quad (7)$$

**Ecuación 7: Numero Adimensional Reynolds**

$$We = \frac{\rho * v^2 * d}{\mu} \quad (8)$$

**Ecuación 8: Numero Adimensional Webber**

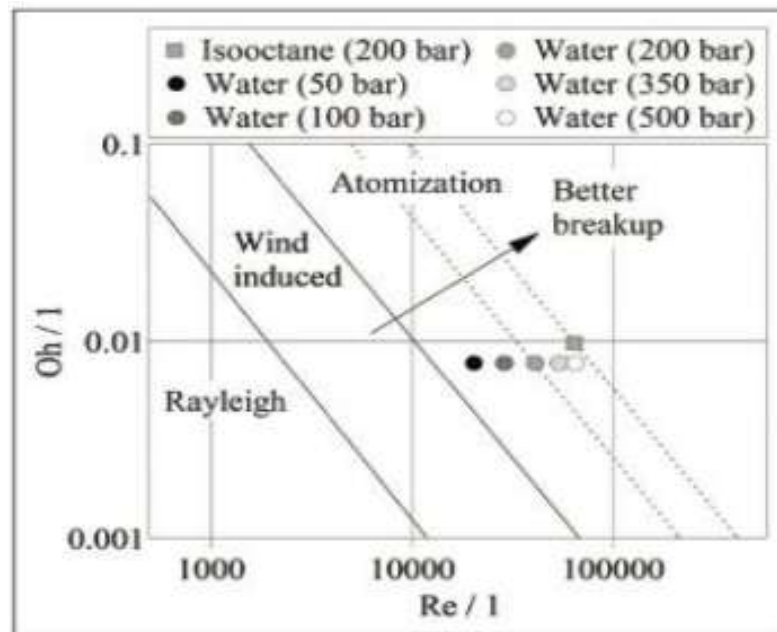
$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} \quad (9)$$

**Ecuación 9: El número de Ohnesorge**

Los valores de referencia que se toman para calcular dichas propiedades, no se pueden establecer de manera inequívoca por tanto se fijan los siguientes como aproximación.

Propiedad	Combustible-octano	Agua
Densidad (25°C) (kg/m <sup>3</sup> )	690	999
Viscosidad (25°C) (mPa s)	0.467	0,882
Tensión superficial (25°C) (mN/m)	18,32	72,71
Presión de vapor (20°C) (kPa)	5,3	2,339

Tabla 3: Propiedades del combustible y el agua Adaptado.



**Figura 33: Representación del grado de atomización de la gota función de los números adimensionales. Para diferentes presiones.**

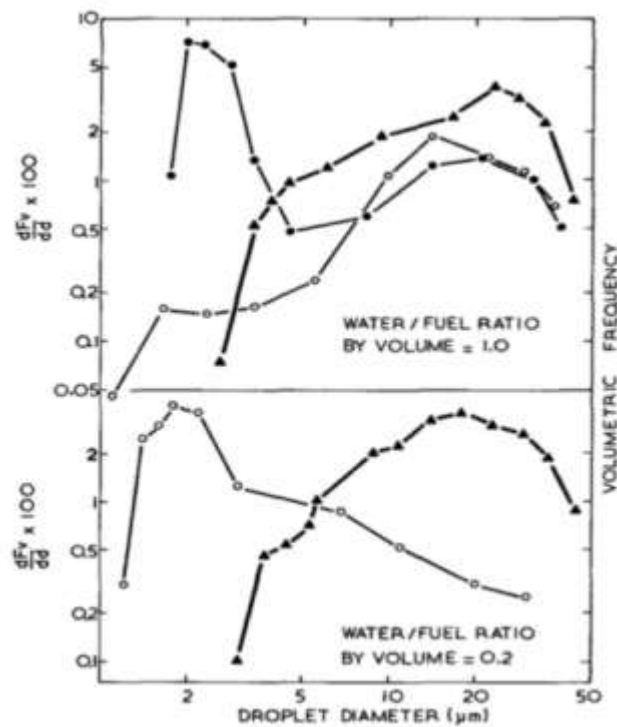
*Fuente: J. D. Fabian Hoppe, 2015.*

Como se puede apreciar el tamaño de ambas gotas va a ser similar en el caso del combustible y en el caso del agua al pasar por el inyector. Esto se debe a que los números adimensionales son semejantes. La alta viscosidad del agua se compensa con su alta densidad, obteniéndose aproximadamente un factor de dos. La alta tensión superficial del agua se ve compensada con un factor de 4 con respecto a lo del combustible Isooctano. La combinación de ambos en el número adimensional  $Oh$ , implica que la energía para atomizar el agua de manera semejante en ambos casos va a ser mucho mayor en el caso del agua. Algunos estudios, proponen que para mejorar la atomización de las gotas de agua se consiga en dos procesos. Una primera rotura de la gota y a continuación una atomización más fina. El tamaño de la gota; un tamaño de gota excesivamente grande puede provocar que la mezcla sea poco homogénea ocasionando una combustión ineficiente.

Así mismo, un tamaño de gota excesivamente pequeño puede provocar un aumento de los inquemados, esto se produce porque el agua ocupa una mayor superficie eliminando demasiado calor, retrasando mucho la combustión del combustible. El tamaño de gota optimo es complejo de calcular, y es estimado de la manera que sea lo más parecido al tamaño



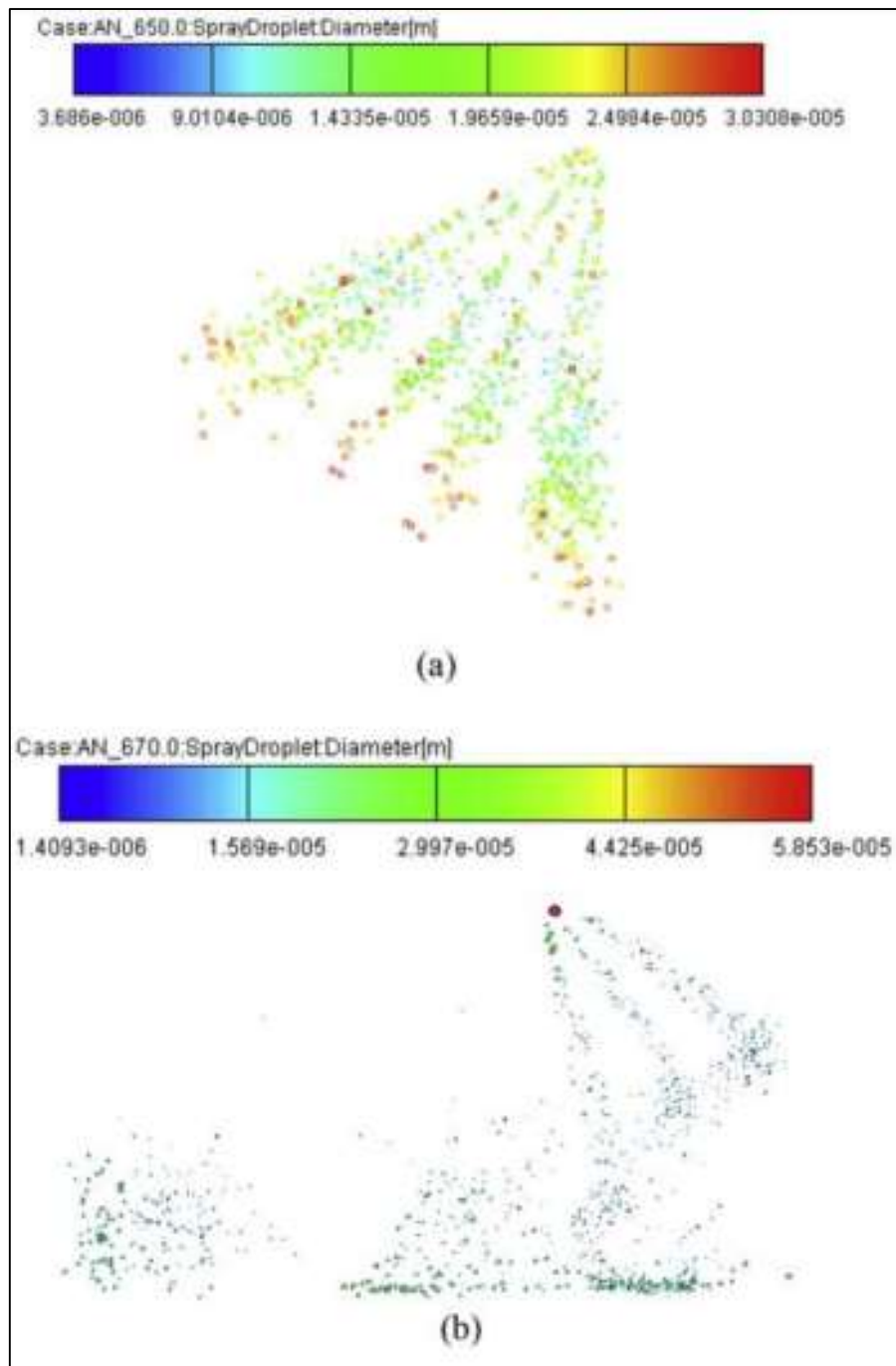
de gota más probable del combustible. Por tanto, es necesario examinar el tamaño de gota que se va a obtener del inyector e intentar que sea lo más parecido a las partículas que se encuentran en el sistema. EL tamaño de gota optima hace que sea posible la simplificación de que el agua se comporta igual que el combustible, mecánicamente hablando.



**Figura 34: Tamaño de gota más frecuente para diferentes métodos de inyección.**

*Fuente: J. D. Fabian Hoppe, 2015*

- Trazos con círculos, inyección directa mezclada con agua.
- Trazos con rectángulos, inyección en el conducto de admisión.
- Trazos con triángulos, inyección directa el cilindro.



**Figura 35: Distribución del tamaño de gota: según la dirección y el momento en el que se inyecte.**

*Fuente: J. D. Fabian Hoppe, 2015*

### **2.2.5. Inconvenientes y desafíos que presenta la inyección de agua.**

Resulta poco eficiente cuando se está trabajando a bajos regímenes de carga.

- Se solventaría con un motor que tenga una relación de compresión variable. Esto puede ser conseguido en cierta forma con un árbol de levas tipo Miller.
- Problemas para trabajar en condiciones bajo cero. No obstante, se puede disolver en alcohol, y así disminuir su punto de congelación.
- Por contacto con las paredes, parte del agua pasa al Carter. Según experimentos realizados tras 50 horas de funcionamiento, el agua y el aceite se mezclan en un 10%.
- Problema de corrosión y evaluación de resistencias de materiales, debido a mayores relaciones de compresión.
- Necesidad de incluir y rellenar el depósito de agua, por lo que puede limitar la autonomía del vehículo.
- Se estima que aproximadamente se consume 4-5 veces menos de agua, que de combustible.
- Modelado computacional muy complejo, es necesario introducir muchas simplificaciones.

### **2.2.6. Campos de aplicación de los Sistemas de inyección de agua**

La inyección de agua es un subsistema de los motores de combustión que se empezó a desarrollar en la segunda guerra mundial para los reactores de gas y para los motores alternativos de aviación. Nunca se pensó que resultaría adecuado para potencias bajas, es decir, en automoción, y menos cuando la marca Saab introdujo el intercooler como elemento en el sistema de sobrealimentación. No obstante, en la actualidad, debido a las normativas anticontaminantes que exigen reducir de manera muy significativa las emisiones de NOx y las emisiones de monóxido de carbono en el escape, todo ello unido a la necesidad de fabricar motores mucho más eficientes, hace que resulte interesante la implantación de estos subsistemas y grandes marcas ya están empezando a desarrollarlo. La marca comercial BMW, lanza al mercado un extraordinario deportivo, M4 GTS, el cual incorpora la inyección de agua junto con

sobrealimentación e intercooler. Aprovechando las mayores prestaciones que aporta este sistema. La marca comercial BOSH, tiene patentado un sistema de inyección de agua en motor llamado “Water-Boost”, el cual se ofrece como solución a diferentes marcas del sector de la automoción, la compañía establece un 5% de mejora en las prestaciones, una reducción de CO<sub>2</sub> del 4% y un 13% de ahorro de combustible. En competición aún no hay ningún modelo en uso, debido a que el tanque de agua obstante Honda diseñó su moto de competición con el sistema de inyección de agua, pero éste no salió a la luz por prohibición de la FIA. En el año 1995 Mitsubishi produjo un sistema experimental de inyección de agua el cual finalmente no llegó a implantar en ningún modelo.

## **2.3. Definición conceptual de la terminología empleada**

### **2.3.1. Grupo Electrónico - Partes**

Los grupos electrónicos o de emergencia son usualmente utilizados como fuentes de energía eléctrica alternativa en diferentes centros de comercio, hospitales, instituciones gubernamentales y otros, estos entran en funcionamiento cuando existe una interrupción en el suministro de energía eléctrica por parte de la empresa concesionaria que en este caso es Electronorte, este sistema auxiliar tiene la capacidad de compensar la falta de energía eléctrica proveniente de la red y la reparte entre las cargas que tienen mayor importancia.

Los grupos electrónicos actúan en caso de fallas del sistema como son:

- Interrupciones largas del suministro de energía eléctrica que se puede dar durante horas.
- Interrupciones Medianas del suministro de energía eléctrica que se puede dar durante minutos.
- Interrupciones cortas del suministro de energía eléctrica que se puede dar durante segundos.
- Caídas de tensión.

### 2.3.2. Motor Diesel

El motor representa la fuente de energía mecánica para que el alternador gire y genere electricidad. Existe dos tipos de motores: motores de gasolina y de gasoil (diésel). Generalmente los motores diésel son los más utilizados en los grupos electrógenos por sus prestaciones mecánicas, ecológicas y económicas.

#### 2.3.2.1. Bloque de motor

El bloque es la parte más grande del motor es un componente de hierro nodular rígido de una pieza, resisten las altas temperaturas ya que aquí se realizan también los procesos de expansión y escape de gases, en él se instalan los cilindros donde aquí los pistones suben y bajan. También por aquí se instalan los espárragos de unión con la culata y pasa al circuito de lubricación y al circuito de refrigeración.

- Pieza del sistema de agua de refrigeración
- Tubos de distribución de la camisa de agua
- Canales de aceite de lubricación
- Receptor de aire de carga



**Fig. 36: Bloque Motor**

*Fuente: Manual de Fabricante*

#### 2.3.2.1.1. Junta de Culata

La junta de culata es la encargada de sellar la unión entre la culata y el bloque de cilindros. Es una lámina muy fina fabricada generalmente de acero, aunque también se le unen diversos materiales como el , latón, caucho y bronce. La junta de culata posee las mismas perforaciones que el bloque motor, la de los pistones, los espárragos de sujeción con la culata y los conductos de refrigeración y lubricación, para poder enviar a éstos a la culata. (Martinez Villegas, 2007).



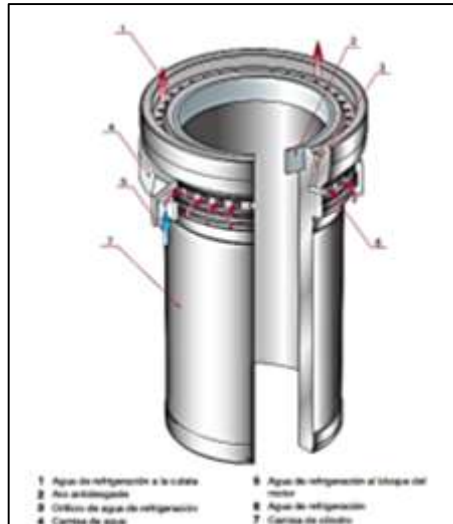
**Fig. 37: Junta Culata**

*Fuente: Manual de Fabricante*

#### 2.3.2.1.2. Camisa de cilindro

La camisa de cilindro de fundición centrífuga está equipada con un collar alto y rígido, que impide que haya deformaciones causadas por la presión del cilindro y las fuerzas de pretensión. El collar tiene orificios de refrigeración verticales.

El collar está equipado con una camisa de agua y un aro antidesgaste. El material de la camisa de cilindro es una aleación de hierro gris especial fundido diseñada para soportar muy bien el desgaste y ser muy resistente. El agua refrigerante se distribuye por la parte superior de la camisa de cilindro mediante orificios perforados. La parte inferior de la camisa de cilindro está seca.



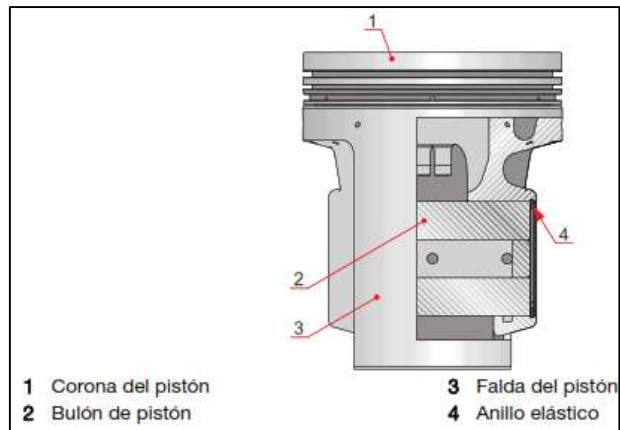
**Figura 38: Camisa de Cilindro**

*Fuente: Manual de Fabricante*

En el interior de los cilindros las paredes son totalmente lisas y se fabrican con fundiciones de acero aleadas con níquel, molibdeno y cobre. En algunos casos se les alea con cromo para una mayor resistencia al desgaste. En el cilindro se adaptan unas camisas colocadas a presión entre el bloque y el cilindro, la cual es el elemento de recambio o modificación en caso de una reparación. De esta manera conseguimos que el bloque este más separado del calor y podemos utilizar materiales más ligeros como el aluminio para la su construcción. (Martinez Villegas, 2007)

### **2.3.2.1.3. Pistón**

El pistón tiene un diseño compuesto con falda de hierro de fundición nodular y una corona de acero. La falda del pistón se lubrica a presión, lo que garantiza un caudal de aceite de lubricación bien controlado a la camisa de cilindro en todas las condiciones de funcionamiento. El aceite se conduce a través de la biela a los espacios de refrigeración del pistón. La refrigeración del pistón funciona según el principio de "efecto coctelera".

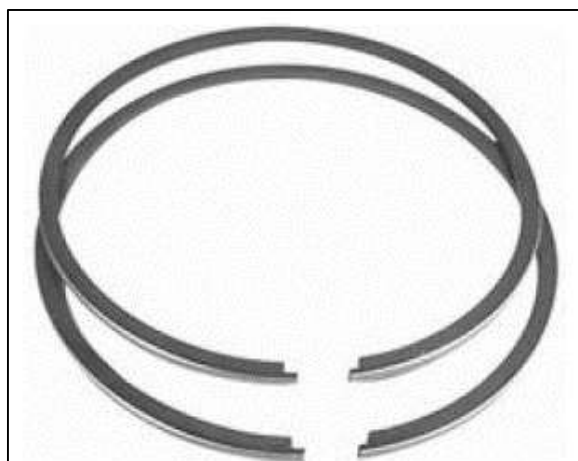


**Figura. 39: Pistón**

*Fuente: Manual de Fabricante*

#### **2.3.2.1.4. Anillos**

Los anillos van montados en la parte superior del cilindro, rodeando completamente a éste para mantener una buena compresión sin fugas en el motor. Los anillos, también llamados segmentos, son los encargados de mantener la estanqueidad de compresión en la cámara de combustión, debido al posible escape de los vapores a presión tanto de la mezcla como de los productos de la combustión. También se monta un anillo de engrase, para poder lubricar el cilindro correctamente. Los anillos o segmentos suelen fabricarse de hierro aleado con silicio, níquel y manganeso.



**Figura 40: Anillos**

*Fuente: Manual de Fabricante*



#### 2.3.2.1.5. Bulones

Es el elemento que se utiliza para unir el pistón con la biela, permitiendo la articulación de esa unión. El bulón normalmente se construye de acero cementado y templado, con proporciones de carbono, cromo, manganeso y silicio. Para que el bulón no se salga de la unión pistón/biela y ralle la pared del cilindro, se utilizan distintos métodos de fijación del bulón.

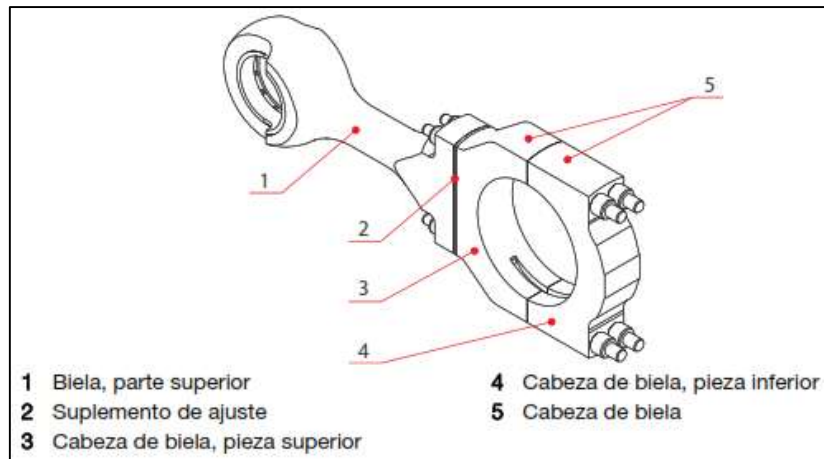


**Figura. 41: Bulón**

*Fuente: Manual de Fabricante*

#### 2.3.2.1.6. Biela

La biela tiene un diseño de tres piezas denominado "biela de tipo marino". La biela está forjada y mecanizada con secciones redondas de aleación de acero. El extremo inferior se divide horizontalmente en tres partes. Todos los pernos de la biela están apretados hidráulicamente. Entre la parte superior de la biela y la cabeza de biela hay una lámina de compresión. El aceite se conduce al cojinete del bulón y al pistón a través de un orificio de la biela.



**Figura 42: Biela**

*Fuente: Manual de Fabricante*

### 2.3.2.2. Culata

La culata es la parte superior del motor en donde se encuentran las válvulas de admisión y de escape, el eje de levas, las bujías y las cámaras de combustión. En la culata es donde encontramos todo el sistema de distribución, aunque antiguamente el eje de levas se encontraba en la parte inferior del motor.

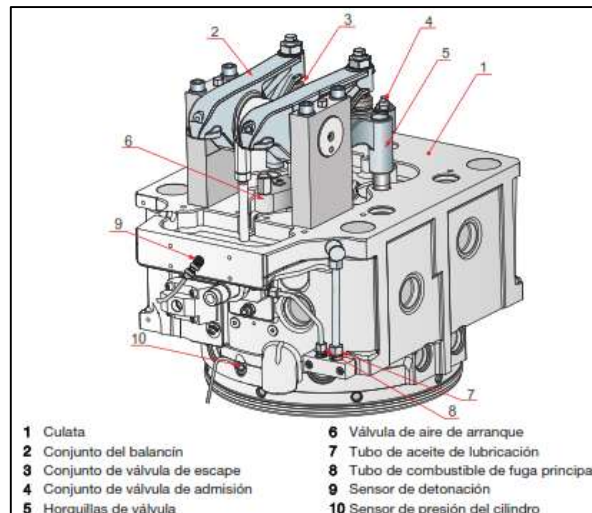
La culata de los cilindros está fabricada en hierro colado nodular. Se coloca en su sitio con espárragos del bloque del motor y se fija con tuercas de apriete hidráulico. Una junta sella la culata a la camisa de cilindro.

La chapa de fuego de la culata es una pieza de la cámara de combustión. Durante la combustión, la chapa de fuego está expuesta a altas presiones de combustión y altas temperaturas. El aire de combustión se conduce del depósito de aire al cilindro, a través del canal múltiple y del canal de admisión de la culata.

La culata está equipada con lo siguiente:

- Conjuntos de válvula de admisión y escape (4)(3)
- Inyector de combustible
- Conjunto del balancín (2)
- Válvula de aire de arranque (6)

Las conexiones de aire de carga, gas de escape y agua de refrigeración están integradas en un conducto múltiple.

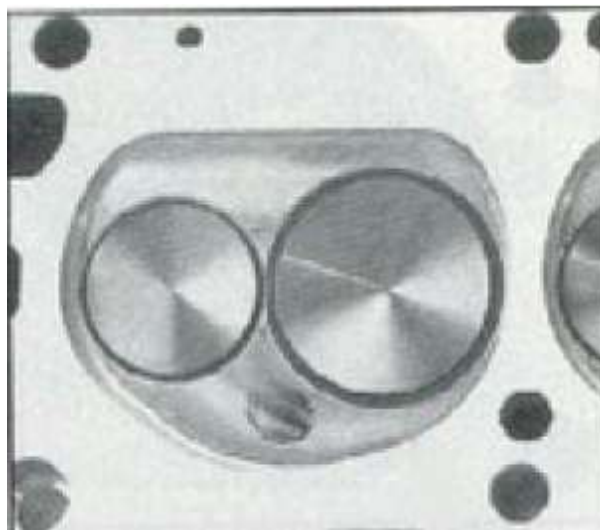


**Figura 43: Culata Individual**

*Fuente: Manual de Fabricante*

#### **2.3.2.2.1. Cámara de combustión**

Es un espacio vacío que está ubicado en la culata donde tiene lugar la combustión de la mezcla de aire y combustible. En la cámara de combustión también van ubicadas las válvulas de admisión y escape, la bujía y en algunos casos el inyector de Combustible (en caso de inyección directa). Las temperaturas alcanzadas en la cámara de combustión son muy elevadas, por eso mismo se ha de mantener siempre bien refrigerada. El volumen de la cámara de combustión tiene que venir determinado por la relación de compresión, es decir, la relación entre el volumen del cilindro y el volumen de ésta. (Martinez Villegas, 2007).



**Figura 44: Cámara de Combustión**

#### 2.3.2.2.2. Válvulas de admisión y escape

Las válvulas van ubicadas en la cámara de combustión y son los elementos encargados de abrir y cerrar los conductos por donde entra la mezcla (válvulas de admisión) y por donde salen los gases de escape (válvulas de escape). Normalmente la válvula de admisión suele ser de mayor diámetro que la de escape, debido a que la dificultad que hay en entrar los gases de admisión es más elevada que evacuar al exterior los gases de escape. Debido a las altas temperaturas que alcanzan las válvulas (sobre todo las de escape), se fabrican de materiales muy resistentes al calor como aceros al cromo-níquel, al tungsteno-silicio o al cobaltomolibdeno. En válvulas de admisión, debido a que no alcanzan temperaturas tan elevadas se utilizan aceros al carbono con pequeñas proporciones de cromo, silicio y níquel. (Martinez Villegas, 2007). La culata dispone de válvulas de admisión y escape (5).

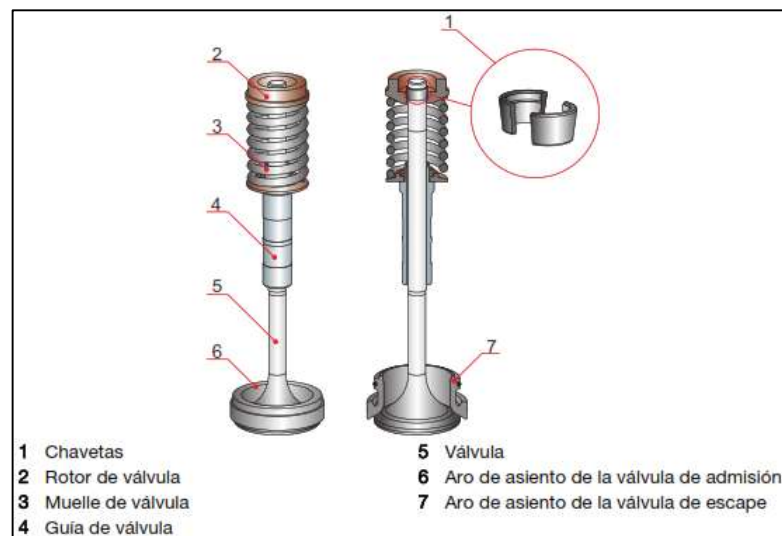


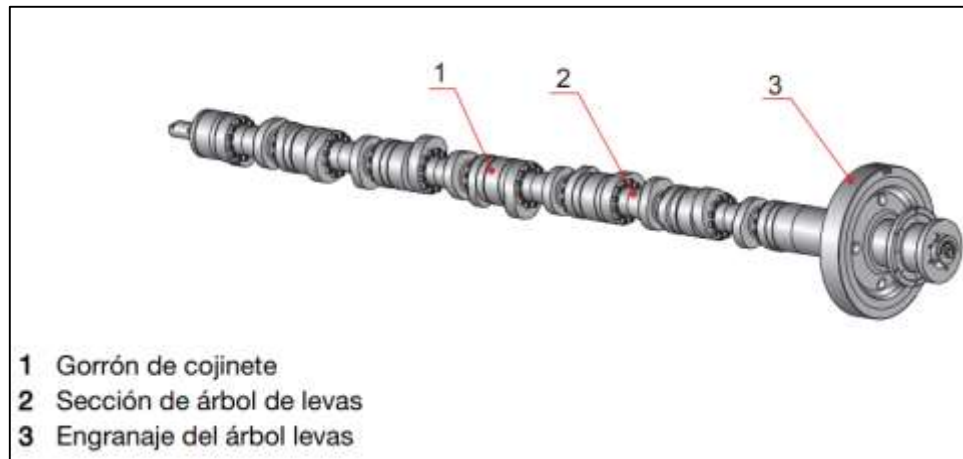
Figura 45: Válvula de Admisión y Escape

Fuente: Manual de Fabricante

#### 2.3.2.2.3. Árbol de levas

El árbol de levas o también llamado eje de levas mueve el accionamiento de las válvulas de admisión y escape, las bombas de inyección de combustible y el distribuidor de aire de arranque. El Árbol de levas se construye de hierro fundido aleado con pequeñas proporciones de carbono, silicio, manganeso, cobre, cromo, fósforo y azufre

Los taqués de válvula siguen el perfil de la leva del árbol de levas que gira y transmiten el movimiento a los balancines a través de los empujadores. Éstos accionan las válvulas de escape y admisión por medio de horquillas. El árbol de levas está formado por tramos individuales con levas integradas para cada cilindro. Las muñequillas de cojinete son piezas independientes, que se pueden desmontar lateralmente.



**Figura 46: Árbol de levas**

*Fuente: Manual de Fabricante*

### **2.3.2.3. Carter**

El cárter es la parte inferior del motor donde se encuentra el cigüeñal, los cojinetes del cigüeñal y el volante de inercia. En el cárter está depositado el aceite del sistema de lubricación, y en su parte inferior tiene un tapón para el vaciado de éste. El cárter generalmente está provisto de aletas en su parte externa para mejorar la refrigeración de éste y mantener el aceite a una buena temperatura de funcionamiento, que oscila generalmente entre los 80°C y los 90°C. El cárter debido a que no se calienta demasiado, debe de tener una buena refrigeración para mantener el aceite a una temperatura óptima como ya hemos

dicho antes, por eso se construye de materiales muy ligeros, pero con una buena conductividad térmica. El material más utilizado es el aluminio, aunque se le mezclan pequeñas porciones de cobre y de zinc. (Martínez Villegas, 2007)

#### **2.3.2.3.1. Tapas del motor**

Tapas del motor Las tapas del cárter del motor y las del árbol de levas son de fundición de metal ligero. Están selladas con el bloque del motor mediante juntas de goma. Algunas de las tapas del cárter del motor del lado trasero del motor están equipadas con una válvula de seguridad que descarga el exceso de presión en caso explosión en el cárter del motor.

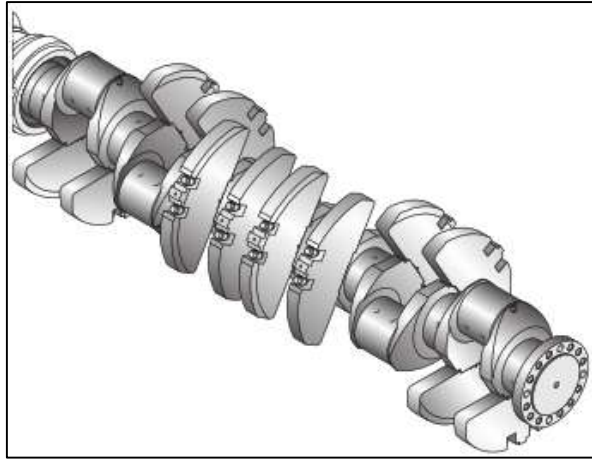
#### **2.3.2.3.2. Cigüeñal**

El cigüeñal es el encargado de transformar el movimiento lineal de la biela en

movimiento rotatorio o circular. Junto con el pistón y la biela, se considera la pieza más importante del motor. El cigüeñal es un eje, provisto de manivelas y contrapesos, dentro de los cuales generalmente se encuentran orificios de lubricación. El cigüeñal es una pieza que ha de soportar grandes esfuerzos, por eso se construye de materiales muy resistentes para que puedan aguantar cualquier movimiento sin romperse. Los cigüeñales normalmente se fabrican de acero al Cromo-Molibdeno con cobalto y níquel. (Martinez Villegas, 2007).

El cigüeñal está forjado como una sola pieza. Se lubrica a través del orificio de aceite de lubricación principal, que suministra el aceite a través del cojinete de la cabeza de biela desde donde pasa a la biela y al pistón. Los orificios de aceite del cigüeñal están diseñados de forma que el caudal suministrado a la biela es intermitente. Esto hace que el aceite circule en un sentido.

El cigüeñal se puede girar para realizar trabajos de mantenimiento con un virador que actúa sobre el volante motor.



**Figura 47: Cigüeñal**

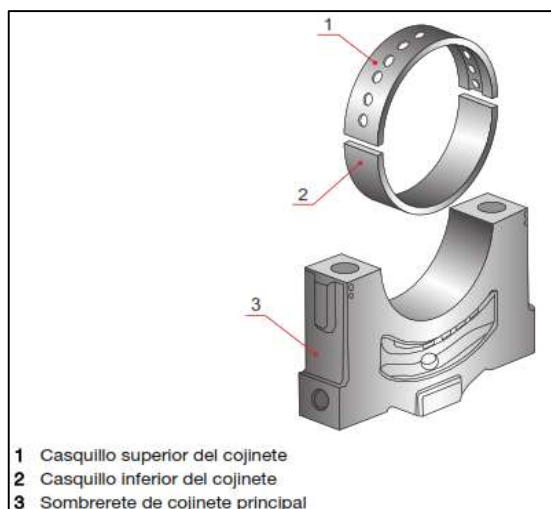
*Fuente: Manual de Fabricante*

### 2.3.2.3.3. Cojinete principal

El cojinete principal es un cojinete partido trimetálico. El casquillo superior del cojinete (1) tiene una ranura de aceite. El casquillo inferior del cojinete (2) es liso.

Los sombreretes de cojinete principal (3), que sostienen el cigüeñal suspendido, se fijan con espárragos y tuercas de apriete hidráulico. Los casquillos de cojinete principal están guiados axialmente con levas para garantizar que se montan de la forma correcta

Si se detectan temperaturas anómalas en los cojinetes principales, debe comprobarse el suministro de aceite de lubricación y los casquillos de cojinete principal. Verifique también la desviación del cigüeñal.



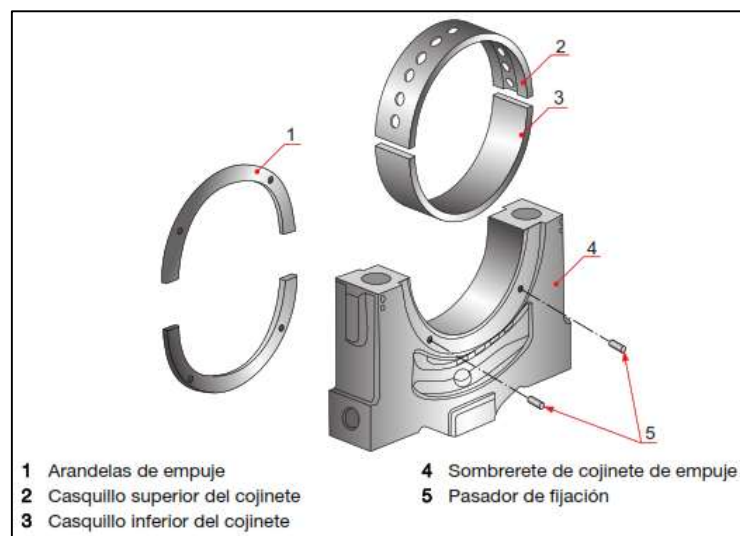
**Figura 48: Cojinete Principal**

*Fuente: Manual de Fabricante*

#### 2.3.2.3.4. Cojinete de empuje.

En el lado de accionamiento del motor, hay un cojinete de empuje/volante motor combinado que se suele denominar "cojinete 0" (cojinete cero).

El sombrerete y los casquillos del cojinete 0 tienen el mismo diseño que los de un cojinete principal, pero su tamaño es algo distinto. Los dos pares de arandelas de empuje guían al cigüeñal axialmente. Las arandelas de empuje inferiores (1) se sujetan en su sitio para que no giren a causa de los pasadores de fijación. El cojinete de empuje se desmonta y se monta del mismo modo que el resto de cojinetes principales.



**Figura 49: Cojinete de Empuje**

*Fuente: Manual de Fabricante*

#### 2.3.2.3.5. Volante motor

El volante motor o volante de inercia es el encargado de mantener al motor estable en el momento que no se acelera. En el volante motor se suelen acoplar distintos elementos del motor para recibir movimiento del motor mediante correas o cadenas (árbol de levas, bomba de agua y aceite, etc.). El volante motor es una pieza circular que ofrece una resistencia a ser acelerado o desacelerado la volante es un almacenador de energía. En el momento en que el motor no se acelera, es decir (fase de admisión, compresión y escape) se ha de mantener la velocidad del motor para que no haya una caída de rpm. El volante motor puede estar construido de materiales distintos, dependiendo si queremos un volante motor muy



pesado o ligero. El volante motor pesado mantendrá mejor la velocidad del motor, pero perderemos algo de aceleración. Si el volante motor es más ligero, tenderá a caer más de rpm, pero la aceleración del mismo será más rápida, por eso los volantes ligeros se montan en motores con un número considerable de cilindros.

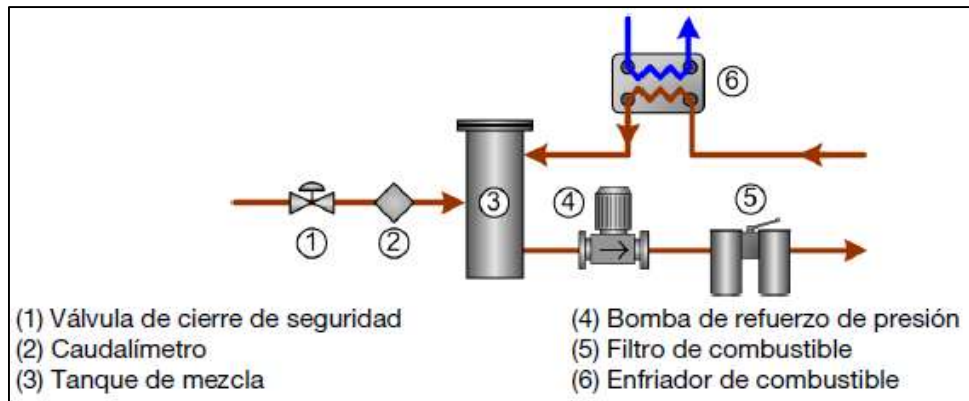
El volante dispone de una escala graduada de  $360^\circ$ , que empieza en el PMS de encendido del cilindro 1. Lleva marcado el PMS de encendido de cada cilindro en el volante. Hay una marca común para los cilindros de motores con número par de cilindros en una bancada: un pistón está en el PMS de encendido y el otro en el PMS de escape. La escala empieza desde el PMS de encendido del cilindro A1. Por tanto, el PMS de encendido del cilindro B1 está a  $55^\circ$ . Los intervalos de encendido en grados del ángulo del cigüeñal de un motor con cilindros en V se determinan dividiendo  $720^\circ$  por el número de cilindros de una bancada.

#### **2.3.2.4. Sistema de Combustible**

La finalidad del sistema de combustible en el motor Diesel es mantener la presión adecuada. También garantiza que la temperatura del combustible es correcta. El sistema cuenta con una válvula de cierre neumática y un caudalímetro aguas arriba del tanque de mezcla.

La bomba de refuerzo de la salida del tanque de mezcla eleva la presión del combustible y lo bombea al motor a través del filtro. La cantidad de combustible que circula por el motor supera considerablemente el consumo de combustible, por lo que el exceso de combustible se devuelve al tanque de mezcla. El enfriador de combustible se encuentra en la línea de retorno de combustible.

El combustible de fuga sucio del motor se conduce al tanque de recolección de la unidad de refuerzo.



**Figura 50: Sistema de circulación de combustible**

*Fuente: Manual de Fabricante*

### 2.3.2.5. Inyección de combustible Common rail:

El combustible fluye desde el tanque hasta la bomba de alta presión, hasta aquí el sistema es de baja presión. En algunas ocasiones hacen uso de bombas eléctricas dentro del tanque de combustible.

La bomba de alta presión es la encargada de generar la suficiente presión de combustible, para así garantizar un pulverizado perfecto dentro del cilindro facilitando la inflamación espontánea de la mezcla.

Las presiones pueden variar entre 300 y los 2500 bar, según las exigencias de carga del motor.

El combustible al salir de la bomba de alta presión pasa por una serie de conductos comunes (Common rail) o rampa o colector, para así llegar a los inyectores. Los inyectores son comandados de forma eléctrica por la computadora del vehículo.

Antiguamente la apertura de los inyectores se producía por diferencias de presiones dentro del mismo.

Se lo puede asimilar con un sistema de inyección de motores a gasolina. La gran ventaja que presenta el sistema Common rail es la que por ser controlada electrónicamente se pueden lograr preinyecciones la inyección principal y una post-inyección, para lograr un mayor rendimiento como así también un nivel de ruido considerablemente menor. Para lograr el funcionamiento óptimo del sistema Common rail se necesita de diferentes sensores y actuadores.

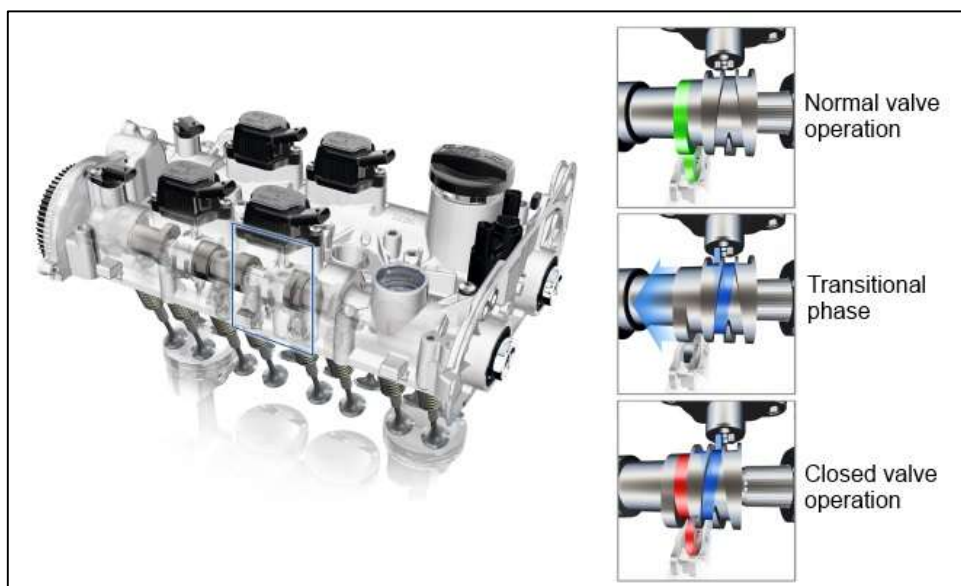


**Figura 51: Inyección Common Rail**

*Fuente: Manual de Fabricante*

#### **2.3.2.6. Sistema Cilindros bajo demanda, desconexión de cilindros:**

El sistema de cilindros bajo demanda permite usar, en un motor V20, por ejemplo, los 20 cilindros cuando el Grupo Electrónico está en carga base o se requiere alta potencia del motor, pero cuando el Grupo Generador está transitando a velocidad media y no se requiere gran demanda de potencia del motor, solo se activan 10 cilindros reduciendo el consumo de combustible drásticamente.



**Figura 52: Cylinder on Demand (Modificación en el Cigüeñal y Eje de Levas)**

*Fuente: Manual de Fabricante*

### 2.3.2.7. Sistema de refrigeración

El sistema de refrigeración del motor utiliza agua dulce tratada químicamente. Se divide en dos circuitos de refrigeración: uno de baja temperatura (LT) y otro de alta temperatura (HT).

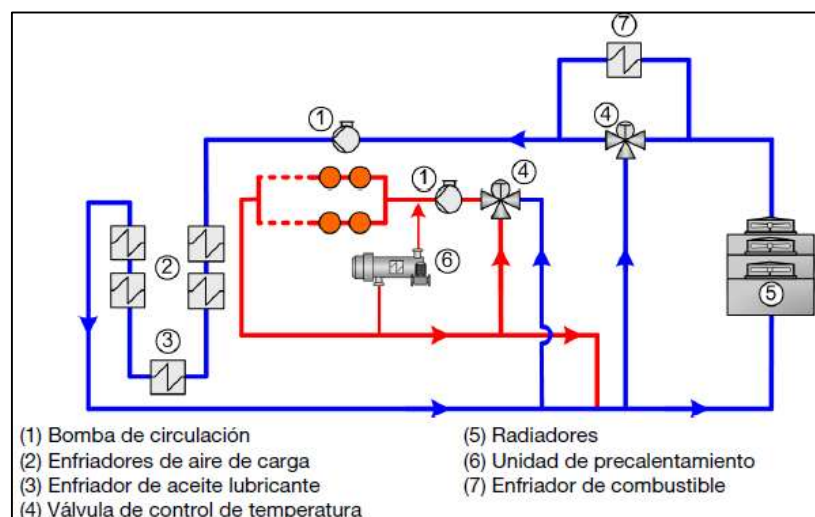
El agua de refrigeración del sistema se hace circular mediante bombas centrífugas accionadas directamente e instaladas sobre el motor.

El circuito de agua de refrigeración LT elimina el calor generado en el aire de carga, el aceite lubricante y el fueloil. El agua del circuito HT refrigera la camisa del motor.

La temperatura de los circuitos LT y HT se controla mediante válvulas de tres vías. Las válvulas de control de temperatura conducen el agua a los radiadores de refrigeración o de vuelta al motor, dependiendo de la temperatura del agua.

La unidad de precalentamiento está conectada en paralelo con la bomba de agua HT accionada por motor. La unidad toma agua caliente de la línea de salida del motor y la bombea nuevamente hacia el circuito de agua HT del motor.

Los circuitos de agua de refrigeración incluyen equipo para controlar la presión y temperatura del sistema.



**Figura 53: Sistema de Refrigeración**

*Fuente: Manual de Fabricante*

### 2.3.2.8. Sistema de aire comprimido- aire de arranque

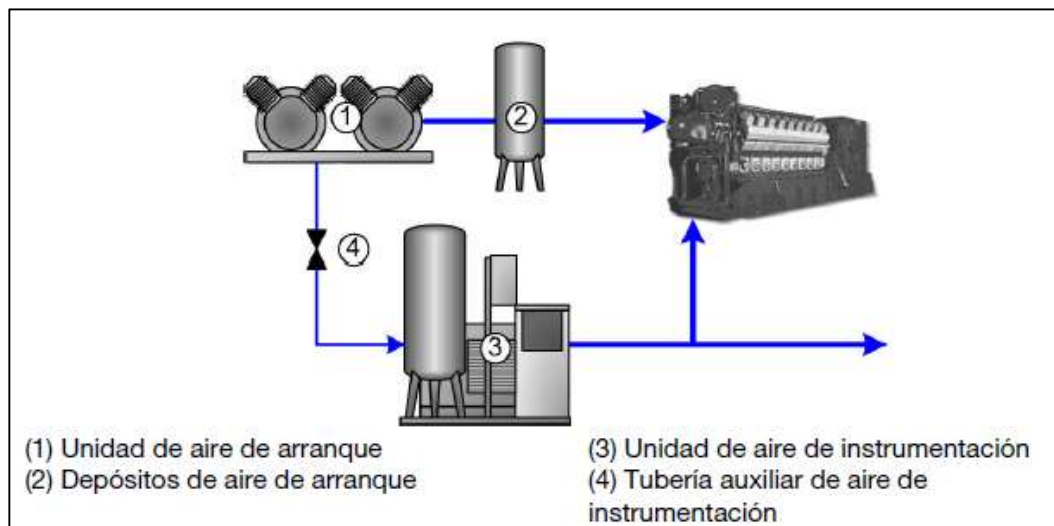
El aire comprimido se utiliza para arrancar el motor. El funcionamiento de las válvulas neumáticas también precisa un suministro considerable de aire comprimido.

El sistema de aire comprimido incluye dos subsistemas con compresores separados. El aire de alta presión necesario para arrancar el motor se obtiene de la unidad de aire de arranque, mientras que la unidad de aire de instrumentación suministra aire a una presión inferior a todos los mecanismos neumáticos del motor y de los sistemas auxiliares.

La unidad de aire de arranque dispone de una tubería de salida con un reductor de presión conectado al sistema de aire de instrumentación. De este modo, la unidad de aire de arranque se puede usar como mecanismo de seguridad del compresor de aire de instrumentación.

El aire comprimido de la unidad del aire de arranque se guarda en depósitos de aire.

Los tubos del sistema de aire comprimido están equipados con válvulas de vaciado situadas en posiciones bajas para vaciar el agua de condensación del sistema.



**Figura 54: Sistema de Aire de arranque e Instrumentos**

*Fuente: Manual de Fabricante*

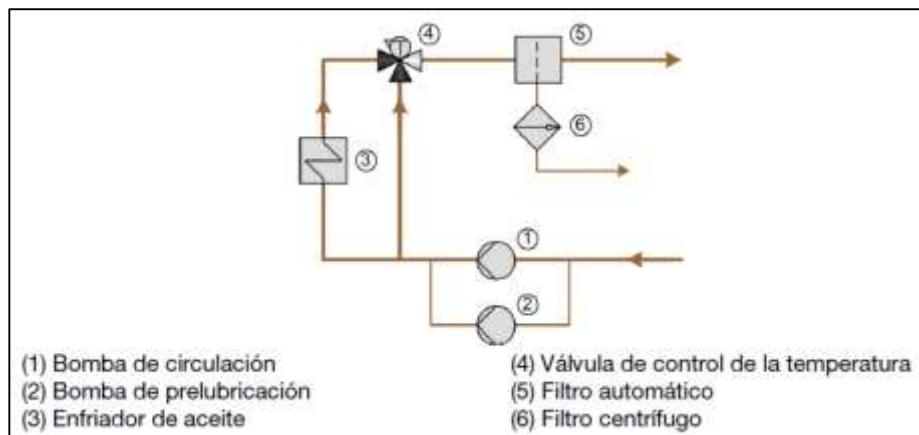
### 2.3.2.9. Sistema de Lubricación

El sistema de circulación de aceite de lubricación suministra al motor aceite de lubricación limpio con la presión y temperatura correctas. Además de lubricar el motor, el aceite también lo refrigera.

El aceite se hace circular por el sistema de filtrado y refrigeración con una bomba accionada por un motor. Una bomba de prelubricación accionada eléctricamente está conectada en paralelo con la bomba de circulación principal. Las bombas, los filtros y el circuito de control de la temperatura están integrados en el motor.

El sistema de aceite de lubricación del motor también lubrica los turbocompresores.

La bomba de circulación toma aceite del cárter de aceite del motor y lo bombea por un enfriador. Una válvula de tres vías en el circuito de aceite de lubricación regula el caudal de aceite que va al enfriador y controla la temperatura del aceite. El aceite pasa por un filtro automático antes de entrar en el motor y en los turbocompresores. El aceite de retro lavado del filtro automático se limpia en un filtro centrífugo.



**Figura 55: Sistema de Lubricación**

*Fuente: Manual de Fabricante*

### 2.3.3. Generador Eléctrico

Un generador es una máquina eléctrica rotativa que transforma energía mecánica en energía eléctrica. Lo consigue gracias a la interacción de los

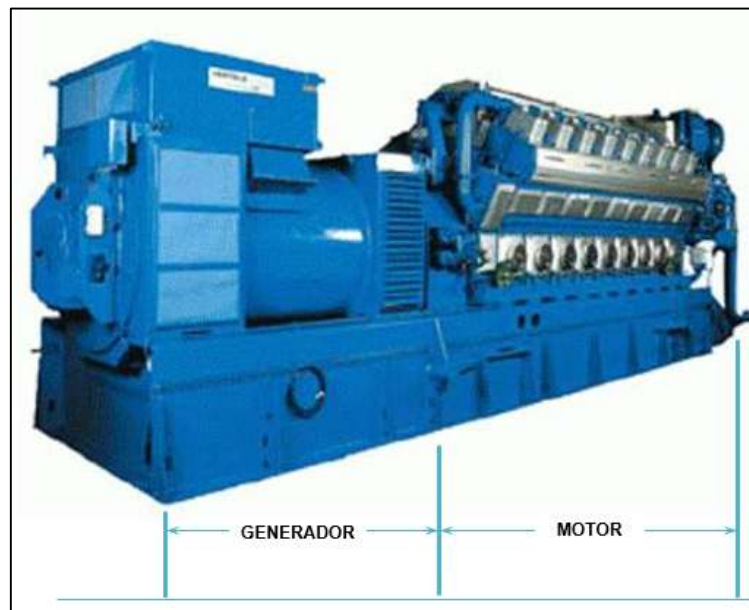
dos elementos principales que lo componen: la parte móvil llamada rotor, y la parte estática que se denomina estator.

Cuando un generador eléctrico está en funcionamiento, una de las dos partes genera un flujo magnético (actúa como inductor) para que el otro lo transforme en electricidad (actúa como inducido).

Los generadores eléctricos se diferencian según el tipo de corriente que producen. Así, nos encontramos con dos grandes grupos de máquinas eléctricas rotativas: los alternadores y las dinamos.

Los alternadores generan electricidad en corriente alterna. El elemento inductor es el rotor y el inducido el estator. Un ejemplo son los generadores de las centrales eléctricas, las cuales transforman la energía mecánica en eléctrica alterna.

Las dinamos generan electricidad en corriente continua. El elemento inductor es el estator y el inducido el rotor. Un ejemplo lo encontraríamos en la luz que tiene una bicicleta, la cual funciona a través del pedaleo.



**Figura 56: Generador**

*Fuente: Manual de Fabricante*

#### **2.3.3.1. Estator**

Parte fija exterior de la máquina. El estator está formado por una carcasa metálica que sirve de soporte. En su interior encontramos el núcleo del inducido, con forma de corona y ranuras longitudinales, donde se alojan los conductores del enrollamiento inducido.

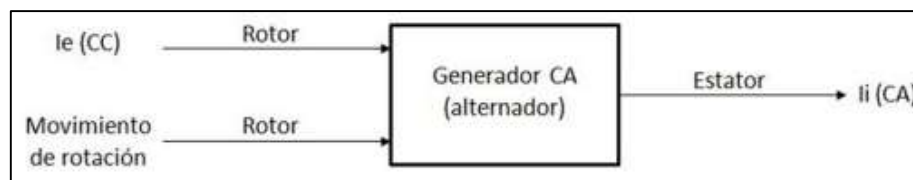
### 2.3.3.2. Rotor

Parte móvil que gira dentro del estator El rotor contiene el sistema inductor y los anillos de rozamiento, mediante los cuales se alimenta el sistema inductor. En función de la velocidad de la máquina hay dos formas constructivas.

Rotor de polos salidos o rueda polar: Utilizado para turbinas hidráulicas o motores térmicos, para sistemas de baja velocidad.

Rotor de polos lisos: Utilizado para turbinas de vapor y gas, estos grupos son llamados turboalternadores. Pueden girar a 3600, 1800 o 1200 r.p.m. en función de los polos que tenga, y para producir corriente alterna a 60 Hz.

El alternador es una máquina eléctrica rotativa síncrona que necesita de una corriente de excitación en el bobinado inductor para generar el campo eléctrico y funcionar. Por lo tanto, su diagrama de funcionamiento es el siguiente:



**Figura 57: Diagrama de funcionamiento del Alternador**

*Fuente: Manual de Fabricante*

### 2.3.3.3. Excitatriz de los Alternadores

Los alternadores necesitan una fuente de corriente continua para alimentar los electroimanes (devanados) que forman el sistema inductor. Por eso, en el interior del rotor se incorpora la excitatriz. La excitatriz es la máquina encargada de suministrar la corriente de excitación a las bobinas del estator, parte donde se genera el campo magnético. Según la forma de producir el flujo magnético inductor podemos hablar de:

- Excitación independiente. La corriente eléctrica proviene de una fuente exterior.

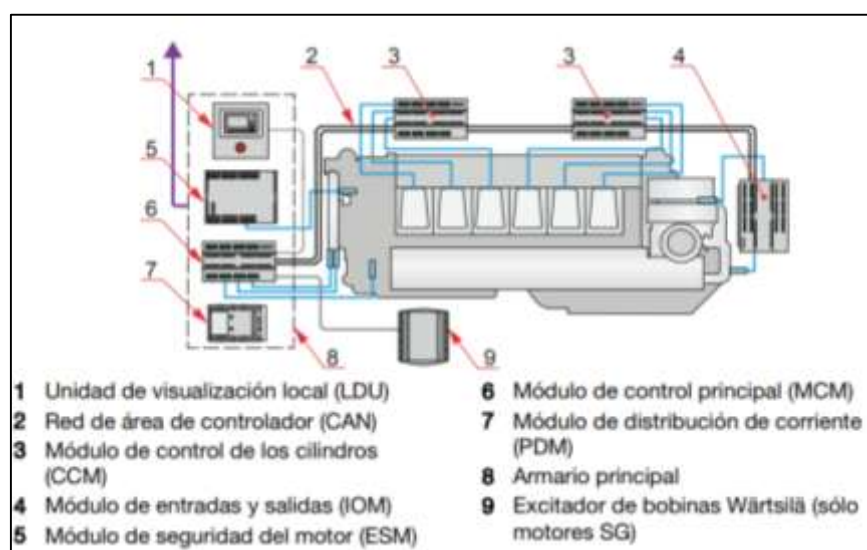


- Excitación serie. La corriente de excitación se obtiene conectando las bobinas inductoras en serie con el inducido. Toda la corriente inducida a las bobinas del rotor pasa por las bobinas del estator.
- Excitación shunt o derivación. La corriente de excitación se obtiene conectando las bobinas del estator en paralelo con el inducido. Solo pasa por las bobinas del estator una parte de la corriente inducida.
- Excitación compound. En este caso las bobinas del estator están conectadas tanto en serie como en paralelo con el inducido.

#### 2.3.4. Sistema eléctrico y de control

##### 2.3.4.1. Sistema de automatización UNIC

El sistema de automatización UNIC es un sistema de control y supervisión del motor modular e integrado. El sistema soporta temperaturas y vibraciones variables y puede usarse, por tanto, en varios entornos exigentes. Se monta directamente en el motor ya que no tiene armarios externos ni paneles dispersos. Por tanto, el motor se puede entregar totalmente probado de fábrica. El número de entradas y salidas se determina para adaptarse a la aplicación de forma óptima. La señal de aislamiento galvánico también se fabrica para cumplir con estos requisitos



**Figura 58: Descripción del sistema UNIC C3**

*Fuente: Manual de Fabricante*

#### **2.2.1.1. Modos de funcionamiento**

El grupo electrógeno puede accionarse en el modo automático o manual. La selección del modo de control se realiza con el interruptor "generating set control" (control del grupo electrógeno) de la unidad de control manual. En el modo automático, el sistema de control selecciona los métodos de control del motor y el generador según la señal "parallel with grid" (paralelo con red). En el modo manual, los modos de control del motor y el generador se seleccionan con los interruptores de la unidad de control manual. Algunos modos de control se activan sólo cuando el grupo electrógeno está en paralelo con la red.

#### **2.2.1.2. Panel de control del módulo auxiliar del motor**

Panel de control del módulo auxiliar del motor se emplea para controlar parte de los módulos auxiliares específicos del motor, incluido el equipo instalado en el grupo electrógeno y en otras ubicaciones del exterior del módulo.

Las unidades siguientes se controlan desde el panel de control del módulo auxiliar del motor:

- Bomba de prelubricación
- Unidad de ventilación de gases de escape
- Bomba de precalentamiento
- Bomba de refuerzo de presión de combustible
- Bomba de combustible de fuga limpio
- Bomba de combustible de fuga sucio
- Bomba de combustible piloto
- Bomba de agua de refrigeración de combustible
- Resistencia calefactora anticondensación del generador.

El panel de control también incluye un botón de parada de emergencia para el motor y un botón de restablecimiento para el relé de parada de emergencia del virador.

#### **2.2.1.3. Sistema PLC**

El sistema del controlador lógico programable (PLC) es el núcleo del sistema de control. El sistema PLC controla el funcionamiento del grupo

electrógeno y de algunos de los equipos auxiliares. Recoge datos, ejecuta controles, genera alarmas y realiza escalas de medición para el terminal WOIS. El PLC incluye una unidad de procesamiento central (CPU) que contiene las funciones de control y una serie de tarjetas de E/S para recoger y transmitir las señales de proceso.

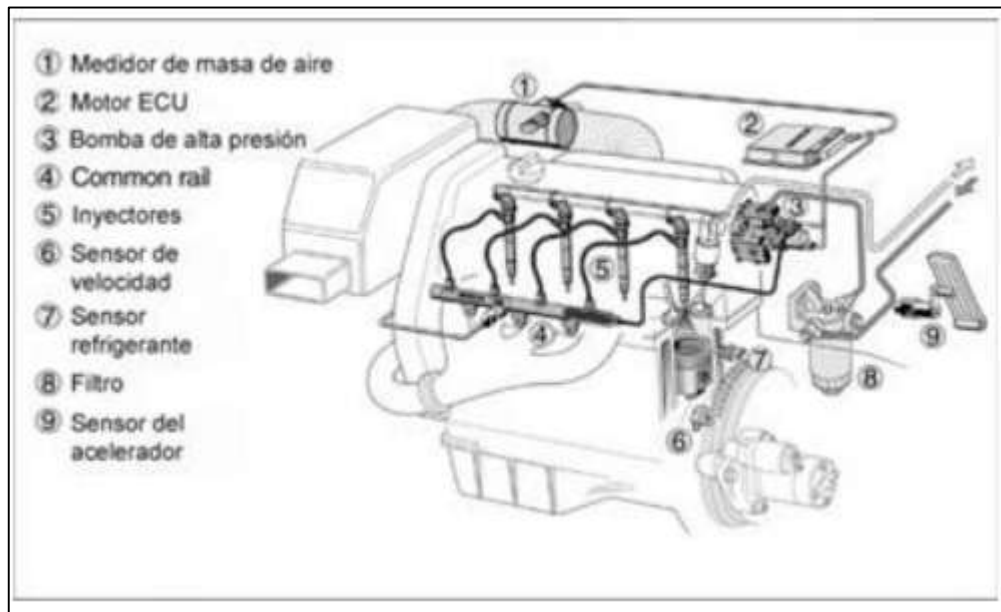
Las funciones de control principales del sistema de PLC del grupo electrógeno son el arranque y la parada del motor, el control de velocidad y carga del motor, el control de salida del generador, la sincronización y el control de los sistemas auxiliares. El PLC controla la velocidad del motor junto con el sistema de control del motor.

El WOIS lee los valores de la memoria del PLC. Los comandos de control y los valores de ajuste del puesto de trabajo WOIS se transfieren automáticamente al PLC.

#### **2.3.5. Sistemas de inyección con acumulador “Common Rail”**

El Common Rail es uno de los sistemas de inyección más perfeccionados que existen actualmente. Permite cumplir todos los requisitos planteados a los motores diesel, que cada vez son más estrictos. La integración de los sistemas Common Rail en los motores diesel de inyección directa ha supuesto un paso más en la mejora de estos motores. Debido al preciso control de la inyección, que permite mejorar la combustión, no sólo se consigue reducir las emisiones contaminantes, también reducir el consumo de combustible, aumentar la potencia y reducir las vibraciones y el sonido del motor. La principal ventaja que presenta el sistema Common Rail es la capacidad de variar fácilmente la presión y el tiempo de inyección dentro de un amplio rango. Esto se consigue separando los componentes de generación de presión (bomba de alta presión) y de inyección de combustible (inyectores electrónicos). El “raíl” o conducto actúa como acumulador de presión. De esta forma la presión en el acumulador es independiente del régimen de giro del motor y del caudal de inyección, cosa que no se podía conseguir en los sistemas con levas descritos anteriormente. Este sistema es muy parecido al que ya se venía utilizando en los motores de inyección directa de gasolina, con la

diferencia de que la presión máxima en ellos era de 5 o 6 bar, mientras que los sistemas Common Rail actuales superan 2000 bar



**Figura 59. Esquema de un sistema Common Rail en un motor de 4 cilindros, (Robert Bosch GmbH)**

*Fuente: Manual de Fabricante*

#### **2.3.5.1. Aplicaciones**

El sistema de inyección Common Rail con motores de inyección directa se usa actualmente en prácticamente todo tipo de vehículos:

- Automóviles con motores diesel de todos los tamaños: desde utilitarios con motores de 3 cilindros, 800 cc, 30 kW (41 cv) de potencia, par motor de 100 Nm y un consumo de 3.5 l/100km; hasta automóviles de gama alta con motores de 8 cilindros, 4 litros de cilindrada, 250 kW (340 CV) de potencia y un par motor de 700 Nm
- Camiones ligeros con motores de hasta 30 kW/cilindro.
- Maquinaria de uso agrícola y para la construcción.
- Camiones pesados, locomotoras y barcos con grandes motores que pueden llegar hasta los 200 kW/cilindro. El sistema Common Rail ofrece una gran flexibilidad en lo relativo a la adaptación de la inyección al motor. Esto se consigue mediante:
- Elevada presión de inyección, que puede superar los 2000 bar en los sistemas de última generación.

- Presión de inyección adaptada al estado de servicio (200... 2000 bar).
- Comienzo variable de la inyección.
- Posibilidad de efectuar varias inyecciones previas y posteriores (incluso postinyecciones muy retardadas).

Todo esto hace que se consiga esa mejora en cuanto a potencia, rendimiento, reducción de emisiones, etc. Esto ha hecho que hoy en día el Common-rail se haya convertido en el sistema de inyección directa más utilizado en los motores diesel modernos y de elevadas prestaciones para turismos.

### Diseño y estructura

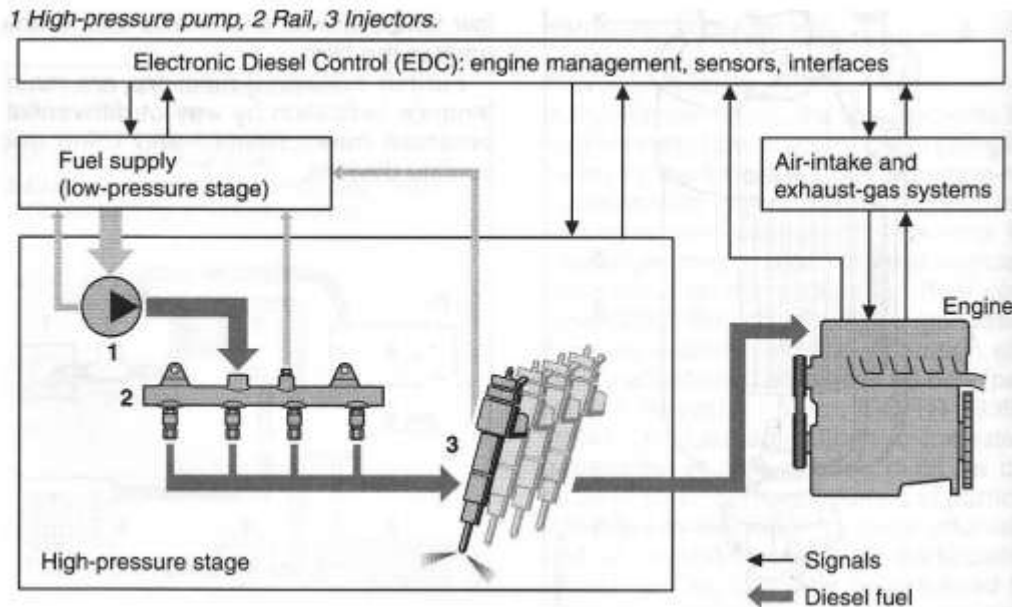
Los componentes del sistema de inyección se pueden diferenciar en tres grupos principales (Figura 62):

- Etapa de baja presión: formada por los componentes que se encargan del suministro del combustible a la etapa de alta presión.
- Sistema de alta presión, compuesto por: bomba de alta presión, “raíl” o acumulador de combustible, inyectores y líneas de alta presión.
- Sistema de Regulación Electrónica EDC (Electronic Diesel Control). Lo constituyen una serie de sensores (medidor de masa de aire, sensor de velocidad del cigüeñal, sensor del pedal del acelerador...), la unidad de control ECU (Electronic Control Unit) y los actuadores.

Los componentes principales del sistema Common Rail son los inyectores. Están equipados de una válvula de acción rápida (una electroválvula o, en el caso de las últimas generaciones, un actuador piezoeléctrico) que abre y cierra la tobera del inyector. Esto permite el control por separado del proceso de inyección para cada cilindro. Todos los inyectores se alimentan desde un raíl común o colector, de ahí el origen del término “Common Rail”.

Una de las características principales de este sistema es que la presión puede variar dependiendo del punto de operación del motor. El ajuste de

la presión se efectúa mediante la válvula reguladora de presión o la unidad de dosificación, controlada por la ECU que, a su vez, recibe información del sensor de presión del acumulador.

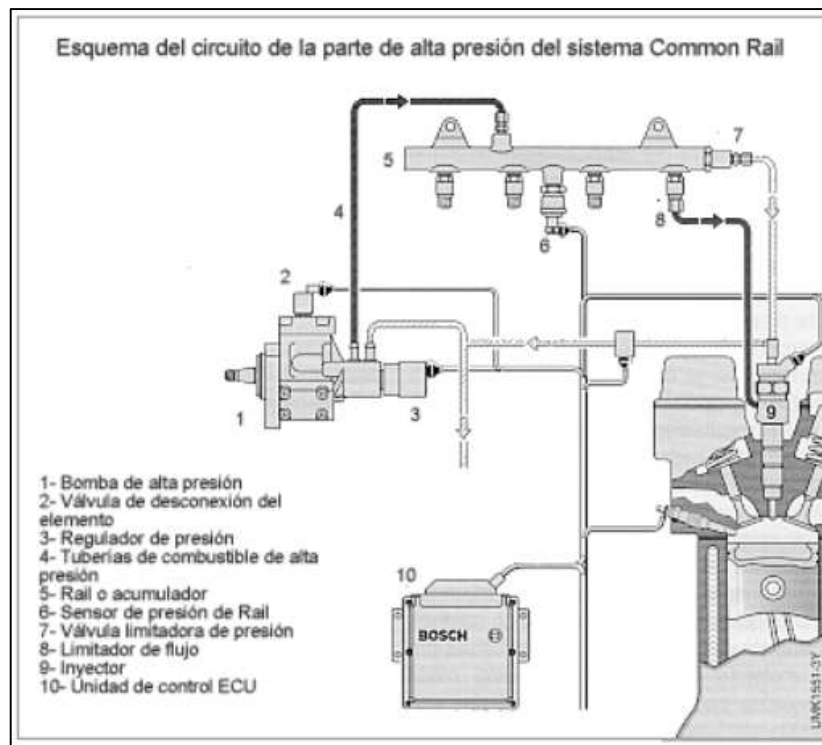


**Figura 60. Módulos del sistema Common Rail, (Robert Bosch GmbH)**

*Fuente: Manual de Fabricante*

#### **2.3.5.2. Componentes de la etapa de alta presión**

La etapa de alta presión se divide en tres sectores: generación de presión, acumulación de presión y dosificación del combustible. La generación de presión la lleva a cabo la bomba de alta presión. La acumulación de la presión se efectúa en el “rail” o acumulador o colector, en el cual está montado el sensor de presión y la válvula reguladora o limitadora de presión. Los inyectores se encargan de la dosificación exacta del combustible, asegurando el momento y el volumen de inyección correcto. Todos los sectores están interconectados mediante tuberías de combustible de alta presión



**Figura 61. Etapa de alta presión del sistema Common Rail, (Robert Bosch GmbH)**

*Fuente: Manual de Fabricante*

### 2.3.5.3. Bomba de alta presión

La bomba de alta presión se encuentra en la intersección entre la parte de baja presión y la parte de alta presión. Su función es asegurar el suministro de la cantidad de combustible necesario a la presión adecuada para todas las condiciones de funcionamiento del motor y durante toda la vida útil del motor. Además, debe mantener una reserva de combustible necesaria para un arranque rápido del motor y para elevar rápidamente la presión en el acumulador. La bomba genera permanentemente la presión necesaria en el acumulador, independientemente de la inyección de combustible. Por esta razón, en comparación con sistemas de inyección convencionales, no es necesaria la compresión durante el proceso de inyección. En los sistemas para turismos se utiliza para la generación de presión una bomba de 3 émbolos radiales (dispuestos con un ángulo de 120° entre ellos). En los vehículos industriales se utilizan bombas de disposición en serie de 2 émbolos. Estas bombas se suelen montar en el mismo lugar que las bombas rotativas. Es accionada por el motor

mediante un embrague, una rueda dentada, una cadena o una correa dentada. El número de revoluciones de la bomba mantiene con ello una relación de desmultiplicación fija con respecto al número de revoluciones del motor. Los émbolos, situados en el interior de la bomba, comprimen el combustible. Con tres carreras de alimentación por giro se generan en la bomba de émbolos radiales carreras de alimentación solapadas (sin interrupción de la alimentación), pares de accionamiento máximo reducidos y una carga uniforme del accionamiento de la bomba. En los sistemas para turismos, el par motor necesario para mover la bomba es de 16Nm, sólo aproximadamente 1/9 del necesario para una bomba rotativa equivalente. La potencia necesaria para el accionamiento de la bomba crece de forma proporcional a la presión fijada en el acumulador y al número de revoluciones de la bomba (caudal de alimentación). En un motor de 2 litros, en régimen nominal y con una presión de 1.350 bar en el acumulador, la bomba de alta presión absorbe una potencia de 3,8 kW (con un rendimiento mecánico de aprox. el 90%). La mayor demanda de energía de los sistemas Common Rail en comparación con los sistemas de inyección convencionales tiene su origen en los volúmenes de fuga y de control existentes en el inyector y, en el caso de las bombas de primera generación, en la reducción de la presión a la presión del sistema deseada mediante la válvula reguladora de presión. Las bombas de émbolos radiales de generaciones posteriores incorporan una válvula electromagnética que dosifica el combustible en la parte de baja presión. Con esta regulación se mejora el rendimiento energético, por la reducción de la demanda de energía de la bomba y de la temperatura máxima del combustible.

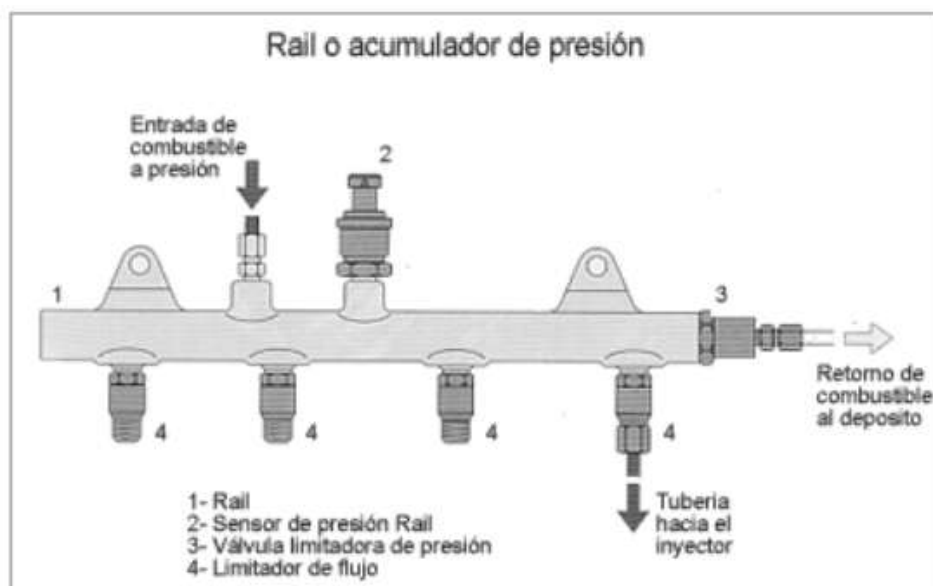
#### **2.3.5.4. Acumulador de alta presión**

Función El “rail” o conducto tiene la misión de almacenar combustible a alta presión. El volumen acumulado debe amortiguar las oscilaciones de presión producidas por el suministro pulsante de la bomba y por los procesos de inyección, garantizando que la presión permanezca constante al abrirse el inyector. El volumen debe ser lo suficientemente grande para satisfacer este requisito y a la vez lo suficientemente pequeño



para garantizar una rápida generación de presión en el arranque. Además de la función de acumulación de combustible, también se encarga de distribuir el combustible a los inyectores.

**Diseño y funcionamiento** El acumulador lleva montado un sensor de presión y una válvula limitadora o reguladora de presión. El sensor de presión mide la presión del combustible, envía la señal a la ECU y esta actúa sobre la válvula reguladora para mantener la presión requerida. El acumulador debe estar lleno continuamente de combustible a presión para abastecer a los inyectores.



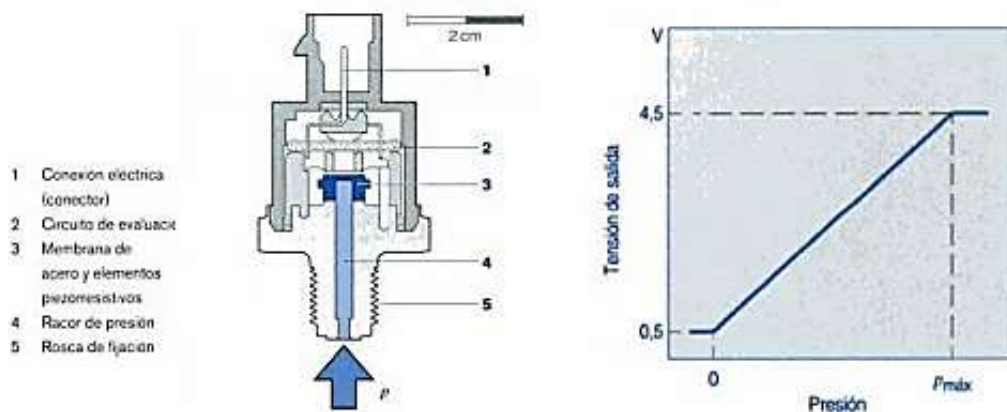
**Figura 62. Acumulador de presión**

*Fuente: Robert Bosch GmbH*

#### **2.3.5.5. Sensor de presión**

El combustible fluye a través de un taladro en el "rail" hacia el sensor de presión del mismo, cuya membrana del sensor cierra herméticamente el final del taladro. A través de un orificio en el taladro ciego llega a la membrana el combustible sometido a presión. Sobre esta membrana se encuentra el elemento piezorresistivo que transforma la presión en una señal eléctrica. Esta señal se transmite a la ECU que la interpreta como un valor de presión. El sensor de presión trabaja según el siguiente principio: La resistencia eléctrica de las capas aplicadas sobre la membrana, varía si cambia su forma. Este cambio de forma (aprox. 20µm a 1500 bar) que se establece por la presión del sistema, origina una

variación de la resistencia eléctrica y genera un cambio de tensión en el puente de resistencia abastecido con 5 V. Esta tensión es del orden de 0 a 80 mv (según la presión existente) y es amplificada por el circuito evaluador hasta un margen de 0,5 a 4,5 V (Figura 66). La medición exacta de la presión en el "rail" es imprescindible para el funcionamiento del sistema. Por este motivo son también muy pequeñas las tolerancias admisibles para el sensor de presión en la medición de presión. La precisión de la medición en el margen de servicio principal es de aproximadamente  $\pm 2\%$  del valor final. En caso de fallar el sensor de presión del "raíl", se activa la válvula reguladora de presión con una función de emergencia "a ciegas" mediante valores preestablecidos.



**Figura 63. Sensor de alta presión, Curva del sensor de alta presión**

Fuente: Robert Bosch GmbH

#### 2.3.5.6. Válvula limitadora de presión

La misión de esta válvula es equivalente a la de una válvula de sobrepresión. Esta válvula limita la presión en el acumulador abriendo un orificio de rebose en caso de aumentar el exceso la presión.

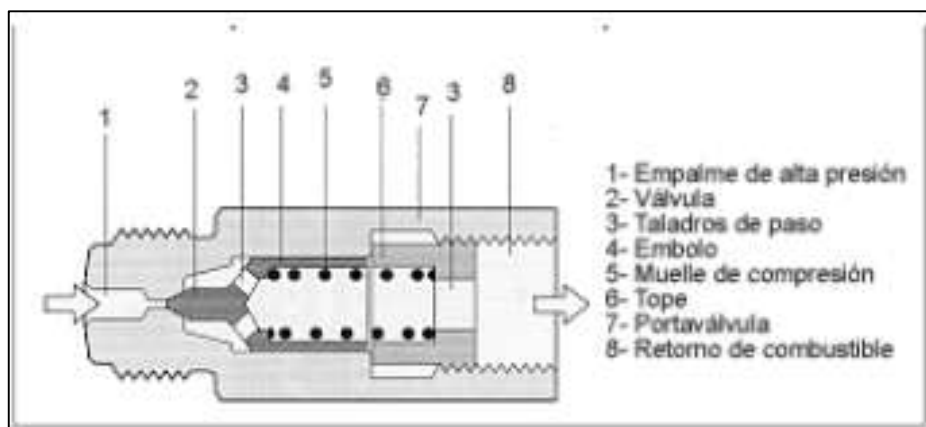
Estructura y funcionamiento (Figura 68)

Esta válvula es un componente que trabaja mecánicamente. Consta de las siguientes piezas:

- Una carcasa con rosca exterior para enroscarla en el raíl o conducto

- Una conexión en la tubería de retorno hacia el depósito de combustible
- Un émbolo móvil
- Un muelle de compresión

La carcasa tiene un taladro en el lado de conexión del raíl, que puede cerrarse mediante la presión del extremo cónico del émbolo en el asiento de estanqueizado de la carcasa. En servicio normal, el muelle presiona el émbolo sobre el asiento, de forma que se mantiene cerrado el raíl. Cuando se sobrepasa la presión máxima admitida en el sistema, el émbolo se levanta por la presión que ejerce el combustible, venciendo la fuerza del muelle antagonista. Entonces el combustible sale y disminuye la presión en el raíl acumulador o colector. El combustible retorna al depósito de combustible a través de una tubería colectora.



**Figura 64. Esquema de una válvula limitadora de presión.**

*Fuente: Robert Bosch GmbH*

#### **2.3.5.7. Válvula reguladora de presión**

**Función:** Tiene la misión de ajustar y mantener la presión en el raíl, en función del estado de carga del motor:

- En caso de una presión demasiado alta, la válvula reguladora de la presión abre de forma que una parte del combustible retorna al depósito.

- En el caso de una presión demasiado baja, la válvula cierra el estanqueizado así el lado de alta presión contra el lado de alta presión.

### **Estructura**

La válvula reguladora de presión tiene una brida de sujeción para su fijación a la bomba de alta presión o al acumulador. El inducido presiona una bola contra el asiento para eliminar la conexión entre el lado de alta presión y el de baja presión; para ello, el muelle de la válvula presiona el inducido hacia abajo, y por otra parte, un electroimán que ejerce una fuerza sobre el inducido. Para la lubricación y la eliminación del calor se refrigera con combustible el inducido completo.

### **Funcionamiento:**

La válvula reguladora de la presión tiene dos circuitos de regulación:

- Un circuito regulador eléctrico lento para el ajuste de un valor de presión medio variable en el acumulador, y
- Un circuito regulador mecánico-hidráulico rápido para compensar las oscilaciones de presión de alta frecuencia.

#### **2.3.5.8. Inyector piezoeléctrico integrado en la tubería**

Para la 3ª generación del sistema Common Rail se desarrolló un nuevo tipo de inyector, que trabaja con un actuador piezoeléctrico en lugar de una electroválvula. El actuador piezoeléctrico es mucho más rápido que las electroválvulas empleadas hasta entonces, pero necesita un diseño adaptado para poder aprovechar realmente las ventajas de este sistema.

### **Estructura y requisitos (Figura 71)**

La estructura de este inyector se puede dividir en los siguientes grupos:

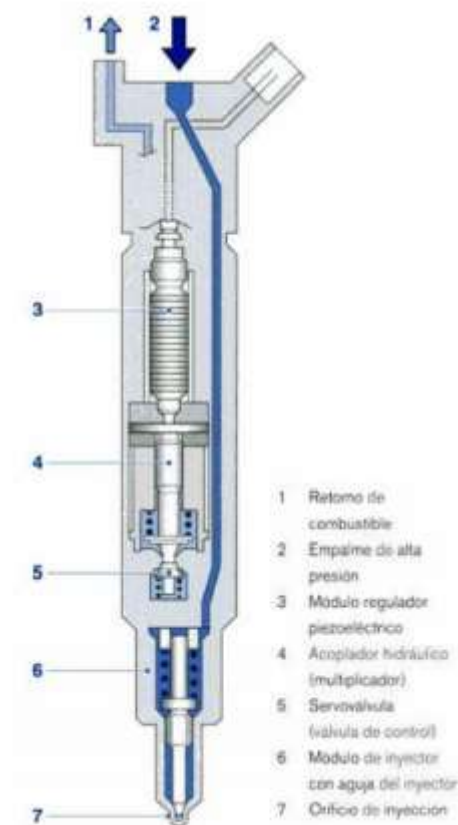
- Módulo actuador
- Acoplador hidráulico o multiplicador
- Válvula de control o servoválvula
- Módulo de inyector

En la concepción del inyector ha primado el concepto de conseguir una elevada resistencia total en la cadena formada por el actuador, el acoplador hidráulico y la válvula de control.

Otra característica constructiva especial es la eliminación de las fuerzas mecánicas en la aguja del inyector, tal y como podían generarse en los inyectores con válvula electromagnética a través de una varilla de presión. En conjunto, se han podido reducir de forma eficaz las masas móviles y el rozamiento, mejorándose además la estabilidad y la deriva del inyector en comparación con sistemas convencionales.

El sistema de inyección ofrece además la posibilidad de obtener muy cortas distancias entre los procesos de inyección y ajustar con más precisión la cantidad y el instante de la dosificación del combustible. Puede realizar hasta cinco procesos de inyección por ciclo.

Mediante el estrecho acoplamiento del servo válvula a la aguja del inyector se obtiene una reacción inmediata de la aguja al accionar el actuador. El tiempo de retardo entre el comienzo



**Figura 65. Estructura de un inyector piezoeléctrico**

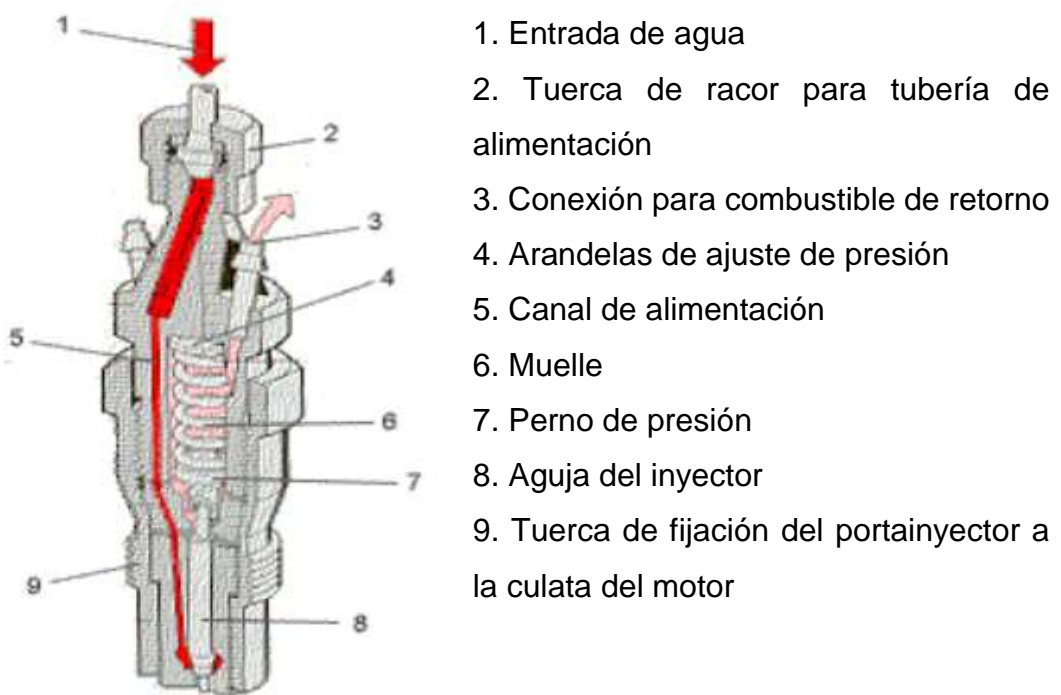
*Fuente: Robert Bosch GmbH*

### 2.3.5.9. Toberas de Inyectores

La tobera es el elemento del inyector a través del cual se inyecta el agua a alta presión en la cámara de combustión del motor. Es un elemento determinante en la formación de la mezcla y la combustión y, por tanto, su efecto es fundamental en las prestaciones del motor. Están diseñados para ser lo más efectivos posibles, en función del tipo de cámara de combustión en el que se vayan a usar y del sistema de inyección. El conjunto inyector/portainyector va montado en la culata del motor. El portainyector sirve para fijar el inyector en la culata. El portainyector está comunicado con la tubería de alimentación de alta presión y la de retorno (Figura 73). Se distinguen dos tipos principales de inyectores según el diseño de la tobera:

- Inyectores de tetón (motores de inyección indirecta)
- Inyectores de orificios (motores de inyección directa)

Dentro de estos dos tipos de inyectores existen diversas variantes, previstas para los diferentes tipos de motores.

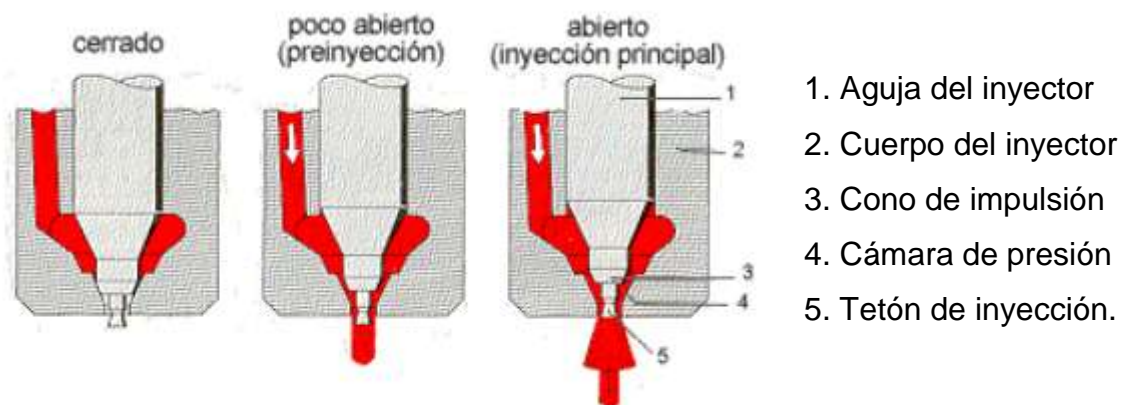


**Figura 66. Estructura de un inyector**

Fuente: Robert Bosch GmbH

#### **2.3.5.10. Toberas de inyector de tetón**

Estas toberas se usan sólo en motores de inyección indirecta (con precámara o cámara de turbulencia). En estos motores la preparación de la mezcla de combustible y aire se efectúa principalmente mediante el efecto de la turbulencia del aire en el interior del cilindro, asistida por un chorro de inyección con la forma apropiada. No son aptas para sistemas de inyección directa ya que los picos de presión en el interior de la cámara de combustión la abrirían. El diseño fundamental de las distintas toberas con este sistema es el mismo, la única diferencia entre ellas está en la geometría del tetón. Dentro del cuerpo del inyector se encuentra la aguja. Esta es presionada hacia abajo por el muelle de forma que el tetón, que se encuentra en su punta, es presionado sobre su asiento, sellando el conducto de salida y manteniendo así la tobera cerrada. En el momento en el que se produce el suministro, la presión en la cámara aumenta, actuando sobre la aguja e impulsándola hacia arriba. Cuando se alcanza la presión de apertura (110...170 bar), la aguja sube y el tetón se separa de su asiento abriendo el orificio de salida. Gracias a la forma del tetón, que se va estrechando hacia la punta, se consigue que el caudal de inyección sea variable, de forma que aumenta a medida que sube la aguja. Al abrir el inyector, se inyecta una cantidad muy pequeña de combustible que irá aumentando a medida que se levanta más la aguja (efecto estrangulador), llegando a la máxima inyección de combustible cuando la aguja se levanta a su máxima apertura. El inyector de tetón y el estrangulador asegura una combustión más suave y por consiguiente, una marcha menos dura del motor (menor ruido de combustión), ya que el aumento de la presión de combustión es progresivo. Variando las dimensiones y la geometría del tetón se consiguen modificar las características del chorro de inyección para ajustarlo a los requerimientos de cada motor.



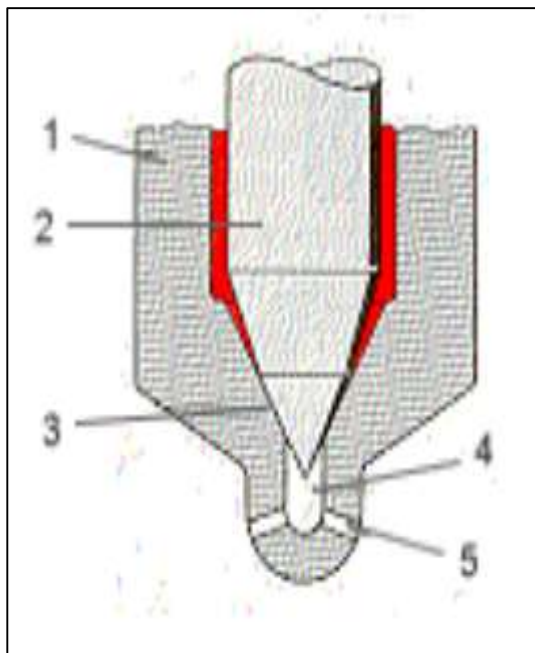
**Figura 67. Sección de una tobera de inyector de tetón.**

*Fuente: Robert Bosch GmbH*

#### **2.3.5.11. Toberas de inyector de orificios**

En los sistemas de inyección directa, la presión de apertura del inyector puede estar entre 150 y 350 bar y las presiones de inyección son mucho más altas que en los sistemas de inyección indirecta. Por esto es necesario un diseño diferente de los inyectores. La punta de la tobera tiene forma esférica. En su pared hay unos orificios que varían en número y diámetro dependiendo del diseño del inyector, de las características del sistema de inyección y de los requisitos del motor. Suelen tener múltiples orificios, aunque los hay también de un solo orificio. En función del diseño de la cámara de combustión, el orificio de inyección del inyector de orificio único puede estar dispuesto central o lateralmente. En el caso de inyectores de varios orificios de inyección, estos pueden estar dispuestos simétrica o asimétricamente. El extremo de la aguja y su asiento tienen forma de cono. El control de la elevación de la aguja, en los sistemas Common Rail y de inyector unitario, se realiza mediante una electroválvula o un elemento piezoeléctrico. Su funcionamiento se detalla en los respectivos apartados





1. Cuerpo del inyector
2. Aguja del inyector
3. Asiento del inyector
4. Taladro ciego
5. Agujero de inyección

**Figura 68. Sección de una tobera de inyector de orificios**

*Fuente:* Robert Bosch GmbH

## **CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO**

### **3.1. Tipo y diseño de investigación**

#### **3.1.1. Tipo de investigación**

- **Proyectivo:** Se seguirá un conjunto de pasos para diseñar el sistema de inyección Aire-Agua para el grupo electrógeno.
- **Descriptivo:** Se utiliza para observar, recoger, organizar, resumir, presentar, analizar, generalizar los resultados en algún punto del tiempo

#### **3.1.2. Diseño de Investigación**

El diseño de la investigación es experimental es decir se diseñará las técnicas de la realización del experimento que permitirán estudiar la influencia de uno o varios factores o variables.

Aquí podemos definir el diseño como un esquema o estructura lógica de acción que permite mantener constante el influjo de las variables experimentales pertinentes y controlar así la influencia de las variables independientes sobre la o las variables dependientes.

### **3.2. Población y Muestra**

**Intencionada:** “Central Térmica de Reserva Fría Eten”.

### **3.3. Hipótesis**

El diseño de un sistema de inyección mixta aire-agua contribuirá a mejorar la eficiencia del Grupo Auxiliar 8.4 MW de la “Central Térmica Reserva Fría Eten” de la empresa EMCI ubicada en Reque - Perú.

### **3.4. Variables – Operacionalización**

#### **3.4.1. Variable Independiente**

Diseño de un sistema de inyección mixto de aire-agua.

- El sistema de aire- combustible que se está diseñando para Grupo Electrónico 8.4 MW (Wartsila 20V34DF – A2), proporciona aire comprimido para la atomización del combustible líquido en el sistema de combustión. El aire de atomizado se introduce por los orificios complementarios que se encuentran en las boquillas de combustible. La descarga desde estas boquillas incide directamente en el rocío de aceite combustible líquido a medida que ingresa en las cámaras de combustión.
- El sistema de inyección de agua aprovechará el efecto refrigerante del agua en motores de inyección directa para permitir un mayor flujo de aire, y a una temperatura más baja, en admisión, para obtener una combustión más eficiente, e incluso contundente en aceleración.
- Para ello se procede a inyectar agua en la cámara de combustión, en situaciones en las que el motor está trabajando con cargas altas. Obviamente, la cámara de combustión no recibirá un chorro de agua, sino una fina neblina de agua pulverizada que se vaporiza y que permite reducir la temperatura dentro de la propia cámara de combustión.

### **3.4.2. Variable Dependiente**

Eficiencia del grupo electrógeno

- El rendimiento térmico o eficiencia de una máquina térmica es un coeficiente o ratio adimensional calculado como el cociente de la energía producida (en un ciclo de funcionamiento) y la energía suministrada a la máquina (para que logre completar el ciclo termodinámico). Se designa con la letra griega  $\eta$ ter:

$$\eta_{ter} = \frac{E_{producida}}{E_{suministrada}} = \frac{E_{salida}}{E_{entrada}}$$

Dependiendo del tipo de máquina térmica, la transferencia de estas energías se realizará en forma de calor, Q, o de trabajo, W.

### 3.4.3. Operacionalización de las Variables

VARIABLE	INDICADORES	SUB INDICADORES	TÉCNICA	INSTRUMENTO
Diseño de un sistema dual de aire atomizado e inyección de agua.	Fundamentos	Teóricos	Revisión bibliográfica Encuesta	Alto / Medio / Bajo nivel
		Procedimientos		
	Etapas	Entrada		
		Proceso		
		Resultado		
Eficiencia del grupo electrógeno	Consumos	Mano de obra	Revisión de documentos Entrevista	Alto / medio / bajo
		Combustible		
	Resultados	Energía producida		Igual / mejora de eficiencia
		Mejoras		

Tabla4: Operacionalización de las Variables

### **3.5. Métodos y Técnicas de investigación**

Utilizaremos el método experimental, lo que implica la práctica estándar de manipulación cuantitativa de las variables independientes para generar datos estadísticamente analizables.

Los resultados obtenidos son analizables y se utilizan para probar la hipótesis.

La técnica de investigación es una técnica que consiste en observar atentamente el fenómeno, hecho o caso, tomar información y registrarla para su posterior análisis. La observación es un elemento fundamental de todo proceso de investigación, en ella se apoya el investigador para obtener el mayor número de datos.

### **3.6. Descripción del(os) instrumento(s) utilizado(s)**

Aquí presentamos la descripción de los instrumentos utilizados en la experiencia práctica realizada que explicaremos más adelante en el ventilador centrífugo.

- Elementos utilizados
  - Observación Visual.
  - Tesis y libros referente al tema.
  - Manual de Operación y Mantenimiento
  - Parámetros de Operación del Grupo Electrógeno.

### **3.7. Análisis Estadístico e interpretación de los datos**

Se realizó la observación de la planta de Generación para identificar la realidad problemática, que nos permite plantear los requerimientos técnicos tales como:

- La observación directa
- Análisis documental que nos permitirá elaborar fichas de resumen, normas técnicas y obtener catálogos de fabricantes.
- Relación de encuestas obtenidas directamente de los operadores de la planta para obtener información real y actualizada de los equipos, con el propósito de mejorar la eficiencia de las mismas.
- Entrevistas al jefe y al personal de operación de la planta.

## CAPÍTULO IV: PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

### 4. Cálculos y Dimensionamiento

El presente estudio se ha realizado con el fin de instalar un sistema de inyección Agua-Combustible directa a la cámara de combustión para poder disminuir el consumo de combustible (Diesel B5) y expulsión de gases contaminantes del Grupo Auxiliar, Central Térmica Reserva Fría Eten del distrito la Reque – Chiclayo.

#### 4.1. Cálculo de Consumo de combustible en el Motor Diesel de Grupo Auxiliar de la Central Térmica de Reserva Fría Eten.

En el motor Diesel de gran cilindrada, es necesario medir la cantidad real de litros de fuel consumido, ya que no todo el fuel suministrado al motor se consume de lo cual partiremos de lo siguiente:

*Como sabemos la:*

Masa de Combustible  $m_v$  que requiere un cilindro del motor por cada carrera del trabajo, se calcula con la siguiente ecuación:

$$m_v = \frac{N_e \cdot g_e \cdot 33,3}{n \cdot z} \text{ (mg/carrera)}$$

Ecu

donde:

$N_e$  = potencia del motor [kW]

$g_e$  = consumo específico de combustible del motor [g/kWh]

$n$  = velocidad de giro del motor [rpm]

$z$  = número de cilindros del motor

#### Según datos del fabricante:

- El grupo Generador Wartsila de modelo 20V34DF-A2, consta de  $Z=20$  cilindros dispuestos en V, 10 por lado, y gira a 720 rpm.
- El generador puede entregar una potencia aproximada de  $N_e=8.2$  MW = 8200 KW a una tensión de 6.6 kV en bornes.

- El consumo aproximado de combustible Diesel B5 del grupo es de 12 barriles a plena carga por hora (es decir, teniendo en cuenta que 1 barril=42 gl y 1gl= 3,028 Kg.

$$1 \text{ barril} = 42 \times 3,028 \text{ Kg} = 127,176 \text{ Kg}$$

Las bombas se seleccionan o eligen generalmente por uno de tres métodos:

1. El cliente suministra detalles completos de uno o más fabricantes. de las condiciones de bombeo y solicita una recomendación y oferta de las unidades que parezcan más apropiadas para la aplicación.
2. El comprador efectúa un cálculo completo del sistema de bombeo procediendo luego a elegir la unidad más adecuada de catálogos y curvas características.
3. Se usa una combinación de estos dos métodos para llegar a la solución final

En el primer caso se debe suministrar datos para el fabricante como:

- 1) Número de unidades requeridas
- 2) Naturaleza del líquido que habrá de bombearse
- 3) Capacidad
- 4) Condiciones de servicio
- 5) Condiciones de descarga
- 6) Columna total
- 7) Tipo de servicio (continuo o intermitente)
- 8) Posición a instalar la bomba (horizontal o vertical)
- 9) Potencia disponible para mover la bomba
- 10) Limitaciones de espacio, peso o transporte
- 11) Localización de instalación

#### **4.2. Cálculos en la Selección de la bomba.**

Básicamente hay cinco pasos en la selección de cualquier bomba, sea grande o pequeña, centrífuga recíprocante o rotatoria. Estos pasos son:



- a) Un diagrama de disposición de la bomba y tuberías
- b) Determinar la capacidad
- C) Calcular la columna total
- d) Estudiar las condiciones del líquido
- e) Elegir la clase y el tipo

Según la descripción anterior y teniendo en cuenta la experiencia de los fabricantes para el sistema COMMON RAIL utilizado se selecciona bombas rotativas:

La bomba de alta presión suele ser una bomba de tres pistones radiales que trabajan a unas 3000 vueltas por minuto y se lubrica con el mismo combustible, el combustible se comprime en el interior de tres recintos por la acción de tres émbolos dispuestos radialmente a 120°. Ella alimenta de combustible al conducto común. Este tiene un sensor de presión y una válvula limitadora de la presión de modo de mantener la presión constante en cada uno de los inyectores.

#### Especificaciones técnicas del Grupo Auxiliar

<b>Potencia del Grupo</b>	<b>8225 KW</b>
---------------------------	----------------

#### Grupo Electrónico

<b>Motor</b>	
<b>Tipo de motor</b>	W20V34DF
<b>Numero de cilindros</b>	20
<b>Diámetro de cilindros</b>	340 mm
<b>Régimen</b>	740 rpm
<b>Potencia nominal</b>	8700 KW
<b>Tensión primaria</b>	480 V; 60 Hz
<b>Tensión secundaria</b>	24 V CC
<b>Sentido de Giro</b>	Horario

*Tabla 5: Especificaciones técnicas del Grupo Auxiliar*

#### a) Cálculos previos del Motor Diesel:

Potencia efectiva (Ne) = 8200 Kw

Como: 1Kw= 1,341 HP

$$Ne=8200 \times 1,341 = 10996,2 \text{ HP}$$

$$Rpm= 720$$

$$z= 20 \text{ cilindros}$$

$$t= 4 \text{ tiempos}$$

#### ✓ Dimensiones del motor

Potencia por Cilindro (Nec):

$$Nec = \frac{8200 \times 1,341}{20} \frac{HP}{CIL} = 549,81 \frac{HP}{CIL}$$

**Velocidad angular especifica (nm):**

$$n_m = n \sqrt{\frac{Ne}{z}}, \text{ donde :}$$

$$n= 720 \text{ rpm, por lo tanto}$$

$$n_m = 720 \sqrt{\frac{549,81}{20}} = 3735,059 \text{ rpm(HP/cilindro)}^{\frac{1}{2}}$$

#### ✓ Volumen de Cilindrada (V<sub>H</sub>)

Esta determinación se hace mediante la expresión de la Potencia

$$Ne = p_{me} \cdot \frac{\pi D^2}{4} S \cdot Z \cdot \frac{1}{t} \cdot 2n \cdot \frac{1}{60} \cdot \frac{1}{75}$$

De tablas y para motores industriales lentos sobre alimentados se tiene que:

$$8 < p_{me} < 11$$

Para nuestro caso se toma  $p_{me} = 10$

$$Ne = 10996,2 \text{ HP} = 10996,2 \times 1,014 \text{ CV}$$

$$Ne = 11150,15 \text{ CV}$$

Siendo:

$$[D]=\text{cm}$$

$$[S]= \text{m}$$

$$Z= \text{número de cilindros}$$

$$[n]= \text{rpm}$$

$$t = \text{tiempos}$$

Podemos escribir:

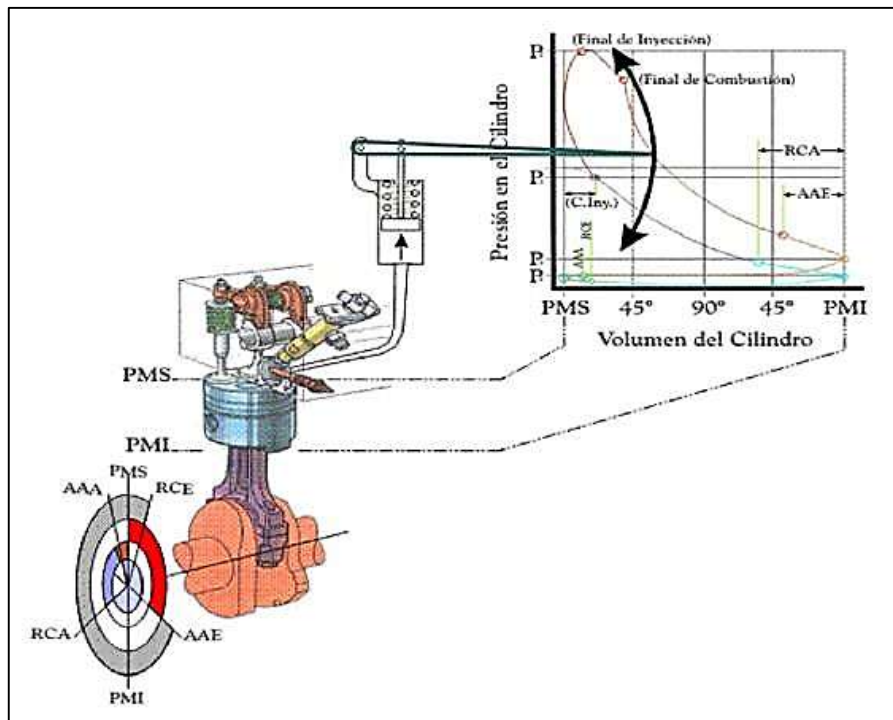
$$\frac{N_e \times 4 \times t \times 60 \times 75}{p_{me} \times \pi \times Z \times 2n} = D^2 \cdot S$$

$$D^2 \cdot S = \frac{11150,15 \times 4 \times 4 \times 60 \times 75}{10 \times \pi \times 20 \times 2 \times 720} = 887,73 \text{ cm}^3$$

$$D^2 \cdot S = 88,77 \text{ dm}^3$$

**El volumen de la cilindrada será:**

$$V_H = \frac{\pi \times D^2 \cdot S}{4} = \pi \cdot 88,77 / 4 = 69,71 \text{ dm}^3$$



**Figura-69: Diagrama de ciclo diesel**

**Fuente: El autor**

**b) Análisis de las condiciones en que se debe verificar el rendimiento máximo**

Potencia Operativa  $N_{op} = \alpha N_e$  ; donde

$\alpha = 0,8 \text{ o } 0,9$  (relación de operación del motor)

✓ **Velocidad Angular operativa:**

$$n_{op} = \beta \cdot n ;$$

Donde:

$$\beta = 0,9 \text{ o } 1 ;$$

Pero:

$$N_e = p_{me} \cdot n \cdot cte \dots \dots \dots (1)$$

$$N_{op} = p_{me.op} \cdot n_{op} \cdot cte \dots \dots \dots (2)$$

Relacionando (1) y (2) se tiene:

$$N_{op}/N_e = \frac{p_{me.op} \times n_{op}}{p_{me} \cdot n_e}$$

$$P_{me.op} = P_{me} \cdot \alpha / \beta$$

✓ **Consumo de combustible:**

Por definición de rendimiento teórico total:

$$\eta_{tt} = \frac{632 N_{op}}{G_c \times P_{ci}}$$

Donde:

$N_{op}$  : Potencia operativa en CV

$G_c$  : Consumo de combustible en  $\frac{Kg}{h}$

$P_{ci}$  : Poder calorifico inferior del combustible  $\frac{Kcal}{Kg}$

$$1000 < P_{ci} < 11000$$

$$0,38 < \eta_{tt} < 0,42$$

$$P_{ci} = 10500 \frac{Kcal}{Kg}$$

$$\eta_{tt} = 0,40$$

$$G_c = \frac{N_{op} \times 632}{\eta_{tt} \times P_{ci}} = \frac{\alpha N_e \times 632}{\eta_{tt} \times P_{ci}}$$

$$G_c = \frac{0,9 \times 11150,15 \times 632}{0,40 \times 10500} = \frac{6342205,5}{4200}$$

$$G_c = 1510 \text{ Kg/h}$$

$$G_c = \frac{1510000}{60} \text{ gr/min} = 25166,7 \text{ gr/min}$$

Por lo tanto, el consumo por cilindro será:

$$G_c /_{cil} = \frac{25166,7}{20} g /_{min} = 1258,3 \text{ gr} /_{min}$$

Como al motor es de 4 tiempos, es decir dos vueltas por ciclo:

$$N^{\circ} \text{ de ciclos por minuto} = \frac{720}{2} = 360 \text{ ciclos} /_{min}$$

Por lo tanto, la cantidad de combustible a inyectar por ciclo y en cada cilindrado es:

$$G_c /_{cilindro} = \frac{1268,3 \text{ gr} /_{min}}{360 \text{ ciclos} /_{min}} = 3,49 \text{ g} /_{(ciclo - cil)}$$

$$\text{Teniendo } \gamma_c = 0,8 \text{ gr} /_{cm^3}$$

$$V_c = \frac{G_c}{\gamma_c} = \frac{3,49 \text{ gr} /_{(ciclo-cil)}}{0,8 \text{ gr} /_{cm^3}} = 4,4 \text{ cm}^3 /_{(ciclo - cil)}$$

- ✓ Se seleccionará una bomba mayor en capacidad debido a las grandes presiones, pues los líquidos son compresibles y la tubería o cañería sufre algunas dilataciones.

#### ✓ **Dimensionamiento de la Bomba de agua**

Datos de la bomba motor Wartsila:

Sunflo P-1500: Bomba centrífuga de alta velocidad y presión

Distribuidor de “Sondine Corporation” o directamente de la fábrica

Instalación de la tubería de succión y descarga – Pautas

- a) Las buenas prácticas de instalación OBoman que debe haber una lo haber una longitud recta mínima en la tubería de succión y de la bomba equivalente a (10) diez veces al diámetro de la tubería de succión. Además, las buenas prácticas de instalación dictan el uso de tubería de succión al menos uno o dos tamaños mas grandes que la brida de la bomba y la reducción del diámetro de la tubería en la brida de la bomba. Utilizan un

reductor excéntrico en lado “Sultado” hacia abajo. No utilizar nunca la tubería de succión de un diámetro menor que la de la entrada de succión de la bomba.

- b) Las tuberías de succión y descarga no deben de tener codos, pliegues, dobleces y accesorios innecesarios ya que aumentan las pérdidas por fricción en la tubería. Se debe seleccionar cuidadosamente el tamaño de la tubería y los accesorios para mantener al mínimo las pérdidas de fricción.
- c) En ningún caso se debe forzar la tubería de succión para alinearla en la entrada de succión de la bomba
- d) Todas las tuberías deben tener sujeción independiente de la bomba. El soporte adecuado para la tubería de succión y descarga es esencial para evitar que el tubo se deforme en la carcasa
- e) Colocar siempre manómetro de succión en todas las instalaciones, para supervisar las condiciones de succión.
- f) Colocar siempre un manómetro en la descarga en todas las instalaciones, para supervisar las condiciones de descarga.

✓ **Condiciones de Flujo mínimo:**

- g) Las bombas centrifugas pueden sufrir vibraciones derivadas de la separación del flujo interno y la recirculación en condiciones de poco flujo.
- h) El flujo mínimo de una bomba Sumfle puede ser determinado de dos maneras.

El flujo mínimo puede estar limitado a la mayor de las condiciones de flujo calculadas:

- El flujo mínimo se debe limitar al 20 % del flujo de BEP (punto de mejor eficiencia). Para determinar la condición de BEP. Se debe consultar la curva de rendimiento de la bomba.

- El flujo mínimo correspondiente al aumento permitido de temperatura de fluidos en la bomba. Se calcula de la siguiente manera:

$$dT = \frac{Hx(\frac{1}{E_{ff}}-1)}{788x(C_p)}$$

Donde:

H : Altura en condiciones de funcionamiento (pies)

C<sub>p</sub>: Altura específica de fluidos bombeados

E<sub>ff</sub>: Eficiencia en el punto operativo (en decimales)

$$E_{ff} = \frac{(H)x(\dot{V})}{(3960)x(bhp)}$$

Donde:

$\dot{V}$  = Flujo en el punto operativo (gpm)

Sg = Gravedad específica del fluido bombeado.

bhp = potencia al freno en el punto operativo

#### ✓ Condiciones de Flujo máximo:

- El flujo máximo de la bomba debe estar limitado al 120 % del BEP.

Para un tamaño nominal de 3 mm

$$1 \text{ l/s} = 3,6 \text{ m}^3/\text{h} = 15,8 \text{ gpm}$$

$$1 \text{ m}^3/\text{h} = 0,28 \text{ l/s} = 4,38 \text{ gpm}$$

$$1 \text{ gpm} = 0,063 \text{ l/s} = 0,23 \text{ gpm}$$

### 4.3. Diseño del circuito hidráulico

#### 4.3.1. Selección de la Tubería de alta y baja presión

En este acápite se va a considerar que para llevar a cabo el diseño de las tuberías de las distintas líneas del proceso se dividen estas en tramos, cada una de las cuales estará formada por la porción de línea comprendida entre dos equipos consecutivos. De esta forma los diferentes aspectos a calcular (diámetro óptimo de la conducción, pérdidas de carga, etc.) se evaluarán independientemente para cada uno de los tramos. La definición y descripción de los diferentes tramos de tubería se realizará sobre el correspondiente diagrama de flujo, usándose para designar cada uno de ellos los nombres de los equipos que constituye su principio y su final.

Un aspecto muy importante que se debe tener en cuenta para el diseño del sistema de tuberías es el de la velocidad del fluido en el interior de las conducciones. Dicha velocidad, en el caso de circulación isoterma de fluidos incompresibles, viene determinada por el caudal y el diámetro de la sección interna de la conducción, y para cada fluido tiene un valor máximo que no debe ser sobrepasado. Los valores aproximados que se usan en la práctica dependen del tipo de fluido que se trate, pero los más corrientes se dan en la tabla siguiente:

Fluido	Tipo de flujo	Velocidad pie/s	Velocidad m/S
<b>Líquidos pocos viscosos</b>	<b>Flujo por gravedad</b>	<b>0,5-1</b>	<b>0,15-0,30</b>
	<b>Entrada de bomba</b>	<b>1-3</b>	<b>0,3-0,9</b>
	<b>Salida de bomba</b>	<b>4-10</b>	<b>1,2-3</b>
	<b>Línea de conducción</b>	<b>4-8</b>	<b>1,2-1,4</b>
<b>Líquidos viscosos</b>	<b>Entrada de bomba</b>	<b>0,2-0,5</b>	<b>0,06-0,15</b>
	<b>Salida de bomba</b>	<b>0,5-2</b>	<b>0,15-0,6</b>

*Tabla N°6 Velocidades recomendadas para fluidos en tuberías*

**Fuente: El autor**



Así para un caudal determinado del fluido a bombear, utilizando la velocidad máxima del mismo, se determina de forma inmediata el diámetro mínimo de la conducción. Deberá escogerse, en cualquier caso, el diámetro normalizado inmediatamente superior a dicho valor mínimo. Este valor es el que se conoce como diámetro óptimo de la conducción.

#### 4.3.2. Cálculo de la pérdida de carga en tubería

El rozamiento del fluido con las paredes de la tubería por donde circula provoca en el mismo una caída de presión. Conocer el valor de esta caída de presión es necesario para el cálculo de las bombas, pero también para comprobar que el diámetro elegido para la conducción es suficiente, pues de ser muy pequeño la pérdida de carga que se produzca será muy elevada. En este sentido se consideran valores razonables de caída de presión en una conducción los siguientes (para caudales e 0 a 60 m³/h).

*Zona de aspiración de bombas: 0,40 Kg/cm² (0,39 bar)*

*Zona de impulsión de bombas: 0,6 a 0,8 Kg/cm² (0,59 a 0,78 bar)*

Antes que la caída de presión en una tubería u oleoducto pueda ser conocida es necesario hallar el correspondiente factor de fricción. El procedimiento usual es obtenerlo de un gráfico que da la relación existente entre el factor de fricción y el número de Reynolds que es una cantidad adimensional.

El número de Reynolds es una cantidad adimensional que se expresa mediante la ecuación:

$$R_e = \frac{\rho D c}{\mu}$$

Donde:

$\rho$  : Es la densidad del fluido

$D$  : Es el diámetro de la tubería

$c$  : Es la velocidad del fluido

$\mu$  : Es la viscosidad absoluta del fluido

:

El factor de fricción, se extrae de gráficos en función del número de Reynolds y del régimen de velocidad del fluido, es decir se debe determinar si el régimen es laminar o turbulento, determinando el factor de fricción del gráfico se determina la caída de presión en la tubería que se expresa por la siguiente fórmula:

$$J = \Delta P = \frac{f L c^2}{D^2 g} \quad \text{donde:}$$

$f$  : Es el coeficiente de fricción, que se determina del gráfico de Moody.

$L$  : Es la longitud equivalente de la tubería.

$c$  : Es la velocidad de circulación del fluido

$g$  : Es la aceleración de la gravedad

En general dos tipos de problemas pueden presentarse en el proyecto de una instalación típica de fábrica como ser la instalación de quemadores de fuel oil, y abastecimiento de fuel oil a tanques de motores Diesel, etc. El primer tipo de problema puede enunciarse de la siguiente manera: Para una combinación dada de medida del conducto, cantidad y viscosidad del combustible, se desea conocer que caída de presión existirá en una longitud dada de tubería, que incluye codos, curvas etc. Como es obvio la aplicación directa de la ecuación de Darcy nos dará la respuesta.

El segundo tipo de problema requiere del cálculo de la medida del conducto para cubrir el abastecimiento de combustible a una velocidad dada, distancia y cantidad. Desde luego que no puede ser hallado hasta que conozcamos  $D$  y ; obtener la caída de presión para comprobar cuan cerca de la caída deseada estamos; después de este ensayo, si es necesario adoptamos otro diámetro, de acuerdo a la diferencia de caída obtenida, hasta llegar a conseguir una caída admisible. Se entiende que el valor de la viscosidad usada en el cálculo del número de Reynolds, debe ser el valor que corresponde a la temperatura de bombeo.

Teniendo en cuenta lo anterior, vamos a realizar el cálculo del diámetro de las tuberías considerando que:

### 1- Datos previos

La presión de salida estará entre 1500-2000 bar, para el cálculo se tomará 1750 bar.

La instalación será capaz de suministrar 25,16 l/s, siendo este el necesario para abastecer durante al menos 16 horas las 20 tuberías que van a los cilindros.

Caudal nominal

$$20 * 25,16 = 50,32 \text{ l/s.}$$

### 2- Cálculo del diámetro de la tubería y del caudal:

Una vez conocidos los caudales, las secciones en cada tramo de tubería podrán calcularse fácilmente mediante la siguiente expresión:

$$\dot{V} = c * A$$

Dónde

$\dot{V}$  = Es el caudal en m³/s

c = Es la velocidad del fluido en m/s

A = Es el área de la sección en m²

#### Considerando que:

- La presión de salida de diseño tiene un valor de 117741,6 KPa
- La instalación es capaz de suministrar 1510 l/h, siendo este el necesario para abastecer durante al menos 16 horas continuas a las 20 tuberías que van a los cilindros.

El caudal nominal será:

$$\dot{V} = 1510 \text{ L/h} = 0,0004194 \text{ m}^3/\text{s}$$

#### ✓ Cálculo del diámetro de la tubería:

Una vez conocido el caudal, se calcula el diámetro de la tubería con la conocida expresión:

$$\dot{V} = c * A$$

Donde:

$\dot{V}$  : Es el caudal = 0,0004194 m³/s

C : Es la velocidad del fluido, se adopta 10 m/s

A = Es el área de la sección de la tubería m²

Reemplazando se tiene:

$$0,0004194 \text{ m}^3/\text{s} = 10 \text{ m/s} * A$$

$$A = 0,0004194 \text{ m}^3/\text{s} / 10 \text{ m/s} = 0,00004194 \text{ m}^2$$

$$\text{Como } A = \pi * d^2 / 4$$

Se tiene:

$$d^2 = 0,00004194 * 4 / 3,1415 = 0,00005340 \text{ m}^2$$

Resolviendo se obtiene:

$$d = 0,007307 \text{ m} = 7,3 \text{ mm}$$

Por lo tanto, adoptamos como diámetro exterior de la tubería:

$$d = 8 \text{ mm}$$

Para el cálculo del espesor según las Normas ANSI: Se aplica la fórmula:

$$t = \frac{0,5 * P D_0}{(S E + P_y)}$$

Donde:

t : Es el espesor mínimo de la pared en mm.

P : Es la presión de diseño en KPa = 117741,6 KPa

$D_o$  = Diámetro exterior en mm , se determinó anteriormente = 8 mm

SE : Tensión admisible del material debido a la presión interna en KPa

**Para un acero A-06** = 1200 psi = 82200 kpa.

$P_y$  : Coeficiente que depende del material y temperatura de diseño, para austenítico = 0,4.

Por lo tanto, reemplazando se tiene:

$$t = 0,5 \cdot 117741,6 \cdot 8 / (82800 + 117741,6 \cdot 0,4)$$

$$t = 0,5 \cdot 941932,8 / 129896,64 = 3,6 \text{ mm}$$

Adoptamos un **espesor de 3 mm** y como **diámetro exterior 8 mm**, por lo que el **diámetro interior será de 2 mm**.

#### 4.4. Dimensionamiento del Circuito de combustible: Sistema de Alimentación.

El combustible para este motor se debe almacenar en una cisterna y los tanques se indican en el diagrama en cantidad suficiente para asegurar el funcionamiento continuo de la central fría las capacidades respectivas son:

##### ✓ Dimensionamiento cisterna de almacenamiento.

Se calcula sobre la capacidad de combustible que asegure el funcionamiento por la 100 hr de marcha a plena carga

Habíamos calculado la densidad del combustible, con la formula:

$$\text{Gravedad API} = \frac{141,6}{\text{Gravedad específica a } 15,5^\circ\text{C}} - 131,6$$

Despejando la gravedad específica del combustible:

$$\rho_c = \frac{141,5}{191,5 + \text{Gravedad } ^\circ \text{API}}$$

El combustible usado es el DB5 (Biodiesel 5%) que tiene gravedad API de 31,1.

$$\rho_c = \frac{141,5}{191,5 + 31,1}$$

La densidad del agua a 15,5 es  $999 \text{ Kg}/\text{m}^3$

La densidad del petróleo DB5 será :

$$\rho = 0,870 \times 999 \text{ Kg}/\text{m}^3 = 869,13 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

El consumo del motor Wartsila será:

$$G_c = 1045 \text{ Kg}/\text{h}$$

La tasa de combustible consumido a plena carga será:

$$G_c = \frac{1045 \text{ Kg}/\text{h}}{869,13 \text{ Kg}/\text{m}^3} = 1,2023 \text{ m}^3/\text{h}$$

✓ **Dimensionamiento de Cisterna de almacenamiento:**

La diseñamos para que su capacidad se tal que asegure el funcionamiento de la central durante 62 horas a plena marcha o a plena carga por lo tanto su capacidad requerido será de:

$$V_c = 1,2 \times 60 = 74,4 \text{ m}^3$$

Como en cada  $\text{m}^3$  entran 6,3 barriles de petróleo DB5, entonces:

$$G_c = 468,12 \times 42 \text{ gls}$$

$$G_c = 10,686,24 \text{ gls}$$

Y como:

$$G_c = 2631,85 \text{ pies}^3$$

Elegimos sus dimensiones teniendo en cuenta que las tapas en los extremos serán de forma elíptica para disminuir la concentración de esfuerzos debido a las presiones originadas por el petróleo contra las paredes de la cisterna. Se tabulará los resultados para diferentes valores del diámetro.

Siendo:

$$G_c = \frac{1,272 V}{D^2}$$

$D^2(\text{pies})$	$h(\text{pies})$	$(V/h) \text{pies}^3 / \text{pie de cilindro}$
<b>1</b>	3330,7	0,78615
<b>2</b>	835,169	4,00
<b>3</b>	371,186	9,00
<b>4</b>	208,8	15,09
<b>5</b>	126,06	25,00
<b>6</b>	87,6	6,4
<b>7</b>	68,17	49,8
<b>8</b>	52,19	24,2
<b>9</b>	41,24	15,5

Tabla07: Parámetros para dimensionamiento de Cisterna de almacenamiento

Recurrimos a la tabla proporcionada por la API-ASME, para tanques de almacenamiento de combustible entrando

$(V/h) \cdot \text{pies}^3 / \text{hpie de cilindro}$ ; observando que los valores obtenidos que se aproximan en bastante exactitud corresponden al valor de:

$$D = g` \quad y \quad h = 41,24$$

Por lo tanto, el volumen neto del cilindro tanque es:

$$19686,24 \text{ gls} = 2631,85 \text{ pies}^3$$

Parte:

$$D = g` \\ h = 41,24$$

El material de la cisterna será **FIERRO NEGRO** de  $\frac{3}{16}$ " de espesor.

### ✓ Diseño y dimensionamiento del Tanque de agua

De acuerdo a la tecnología de la inyección de agua a los motores Diesel generalmente la cantidad de agua que hay que alimentar es el 30% de la cantidad de combustible, por lo que si:

$$G_c = 2631,85 \text{ Kg/h}$$

El consumo máximo de combustible del motor, entonces el consumo de agua será:

$$G_c = \frac{30 \times 1526,112}{100} = 475,8 \text{ Kg/h}$$

Esto equivale a aproximadamente a 123,5 g.p.h y para las 16 horas de funcionamiento continuo, la capacidad será de aproximadamente 1976 galones de agua. Este tanque debe tener las siguientes conexiones y elementos específicos:

Debe disponer de un rebose y de un venteo. El tanque debe contener sensores para medir el nivel de agua, el control de las bombas, el control de la planta de tratamiento y un indicador local tipo regla.

Se enumeran las conexiones y elementos específicos del tanque.



- Entrada de agua (caudal)
- Dos sensores de presión diferencial
- Venteo atmosférico, con filtro de CO<sub>2</sub>.
- Bocas de hombre.
- Drenaje.
- Rebose.
- Succión de agua hacia las bombas.
- Recirculación de bombas.
- Virolas y paneles.

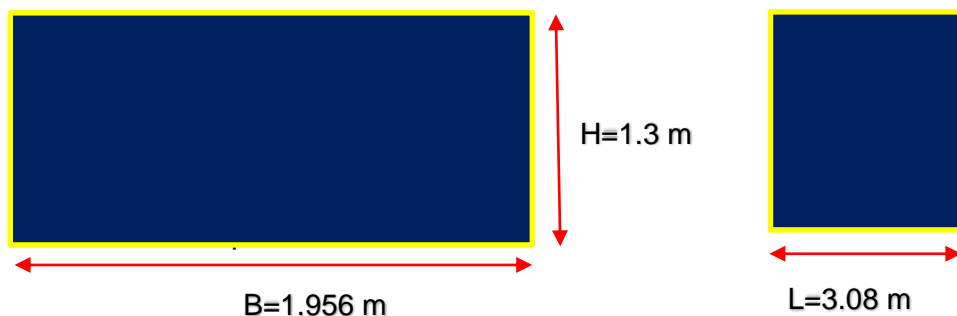
Para el dimensionamiento total tendremos en cuenta que el caudal por las 16 horas de funcionamiento continuo era: 457,8 Kg/h aproximadamente 460 Kg/h que equivalen a 0,46 m<sup>3</sup>/h que significan 7,36 m<sup>3</sup> en las 16 horas de operación, si aplicamos un factor de seguridad de 4 % se determina la capacidad total del tanque

Capacidad de diseño del tanque = 1,04

Capacidad del tanque =  $7,36 * 1,04 = 7,7 \text{ m}^3$

✓ **Dimensionamiento del tanque:**

- Capacidad : 1976 galones = 7,479 m<sup>3</sup>:
- Uso : Almacenamiento agua tratada.
- Forma : Ver figura



$$B = B' \frac{1}{3} = 7,479 \frac{1}{3} = 1,956 \text{ m}$$

Lado del tanque:

$$L = 1,58 \text{ B} = 1,58 * 1,956 = 3,08 \text{ m}$$

Altura del tanque:

$$H = 0,66 * B = 0,66 * 1,956 = 1,3 \text{ m}$$

Material del tanque:

SA-285 grado C

### ✓ **Conceptos encontrados en los manuales**

Cuando se inyecta agua en el colector de admisión del aire mediante de un inyector de diámetro elevado ( + - 0,50 mm), a una presión de 175 atm. , aproximadamente, la inyección de agua se realiza en el PMS del cilindro. Este mecanismo de inyección posee un límite de la mezcla de agua/ combustible, en el cual no se produce encendido, por la excesiva humedad de la mezcla.

Hay que tener en cuenta la cantidad de agua que se introduce y para ello hay que tener en cuenta el índice Dr.

$$Dr = 1 - \text{masa de oxígeno mezcla} / \text{masa oxígeno de referencia}$$

Cuando la inyección de agua es directa al cilindro. Aquí la bomba y los inyectores son independientes. En este caso el inyector usa diámetros (+- 0,32 mm) y convenientemente de tres orificios a una presión de 165 atm. Para llevarla a cabo se usa una bomba auxiliar, accionada por el cigüeñal del motor y unida al inyector por medio de tuberías de cobre o de acero. Presenta la ventaja de poder variar la relación agua / combustible además de seleccionar el tiempo exacto en el que se realiza la inyección.

Este **sistema proporciona la inyección de agua a cada boquilla durante la operación** de combustible líquido. Dentro de la envolvente de

funcionamiento de la turbina de gas delimitada por los límites de cámaras de combustión, el sistema de inyección de agua abastece de agua a la turbina de gas, principalmente para la reducción de NOx cuando se opera con gas natural o combustibles líquidos a partir de la carga en un 30% (sobre la base de la turbina de gas de referencia de la temperatura de disparo, TTRF) para la carga base. Un bastidor de inyección de agua montado de fábrica, situado cerca de la turbina de gas, toma el agua de la instalación de almacenamiento del cliente y lo entrega a la presión correcta y la velocidad de flujo a la turbina de gas. El agua se inyecta en la zona de combustión para reducir la temperatura de la flama y reducir la formación de NOx. Para evitar la corrosión en caliente de los álabes de la turbina de gas o turbina submarina, se requiere agua desmineralizada. El sistema de inyección de agua recibe agua desmineralizada de la instalación de tratamiento del cliente y suministra agua filtrada a la presión y el caudal necesarios para cumplir el nivel de emisiones estipulado para tales condiciones de funcionamiento. El sistema de inyección de agua consiste de dos módulos de bomba fuera de base, un módulo de control fuera de base y tuberías y componentes fuera de base. Solo un módulo de bomba se requiere para esta operación. El segundo módulo de bomba se otorga solo a modo de seguridad. Cada módulo de bomba se equipa con una bomba de velocidad fijada con intercambiador de calor interno, filtro de entrada, tubería de recirculación con una válvula de cierre de recirculación y un orificio de flujo. El agua recirculada se devuelve al tanque de almacenamiento del cliente a través de las tuberías del cliente conectadas ascendentemente al orificio de descarga. El orificio de recirculación está diseñado para proporcionar una presión máx. de recirculación de 30 psig en el orificio de descarga.

**✓ Requisito de flujo mínimo de la bomba (aproximadamente 140 GPM) y el flujo se haya estabilizado.**

La tubería en la base incluye un colector de anillo dentro del cerramiento de la turbina. El colector distribuye el flujo equitativamente entre las catorce líneas con válvulas dosificadoras de flujo (VWP1-1 a 14). Estas válvulas tienen una presión de apertura de 15 psid (103 kpa) y suministran

una restricción de flujo graduado tal que la resistencia del flujo sea relativamente alta en flujos bajos. El propósito de estas válvulas de dosificación de flujo es suministrar una distribución de flujo uniforme al comienzo y en flujos bajos.

#### **4.5. Diseño de la inyección**

Los parámetros de la inyección más influyentes en la calidad de la mezcla formada son principalmente

- Inicio de la Inyección
- Curva de la inyección y desviación de la inyección
- Presión de la inyección
- Numero de inyecciones

En los años 1980 el combustible inyectado y el inicio de la inyección eran controladas únicamente de forma mecánica. Sin embargo el compromiso con las limitaciones de las emisiones requiere una alta precisión de los parámetros de la inyección (preinyección, inyección ppal, cantidad de combustible inyectada, presión de la inyección y comienzo de la inyección) adaptamos al estado de operación del motor. Esto solo es posible utilizando una unidad de control electrónico ECU (Electronic Control Unit) que calcula los parámetros de inyección en función de otros parámetros externos como: Temperatura, presión, velocidad de motor, carga, altitud, etc. El control electrónico se ha extendido a transcurrir el tiempo en forma general en los motores Diesel.

##### **Parámetros de inyección**

Inicio de la inyección y suministro:

##### **✓ Inicio de la inyección**

El punto en que se inyecta el combustible dentro de la cámara de la combustión tiene un efecto decisivo sobre el instante en que se inicia la combustión de la mezcla, y por lo tanto sobre el nivel de emisiones, de consumo del combustible y al ruido de la combustión. Por este motivo, el inicio de la inyección juega el papel mas importante en la optimización del rendimiento del motor.

✓ **Comienzo de Suministro.**

Además del inicio de la inyección, el inicio del suministro es otro aspecto que a menudo hay que considerar. Esto se refiere al punto en el que la bomba de inyección comienza a suministrar el combustible al inyector la masa de combustible,  $m_c$ , que requiere un cilindro del motor por cada carrera del trabajo (una cada dos revoluciones en el caso de motores de 4 tiempos) se calcula usando la siguiente relación.

$$m_c = \frac{N \cdot G_c \cdot 33.33}{n \cdot Z} \left( \frac{g}{carrera} \right) \text{ donde}$$

N: potencia del motor en kW

$G_c$ : Consumo específico de combustible del motor  $\left( \frac{g}{Kw \cdot h} \right)$

N: Velocidad de rotación del motor (rpm).

Z: número de cilindros del motor.

El volumen correspondiente (cantidad de combustible inyectado),  $V_H$  medido en  $m^3/carrera$  o  $mm^3/carrera$ .

Se calcula en la ecuación:

$$\dot{V}_H = \frac{N \cdot G_c \cdot 33.33}{BD \cdot n \cdot Z \cdot \rho} \left( \frac{mm^3}{carrera} \right)$$

La potencia del motor, asumiendo que el rendimiento es constante ( $\eta \sim \frac{1}{G_c}$ ) es directamente proporcional a la cantidad de combustible inyectado.

La masa de combustible inyectado depende de los siguientes parámetros:

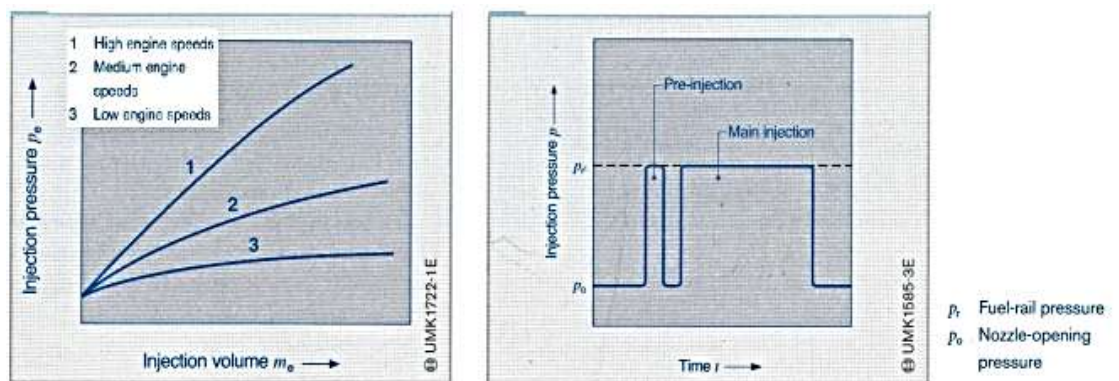
- Dosificación de combustible a través de la sección de la tobera del inyector.
- Duración de la inyección
- La variación temporal de la diferencia entre la presión de inyección y la presión en la cámara de combustión
- La densidad del combustible.

### ✓ Duración de la inyección

Uno de los principales parámetros de la curva de inyección es la duración de la inyección. Durante este periodo, la tobera del inyector está abierta y el combustible fluye dentro de la cámara de combustión. Este parámetro se especifica en grados del cigüeñal o del árbol de levas, o en milésimas de segundos.

### ✓ Curva de inyección.

La curva de inyección representa gráficamente el flujo medio de combustible frente al tiempo en el que es inyectado en la cámara de combustión.



**Figura70: Curvas de inyección de un sistema convencional (Izquierda) y de un sistema de un sistema Common Rail (derecha)**

*Fuente: Robert Bosch GmbH*

## Sistema de Inyección de combustible

El sistema de inyección es el que corresponde suministrar combustible al motor. Se compone de una etapa de baja presión y otra de alta, en la que se encuentra la bomba inyectora; esta genera la presión de inyección requerida y suministra el combustible al circuito de alta presión, encargado de transportar el combustible desde el deposito y filtrarlo para garantizar que entre al circuito de alta presión libre de impurezas y humedad.

Debido a las diferentes carreras de combustión utilizaremos en los motores Diesel, la forma, fuerza de penetración y pulverización del chorro

de combustible proporcionada por el inyector están adaptadas a las condiciones específicas del motor. De esta manera, se distinguen dos tiempos esenciales d inyectores.

- De orificios
- De tetón o espiga

El de orificios está diseñado para motores de inyección directa, mientras el que el de **tetón** tiene varias versiones, cada una de las cuales está diseñada para una función correcta, y no funcionara de manera satisfactoria si se cumple en otra aplicación distinta.

Los inyectores de tetón o espiga se utilizan sobre todo en motores de inyección indirecta, es decir en motores con precámaras de inyección. En este tipo de tobera, la guja esta provista en si extremo de un tetón con una forma predeterminada (cilíndrica o cónica), que posibilita la formación de un pre-chorro de manera que al comienzo de la abertura se deja un pequeño espacio en forma de anillo que deja salir muy poco combustible, haciendo una especie de efecto estrangulador. A medida que se agranda la abertura, por aumento de la presión de inyección, la sección de paso aumenta, hasta que hacia el final de la carrera la aguja se inyecta la dosis principal de combustible

## **CAPÍTULO V: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS**

### **5.1. Planteamiento del Escenario.**

En el proyecto de investigación se pretende conseguir un mayor rendimiento del grupo electrógeno, enfocándose principalmente en el motor Diesel de accionamiento, se conseguirá el menor consumo de combustible y también la disminución de los gases contaminantes (CO<sub>2</sub>-NO<sub>x</sub>).

El análisis del presente proyecto se llevó a cabo en los ámbitos de la planta de la central fría de Reque, donde se encuentra el Grupo electrógeno Wartzila de 8200 KW de potencia, en este grupo está implementado el sistema Common Rail que alimenta a los 20 cilindros del

motor Diesel y en el que se pretende implementar la alimentación de agua en cada uno de los cilindros con el propósito fundamental de aumentar su rendimiento, disminuir el consumo de combustible, disminuir los gases contaminantes y también disminuir el desgaste de sus elementos.

Las emisiones contaminantes que se presentan son aquellas que más dificultades presentan en los motores Diesel, es decir los óxidos de Nitrógeno (NOx) y las emisiones de partículas.

Las emisiones de NOx dependen de la temperatura alcanzada en el ciclo. Cuando la temperatura llega a 1200 – 1400 °K, se empiezan a formar los óxidos de Nitrógeno, y estos aceleran su formación a medida que aumenta su temperatura.

Al introducir un sistema de inyección de agua las temperaturas a lo largo del ciclo disminuyen de forma drástica, aumentando la cantidad de agua los NOx disminuyen de forma lineal.

Numerosos autores coinciden que el propósito fundamental de inyectar agua a un motor de combustión interna tipo MEC es disminuir sus emisiones de NOx, mediante la disminución de la temperatura en el interior de su cámara de combustión.

Con la inyección de agua al motor Diesel Bosh logró ahorrar un 13 % de combustible.

La base de esta innovadora tecnología del motor está fundamentada en un hecho simple, un motor nunca debe sobrecalentarse. Para evitar que esto ocurra se inyecta combustible adicional. Este combustible se evapora refrigerando parte del bloque del motor. Con la inyección de agua los Ingenieros de Bosh han llevado al límite este principio físico, justo antes de que el combustible se inflame una fina película de agua se inyecta. El elevado calor absorbido durante el proceso de evaporación del agua produce una refrigeración eficaz.

El sistema de inyección mixta agua-aire queda definido de la siguiente manera:





**Figura71: Sistema de inyección mixta.**

## 5.2. Modelo Planteado

El cálculo del consumo de combustible-Agua es uno de los elementos donde se hacen necesaria una reflexión profunda para su implementación al Grupo Auxiliar. Por lo tanto, en este punto se elaboró un modelo que permita luego al realizar el diseño, poner de relieve las condicionantes de uso del sistema para su correcto funcionamiento.

## 5.3. Necesidades de Agua desmineralizada:

En la Central Térmica de Reserva Fría cuenta con una Planta de Tratamiento de Agua Desmineralizada, sus características son las siguientes:

PARÁMETROS	VALORES
PH	7,5 - 10
CONDUCTIVIDAD	0,5 -10 $\mu\text{s/m}$
DUREZA	0

*Tabla 8: Datos del Agua desmineralizada*

Fuente: El autor

La cual abastecerá al Grupo Electrónico cuando este entre en servicio

#### **5.4. Propuesta Técnica**

La propuesta técnica tiene su planteamiento en la implementación de un sistema de inyección mixta agua-aire con suministro de agua desmineralizada.

##### **5.4.1. Componentes del Sistema**

Una vez hecho los calculados en el capítulo anterior ya podemos elegir todos los aparatos que configurarán nuestro sistema de bombeo fotovoltaico. Los principales elementos que la conforman son:

- ✓ Tanque de almacenamiento
- ✓ Tuberías.
- ✓ Bomba de transporte
- ✓ Bomba de inyección
- ✓ Filtros
- ✓ Inyector

##### **5.4.2. Selección de los equipos**

###### **✓ Tanque de almacenamiento**

Debe disponer de un rebose y de un venteo. El tanque debe contener sensores para medir el nivel de agua, el control de las bombas, el control de la planta de tratamiento y un indicador local tipo regla.

Se enumeran las conexiones y elementos específicos del tanque.

- Entrada de agua (caudal)
- Dos sensores de presión diferencial
- Venteo atmosférico, con filtro de CO<sub>2</sub>.
- Bocas de hombre.
- Drenaje.
- Rebose.

- Succión de agua hacia las bombas.
- Recirculación de bombas.
- Virolas y paneles.
- Base del tanque:  
 $B = 1,956 \text{ m}$
- Lado del tanque:  
 $L = 3,08 \text{ m}$
- Altura del tanque:  
 $H = 1,3 \text{ m}$
- Material del tanque:  
SA 285 - C



**Figura 72: Tanque de almacenamiento.**

*Fuente: Autor*

#### ✓ Tubería de agua

La selección del tipo de tuberías tubería que se utilizarán dependerá del fluido que transportará, en el caso de la tubería de **AGUA** se determinó que, en el sistema Common – Rail la misma será para alta presión de acero sin soldadura Schedule 40.

Y para la tubería de combustible en el mismo sistema Common – Rail las tuberías serán para presiones de hasta 160 bar y podrán seleccionarse en acero o en cobre ASTM A53 Schedule 80.

Tubo ASTM A53			
DESIGNACIONES Y PESOS NOMINALES en kg/m			
DESIGNACIÓN	DIÁMETRO EXTERIOR (mm)	ESPESOR SCH 40 (mm)	PESO SCH 40 (kg/m)
1/8"	10.3	1.73	0.370
1/4"	13.7	2.24	0.630
3/8"	17.1	2.31	0.840
1/2"	21.3	2.77	1.270
3/4"	26.7	2.87	1.680
1"	33.4	3.38	2.500
1 1/4"	42.2	3.56	3.390
1 1/2"	48.3	3.68	4.060
2"	60.3	3.91	5.440
2 1/2"	73.0	5.16	8.630
3"	88.9	5.49	11.290
3 1/2"	101.6	5.74	13.670
4"	114.3	6.02	16.070
5"	141.3	6.55	21.770
6"	168.3	7.11	28.260



**DESCRIPCIÓN:**  
Tubos para alta presión (SCH 40) fabricados con acero al carbono de calidad estructural, utilizando el sistema de soldadura por resistencia eléctrica por inducción de alta frecuencia longitudinal (ERW).

**NORMA TÉCNICA DE FABRICACIÓN:**  
Según Norma ASTM A53

Comprende dos tipos (grados)

Grado A: Schedule 10  
Schedule 20  
Schedule 30  
Schedule 40

Grado B (Tratamiento Térmico): Schedule 40

**USOS:**  
Conducción para alta presión de agua, gas, vapor, petróleo, aire presurizado y fluidos no corrosivos.

**PRESENTACIÓN:**  
Longitud : 6.40 m (21').  
Otras longitudes a pedido.

**Acabado de extremos** : Refrentado (plano), limpio de rebordes.  
Biselado.  
Roscado (según Norma ANSI B1.20.1).  
Ranura tipo Victaulic.

**Recubrimiento** : Negro.  
Galvanizado (Según ASTM A53).  
Pintado.  
Aceitado.  
Desengrasado.  
Bajo Pedido.

**Acabado Interno** : Escariado.

**PROPIEDADES MECÁNICAS:**  
Grado A:  
Resistencia a la Tracción = 330 Min. Mpa  
Límite de Fluencia = 205 Min. Mpa  
Grado B:  
Resistencia a la Tracción = 415 Min. Mpa  
Límite de Fluencia = 240 Min. Mpa

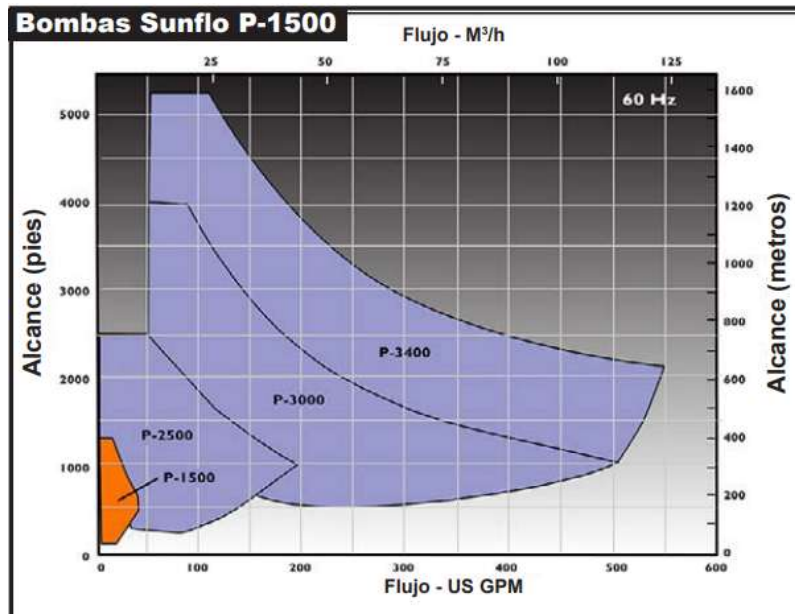
**TOLERANCIAS DIMENSIONALES:**  
Espesor mínimo : -12.5 % del valor nominal  
Peso : + / - 10 % del valor nominal  
Diámetro : + / - 1 % del valor nominal

Tabla09: Características tubos ASTM A53.

### ✓ Bomba de transporte

La bomba elegida en el presente trabajo es del tipo centrífuga y debe suministrar un caudal diario de aproximadamente  $m^3/dia$  a una altura dinámica promedio de 5 m. con los datos de altura y caudal calculado en la sección anterior, selecciono el modelo que más se ajusta a mi necesidad.

En este caso la que más se ajusta a nuestras necesidades es un electro bomba de tipo sumergible **marca SUNFLO de la serie P-1500, de tipo centrífuga multietapa** con impulsores radiales, directamente acoplada a un motor eléctrico sumergible, el cuerpo de la bomba y del motor están contruidos en su totalidad de acero inoxidable, la bomba tiene cojinetes de caucho lubricados por aceite, su cámara de descarga tiene rosca hembra y tiene incorporada una válvula anti retorno, cuyos datos se detallan en los anexos adjuntos.



**Figura 72: Curva de selección de bomba.**

*Fuente: Manual de Fabricante*

### ✓ Filtros

Los equipos de filtro de agua utilizan la filtración como proceso, en el cual partículas sólidas que se encuentran en un fluido líquido o también gaseoso se separan mediante un medio filtrante, o filtro, que permite el paso del fluido a su través, pero retiene las partículas sólidas.

De la siguiente tabla realizamos la selección de Filtro Y para el sistema de inyección:

TAMICES. PATRÓN EN Y:

\* TBC-13-\*.\*.\*

\* MATERIAL: CUERPO Y CUBIERTA:

1. SCS13(CF8)
2. SCS14(CF8M)
3. SCPH 2(A216WCB)

TAMIZ: SUS304/SUS316

\* CONEXIONES: EXTREMO BRIDADO.

1. JIS 10K, 20K G/CM<sup>2</sup>
2. ANSI 150, 300LB
3. DIN PN10, 16, 25

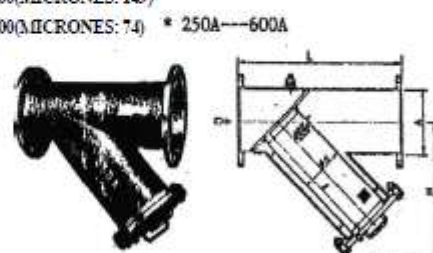
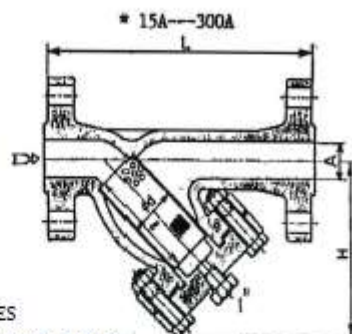
TEMPERATURA HASTA 350 °C

TAMIZ: MALLA 5 A MALLA 200

\* CONVERSIONES DE MALLA A MICRONES

- A. TAMAÑO DE MALLA: 20(MICRONES: 840)
- B. TAMAÑO DE MALLA: 40(MICRONES: 420)
- S. TAMAÑO DE MALLA: 60(MICRONES: 250)
- D. TAMAÑO DE MALLA: 80(MICRONES: 177)
- E. TAMAÑO DE MALLA: 100(MICRONES: 149)
- F. TAMAÑO DE MALLA: 200(MICRONES: 74)

## TAMIZ TIPO Y



### DIMENSIONES

TAMAÑO A	15	20	25	32	40	50	65	(3") 80	100	125	150	(6") 200	250	300
L(F a F)	130	150	160	180	200	230	290	310	350	400	480	600	730	850
H(APROX)	100	100	110	145	145	170	190	215	260	315	380	450	550	690
d <sup>1</sup> (TAMIZ)	23	23	30	46	46	56	74	88	110	140	170	210	270	320
φ (TAMIZ)	65	65	75	100	100	120	130	150	180	220	270	330	420	500

Figura 73: Tanque de almacenamiento.

Fuente: Manual de Fabricante

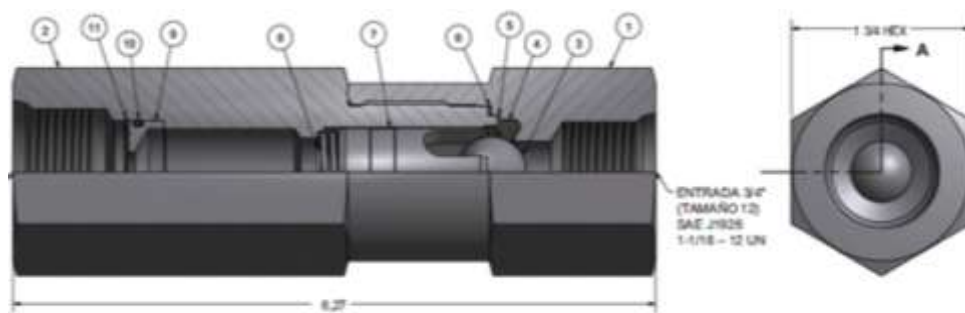
### ✓ Bomba de inyección

Es una bomba de alta presión, alimentándola con una presión lo más constante posible (0,75 bar), haciendo pasar el agua desmineralizada por un filtro, donde eliminará, tanto las burbujas que puedan existir como partículas que puedan dañar los inyectores.

### ✓ Inyector de Orificio.

Se encargan de repartir el agua desmineralizada dentro del cilindro. La punta de los inyectores, contiene unos orificios, a través de los cuales se reparte el agua desmineralizada inyectado. Estos orificios,

están cerrados por medio de la aguja del inyector en estado de reposo mediante un muelle; éste se mueve en el momento la presión alcanza unos valores mínimos, y es en este punto, cuando el combustible levanta la aguja, liberando los orificios, a través de los cuales entra a gran velocidad en la cámara de combustión. Dicho chorro de gasoil, se rompe evaporándose y mezclándose con el aire para generar la mezcla.



**Figura 74: Inyector tipo tetón.**

*Fuente: Manual de Fabricante*

#### ✓ **Sistema de inyección de agua**

La inyección de agua a cada boquilla durante la operación de combustible líquido (Diesel B5). Dentro de la envolvente de funcionamiento de la Grupo Electrónico delimitada por los límites de cámaras de combustión, el sistema de inyección de agua abastece de agua a la Grupo Electrónico, principalmente para la reducción de NOx cuando se opera con gas natural o combustibles líquidos a partir de la carga en un 30% (sobre la base de la Grupo Electrónico de referencia de la temperatura de disparo, TTRF) para la carga base. Un bastidor de inyección de agua montado de fábrica, situado cerca de la Grupo, toma el agua de la instalación de almacenamiento del cliente y lo entrega a la presión correcta y la velocidad de flujo al Grupo. El agua se inyecta en la cámara de combustión para reducir la temperatura de la cámara y reducir la formación de NOx. Para evitar la corrosión en caliente de dentro de la cámara de combustión del Grupo, se requiere agua desmineralizada.

El sistema de inyección de agua recibe agua desmineralizada de la instalación de tratamiento del cliente y suministra agua filtrada a la presión y el caudal necesarios para cumplir el nivel de emisiones estipulado para tales condiciones de funcionamiento. El sistema de inyección de agua consiste de dos módulos de bomba fuera de base, un módulo de control fuera de base y tuberías y componentes fuera de base. Solo un módulo de bomba se requiere para esta operación. El módulo de bomba se equipa con una bomba de velocidad fijada con intercambiador de calor interno, filtro de entrada, tubería de recirculación con una válvula de cierre de recirculación y un orificio de flujo. El agua recirculada se devuelve al tanque de almacenamiento del cliente a través de las tuberías del cliente conectadas ascendentemente al orificio de descarga. El orificio de recirculación está diseñado para proporcionar una presión máx. de recirculación de 30 psig en el orificio de descarga.

## 5.5. Metrado

**Tabla N° 10: Valor Referencial para el suministro de materiales para el sistema inyección.**

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario(\$)	Costo (\$S/.)
Bomba de inyección	und.	1	36900	36900
Bomba de transporte	und	1	3200	3200
Tubería de acero inoxidable $\phi=8$ mm	m	50	231	1150
Tubería de acero inoxidable $\phi= 50,8$	m	20	2580	2580
Inyectores	und	20	300	6000
Tanque que de almacenamiento	und	1	180000	180000
Tratamiento de agua Desmineralizada	-	-	250000	250000
Accesorios	und	-	180000	180000
<b>Total</b>				<b>520100</b>



## 5.6. Evaluación Económica del Proyecto

### ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO

Según los resultados obtenidos, hemos indicado que el ahorro de combustible que se obtiene por el uso de la inyección de agua en la cámara de Combustión es entre el 10 y el 30 %.Vamos a considerar en nuestro caso un ahorro de un 10 %.

**Tabla N° 11: Relación de Combustible-Agua desmineralizada.**

Consumo de Combustible (Kg/h)	Relación de porcentaje entre Combustible-Agua(%)	Cosumo de agua (Kg/h)
1510	30/10	151

En un funcionamiento continuo de 16 horas diarias el consumo de agua desmineralizada es:

$$151 * 16 = 2416 \text{ Kg}$$

Siendo el costo del galón de petróleo = 20 soles

Como el galón de petróleo pesa 3,2 Kg, estamos ahorrando en 16 horas

Continuas  $2416/3,2 = 755$  galones de petróleo lo que equivale a S/. 15100

Soles diarios.

En un período de 6 meses:

$$15\,100 * 180\text{días} = 2\,718\,000 \text{ soles.}$$

Como el dólar vale 3,22 Soles

Equivale a **US \$ 844 099,3 dólares.**

Para el cálculo del costo beneficio éste valor constituye el VPN de ingresos

- Para la construcción del tanque de almacenamiento de agua desmineralizada

Este tanque dispone de un rebose, un drenaje y un venteo. Además, debe contener sensores para medir el nivel de agua, el control de las bombas, el control de la planta de tratamiento y un indicador local tipo regleta, el tanque es rectangular con fondo plano.

Se construirá con planchas de acero inoxidable AISI 304, tiene las siguientes dimensiones:

$$B = 2\text{m} = 6,562 \text{ pies}$$

$$L = 3\text{m} = 9,843 \text{ pies}$$

$$H = 1,5\text{m} = 5 \text{ pies}$$

Con una longitud total a soldar de 85,62 pies.

Para la construcción del tanque se necesitan 7 planchas de acero inoxidable de 1/8 pulg. de espesor\* 4 pies\* 8 pies.

Por cada pie en una plancha de 1/8 de espesor se utilizan 0,476 lb./pie de soldadura, por lo tanto, se necesitan 60 Kg, de electrodos de soldadura especial para soldar el tanque.

**Tabla N° 12: Costos de fabricación y montaje de Tanque de almacenamiento de agua desmineralizada.**

	Cantidad	Costo unitario (\$)	Costo (\$)
Plancha de acero inoxidable	7 und	3500	24500
Soldadura	160 Kg	40	6400
Mano de obra			9270
Total			40270

Los accesorios que se usarán en el montaje del sistema de la inyección de Agua serán los siguientes con los costos que se indican:

Este valor constituye el valor presente neto de egresos VPN de egresos que Sirve para el cálculo del costo beneficio del proyecto de investigación.

Por lo que la relación:

$$C/B = \text{VPN de ingresos} / \text{VPN de egresos}$$

Es decir:

$$\mathbf{C/B = 844\ 099,3 / 520\ 100 = 1,4}$$

Siendo la relación costo beneficio  $> 1$  se dice que el proyecto es beneficioso

## **CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1 Conclusiones**

1. La eficiencia actual del grupo electrógeno Watsila W20V34DF es de 44.8 % con alimentación de combustible Diesel B5, el sistema de inyección de agua que se ha propuesto, toma como referencia las pruebas y experimentos realizada por Bosh a la cual se llega con aumento eficiencia del 10%, a lo que se asume que le Grupo electrógeno obtendría 54.8%.
2. Los parámetros de de inyección que se evaluaron en el sistema de inyección que se propone son:
  - Cálculos y Dimensionamiento.
  - Cálculo de Consumo de combustible en el Motor Diesel de Grupo Auxiliar de la Central Térmica de Reserva Fría Eten.
  - Cálculos en la Selección de la bomba.
  - Diseño del circuito hidráulico
  - Dimensionamiento del Circuito de combustible:
  - Diseño de la inyección.
3. En los capítulos anteriores hemos estimado la relación costo beneficio del proyecto a lo que se concluye que el proyecto es  $>1$  lo q da entender que es viable.

### **6.2 Recomendaciones**

Se recomienda a la empresa Cobra-EMCI implementar el sistema de inyección de agua al interior del motor Wartsila por que se conseguirá aumentar el rendimiento, la potencia, disminuir los gases contaminantes, aumentar la relación de compresión, disminuir el consumo de combustible y a la ves disminuir al desgaste de las las partes del motor.

A la vez se recomienda, establecer programas de capacitación para al personal de operación y mantenimiento de la planta, así mismo al Staff técnico con el propósito de controlar adecuadamente el funcimaniento del motor.

Se recomienda hacer participar a todo el personal del Staff técnico, personal de mantenimiento en cursos o semilleros sobre temas de inyección electrónica en motores diésel sobre todo en el Sistema “Common Rail” sobre todo en sus subsistemas:

- Circuito de combustible de bajo presión.
- Circuito de combustible de alta presión.
- Conjunto inyector-válvula.
- Circuito electrónico de control de unidades de mando, sensores y actuadores.
- Circuito de recirculación de gases de escape.
- Circuito de control de la presión de soplado del turbo
- Circuito de recirculación de vapores del carter.

## **CAPÍTULO VII: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

### **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. Motores de Automóviles. JOVAJ M. S., Mir. Moscú,. 1988
2. Anteproyecto de Diseño e instalaciones de motores diésel estacionarios, Ing. Carlos Neciosup Inicio separatas Maquinas Térmicas, UNLP 2005
3. “Motores de Combustión Interna Alternativos”. T. Sánchez Lencero, A Muñoz Blanco, F.J. Jiménez Espadafor. Sección de publicaciones ETSI Universidad de Sevilla, 2009
4. “Diesel-Engine Management, 4th Edition”. Robert Bosch GmbH, 2005.
5. “Automotive Handbook, 7th Edition”. Robert Bosch GmbH, 2007.
6. “Manual de la técnica del automóvil, 3ª Edición”. Robert Bosch GmbH, 1996.
7. “Sistemas de inyección Diesel por acumulador Common Rail”. Robert Bosch GmbH, 2005.
8. W. Mingrui, N. T. Sa, R. F. Turkson, L. Jinping, and G. Guanlun, “Water injection for higher engine performance and lower emissions,” J. Energy Inst., vol. 90, no. 2, pp. 285–299, 2017.
9. E. Arabaci, Y. İçingür, H. Solmaz, A. Uyumaz, and E. Yilmaz, “Experimental investigation of the effects of direct water injection parameters on engine performance in a six-stroke engine,” Energy Convers. Manag., vol. 98, pp. 89–97, 2015.
10. M. I. Hassan and A. T. Brimmo, “Modeling In-Cylinder Water Injection in a 2-Stroke Internal Combustion Engine,” Energy Procedia, vol. 75, pp. 2331–2336, 2015.

11. X. Tauzia, A. Maiboom, and S. R. Shah, "Experimental study of inlet manifold water injection on combustion and emissions of an automotive direct injection Diesel engine," *Energy*, vol. 35, no. 9, pp. 3628–3639, 2010.
12. X. Ma, F. Zhang, K. Han, Z. Zhu, and Y. Liu, "Effects of Intake Manifold Water Injection on Combustion and Emissions of Diesel Engine," *Energy Procedia*, vol. 61, pp. 777–781, 2014.
13. M. E. A. Fahd, Y. Wenming, P. S. Lee, S. K. Chou, and C. R. Yap, "Experimental investigation of the performance and emission characteristics of direct injection diesel engine by water emulsion diesel under varying engine load condition," *Appl. Energy*, vol. 102, pp. 1042–1049, 2013.
14. Z. Zhang et al., "Effect of direct water injection during compression stroke on thermal efficiency optimization of common rail diesel engine," *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 1251–1258, 2017.
15. M. Nour, H. Kosaka, A. K. Abdel-Rahman, and M. Bady, "Effect of Water Injection into Exhaust Manifold on Diesel Engine Combustion and Emissions," *Energy Procedia*, vol. 100, pp. 178–187, 2016.
16. Z. Wu, X. Yu, L. Fu, J. Deng, and L. Li, "Experimental study of the effect of water injection on the cycle performance of an internal-combustion Rankine cycle engine," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*, vol. 228, no. 5, pp. 580–588, 2014.
17. L. Fu, Z. Wu, X. Yu, J. Deng, Z. Hu, and L. Li, "Experimental Investigation of Combustion and Emission Characteristics for Internal Combustion Rankine Cycle Engine under Different Water Injection Laws," *Phys. Procedia*, vol. 66, pp. 89–92, 2015.

18. C. L. Yaws, "Transport properties of chemicals and hydrocarbons: viscosity, thermal conductivity, and diffusivity of Cl to Cl100 organics and Ac to Zr inorganic," William Andrew Inc, 2009.
19. AVL, BOOST User Guide, 2016th ed. 2016.
20. <http://www.wmlclub.com/arti> Empresas y productos
- 21.23. <http://www.bairesrobotics.com.ar/gsm.htm>
22. [http://www.netvmi.com/es/esp\\_vantagens.htm](http://www.netvmi.com/es/esp_vantagens.htm)
23. <http://www.analitica.com/va/sociedad/noticias/3876050.asp>
24. <http://www.telefonica.com.pe/Movistar/movimultimedia.html>
25. <http://www.tim.com.pe/portalTimWebApp/application?origin=menuAccionesServicios.jsp&event=bea.portal.framework.internal.portlet.event&pageid=Servicios&po>
26. <http://www.comtechm2m.com/m2m-telemetry-solutions/vending-telemetrysolution.htm>



# **ANEXOS**

## Ficha Técnica de Motor

Potencia de la planta	8225 kW
<b>Grupo electrógeno</b>	
<b>Motor</b>	
Tipo de motor	W20V34DF
Número de cilindros	20
Diámetro de cilindros	340 mm
Régimen	720 rpm
Potencia nominal	8700 kW
Tensión principal	480 V; 60 Hz
Tensión secundaria	24 V CC
Sentido de giro	Horario
<b>Generador</b>	
Tipo de generador	AMG 1120LS10 DSE
Potencia	10.549 kVA
Factor de potencia	0,80
Tensión	6600 V
Corriente	923 A
Frecuencia	60 Hz
Potencia de resistencias calefactoras anticondensación	1,6 kW

## Datos Técnicos Principales del Motor

Diámetro interior de cilindro ..... 340 mm  
 Carrera ..... 400 mm  
 Cilindrada por cilindro ..... 36,3 l

**Tabla 01-1 Datos específicos de la instalación: instalación de central eléctrica**

Propiedad		Valores
Configuración de cilindros		20V
Orden de encendido	Rotación en sentido horario	A1-B1-A4-B4-A3-B3-A2-B2-A6-B6-A10-B10-A7-B7-A8-B8-A9-B9-A5-B5
	Rotación en sentido antihorario	A1-B5-A5-B9-A9-B8-A8-B7-A7-B10-A10-B6-A6-B2-A2-B3-A3-B4-A4-B1
Volumen de aceite de lubricación (aprox.)		5,3 m <sup>3</sup> [1]
Volumen de agua de refrigeración del circuito de AT (aprox.)		0,94 m <sup>3</sup>
Volumen de agua de refrigeración del circuito de BT (aprox.)		0,31 m <sup>3</sup>

**Tabla 01-2 Datos de funcionamiento de temperatura (°C)**

Parámetros	Límites de diseño			
	Min	Nom.	Máx.	Alarma (parada)
Temperatura ambiente		25		
Temperatura de aire después del enfriador de aire	35	45	55	
Temperatura antes del motor (aceite de lubricación)		63		70
Temperatura después del motor (aceite de lubricación)		81		
Temperatura antes del motor (agua de refrigeración de AT)		85		105 (110)
Temperatura después del motor (agua de refrigeración de AT)		96		
Temperatura antes del enfriador de aire (agua de refrigeración de BT)	25	38		
Temperatura después del enfriador de aceite de lubricación (agua de refrigeración de BT)		47		

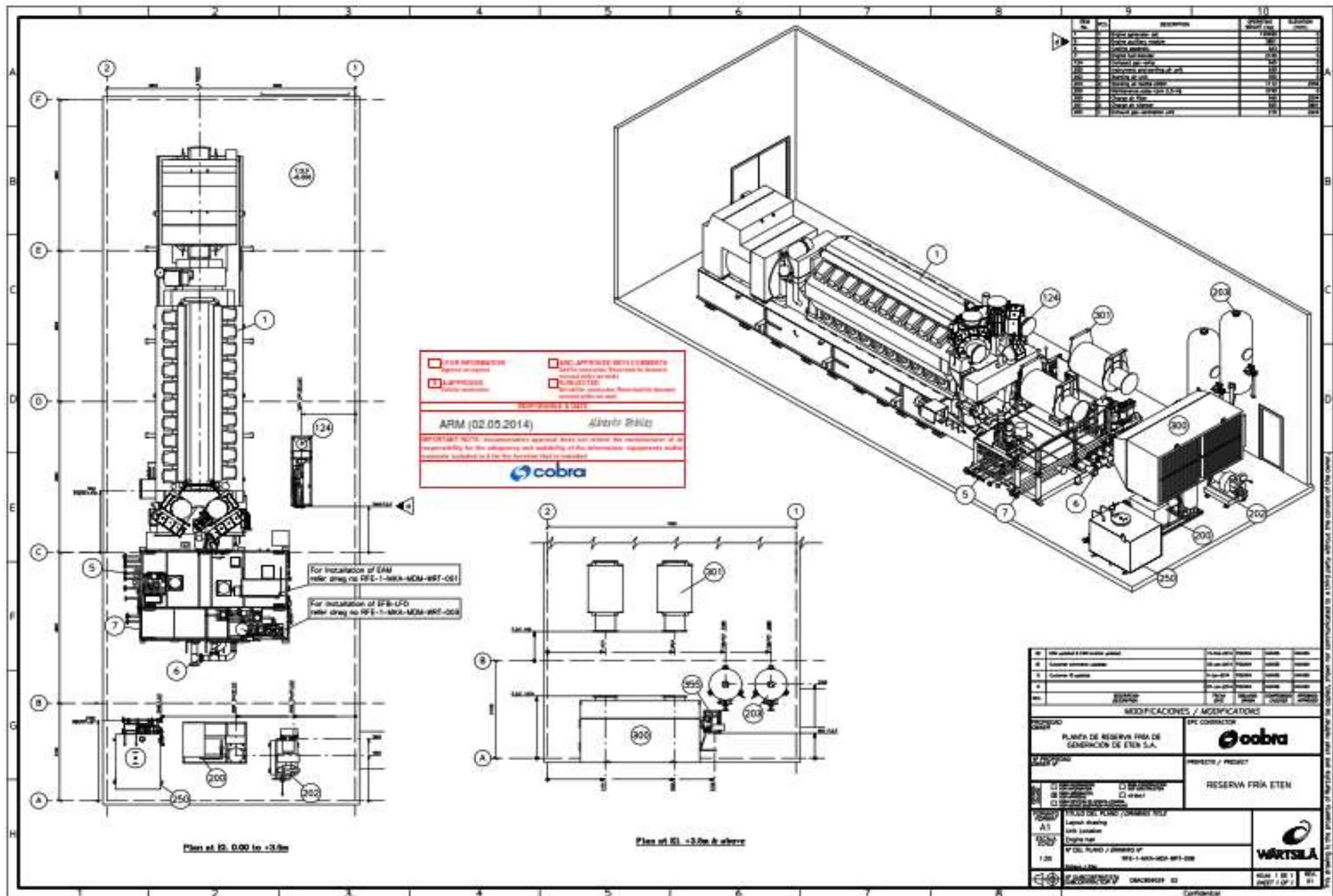
**Tabla 01-3 Datos de funcionamiento de presión (kPa)**

Parámetros	Límites de diseño			
	Min	Nom.	Máx.	Alarma (parada)
Presión antes del motor (aceite de lubricación)		500		300 (250)
Presión de lubricación		50		30
Presión de retroceso del cárter del motor		0.1-0.2		0.3 (0.5)
Presión en la entrada del motor después de la bomba (agua de refrigeración de AT)		250 + presión estática	450	150 + presión estática
Presión antes del enfriador de aire de carga (agua de refrigeración de BT)		250 + presión estática		
Colector de suministro de la bomba de espera		250 + presión estática		
Presión del depósito de expansión (agua de refrigeración de AT)		70-150		
Presión del depósito de expansión (agua de refrigeración de BT)		70-150		
Caída de presión en el motor <sup>(1)</sup> (agua de refrigeración de AT)				
Con enfriador de aire de carga de 1 etapa		100		
Con enfriador de aire de carga de 2 etapas		150		
Caída de presión en el enfriador de aire de carga (agua de refrigeración de BT)				
1 etapa		15		
2 etapas		35		
Caída de presión en el enfriador de aceite (agua de refrigeración de BT)				
Motor en línea		30		
Motor en V		20		
Caída de presión en el sistema externo (agua de refrigeración de AT)			60	
Caída de presión en el sistema externo (agua de refrigeración de BT)			60	
Presión de aire (aire de arranque)	1500 <sup>(2)</sup>	3000		1600

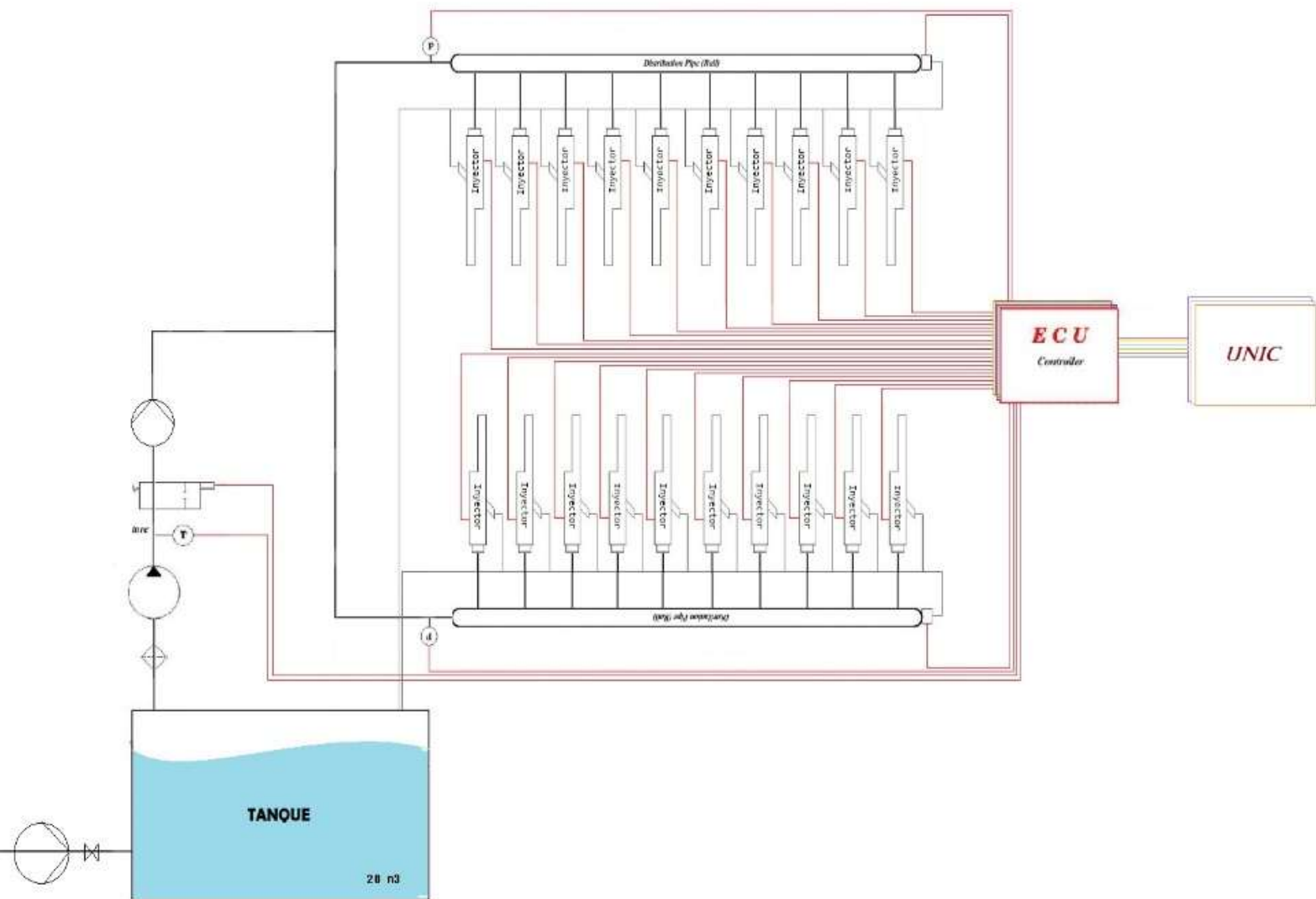


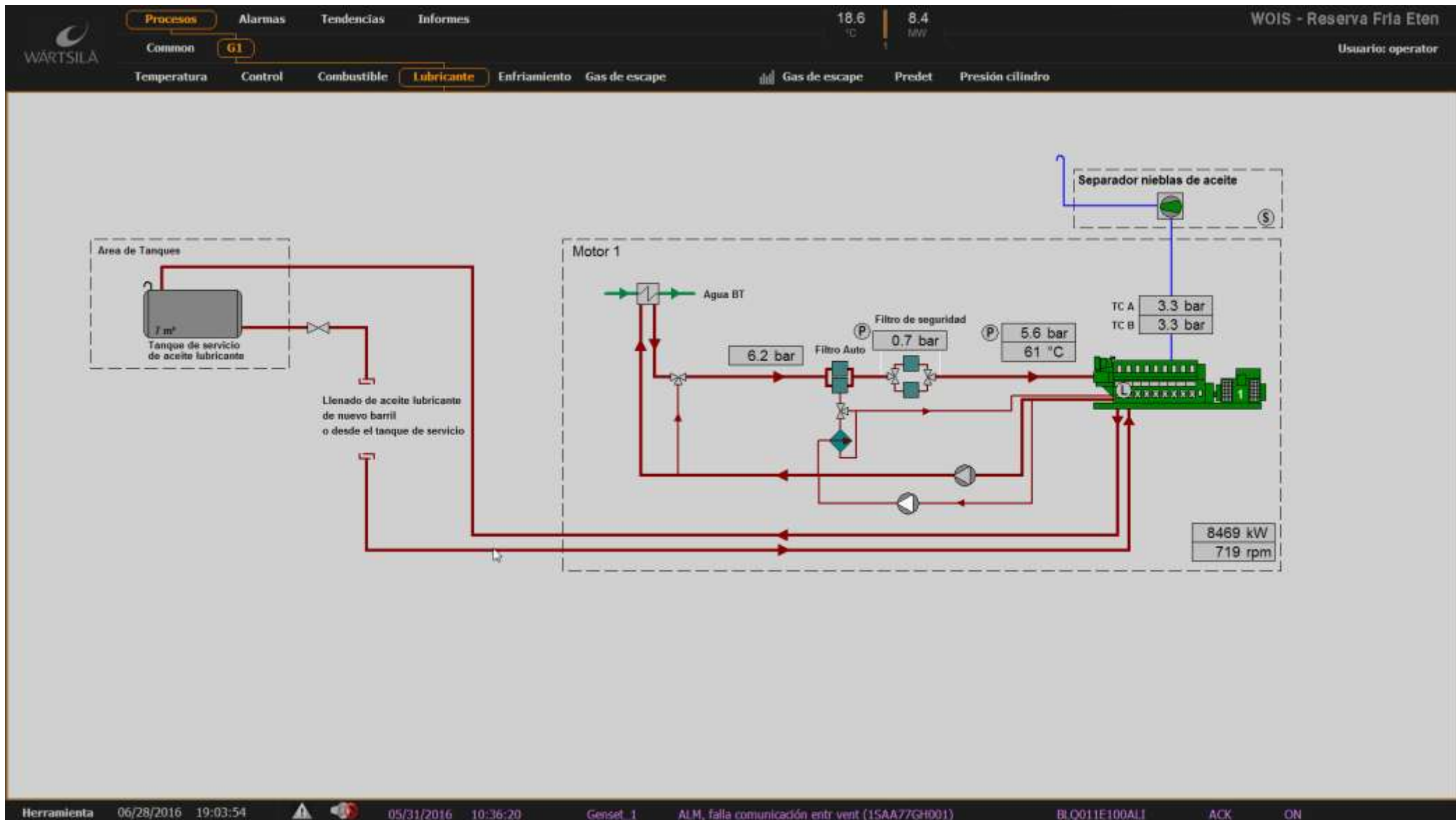






PLANTA DE  
TRATAMIENTO DE  
AGUA  
DESMINERALIZADA

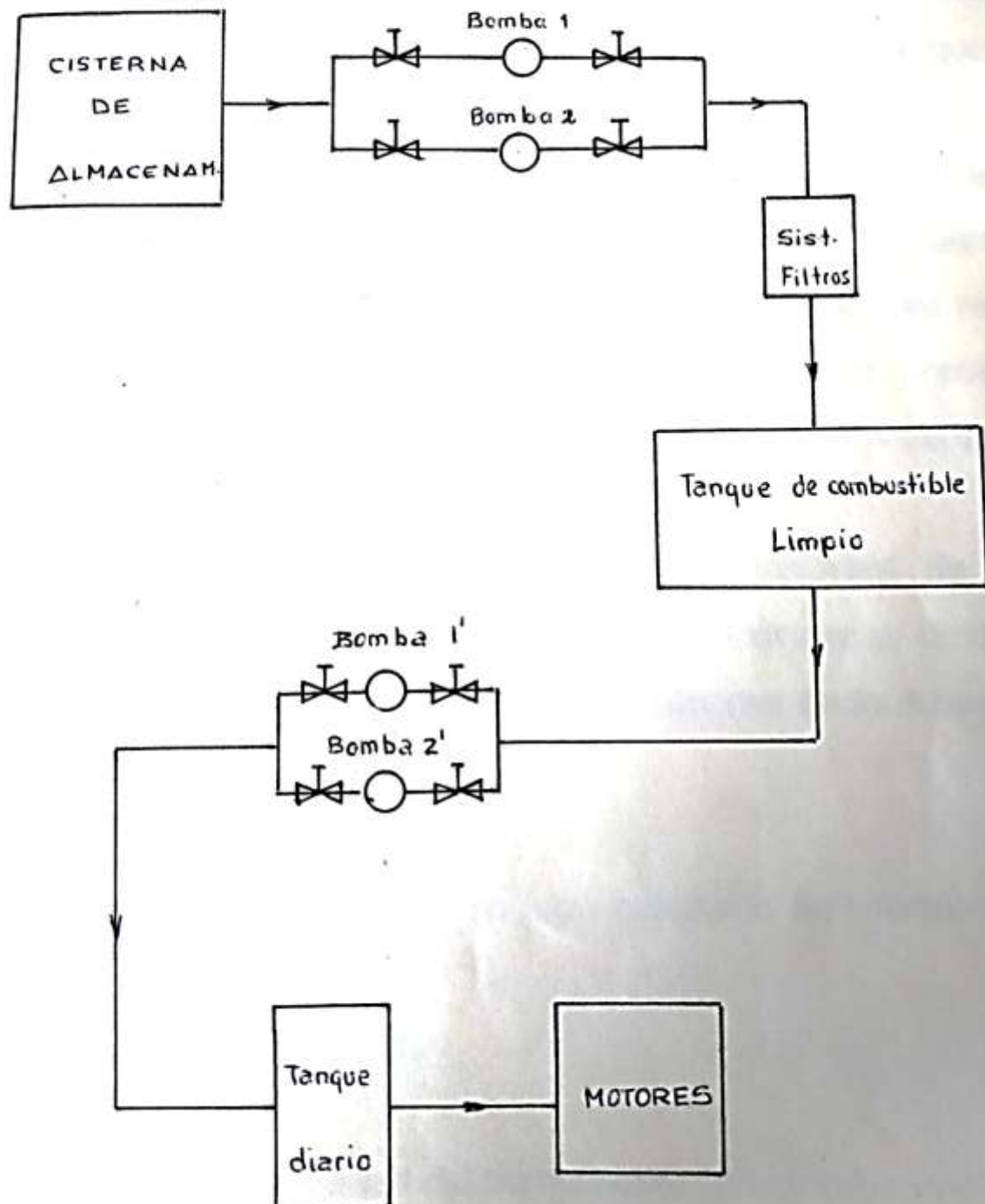


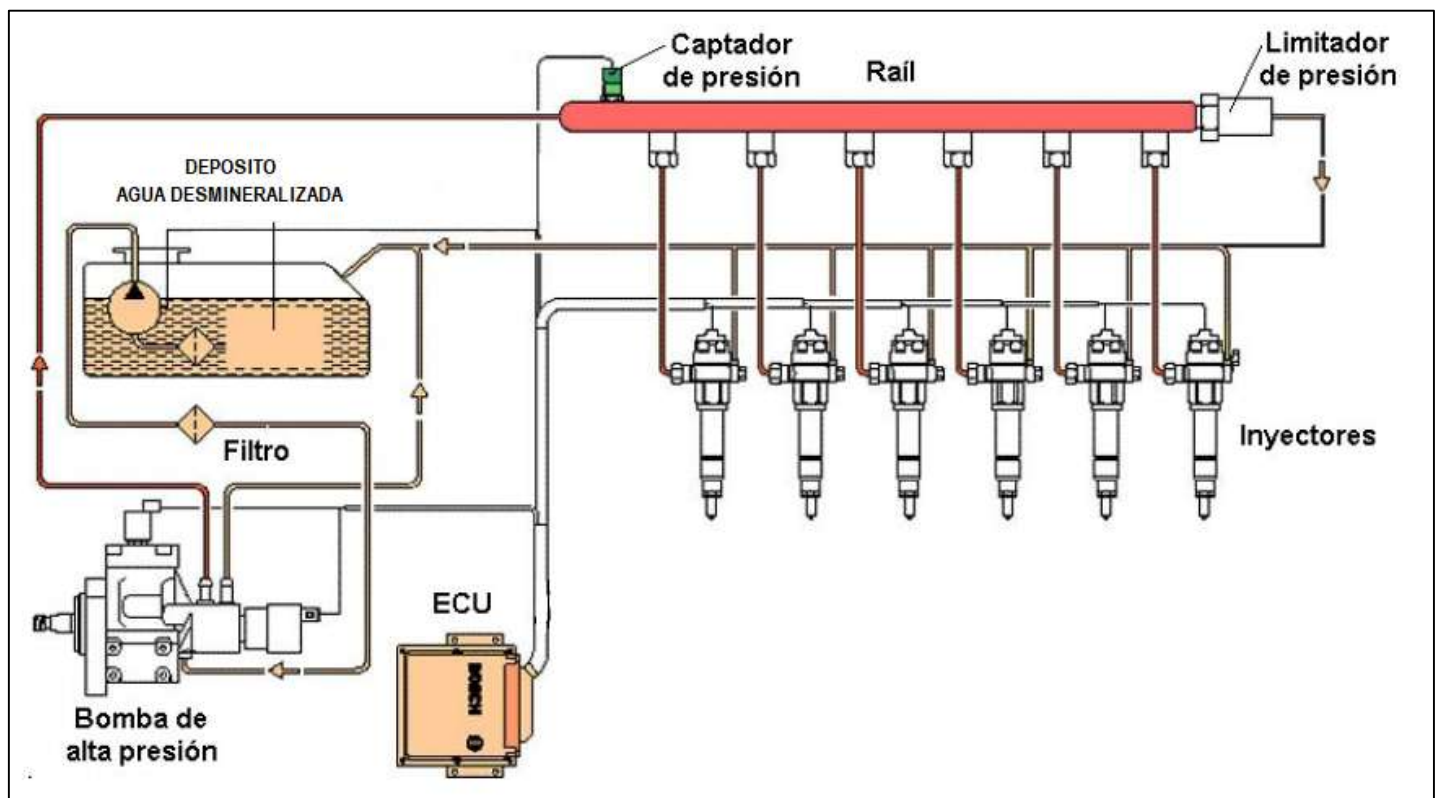


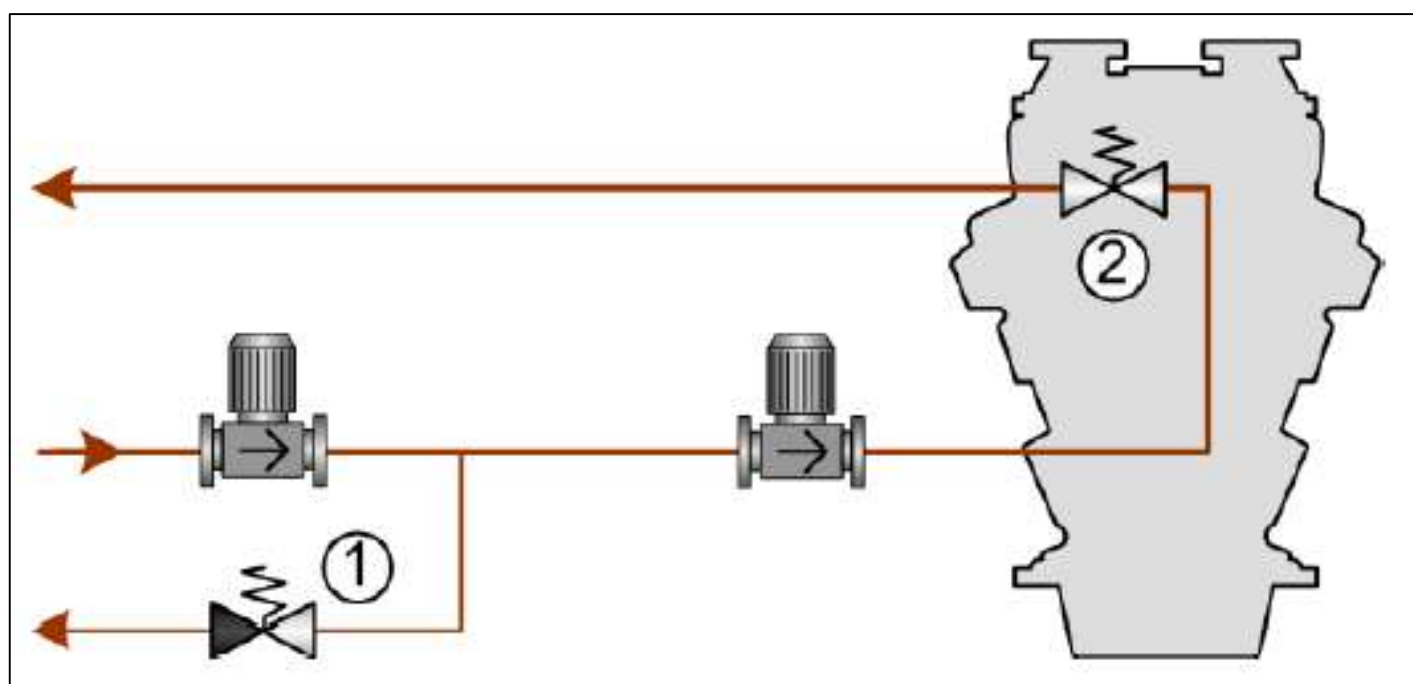
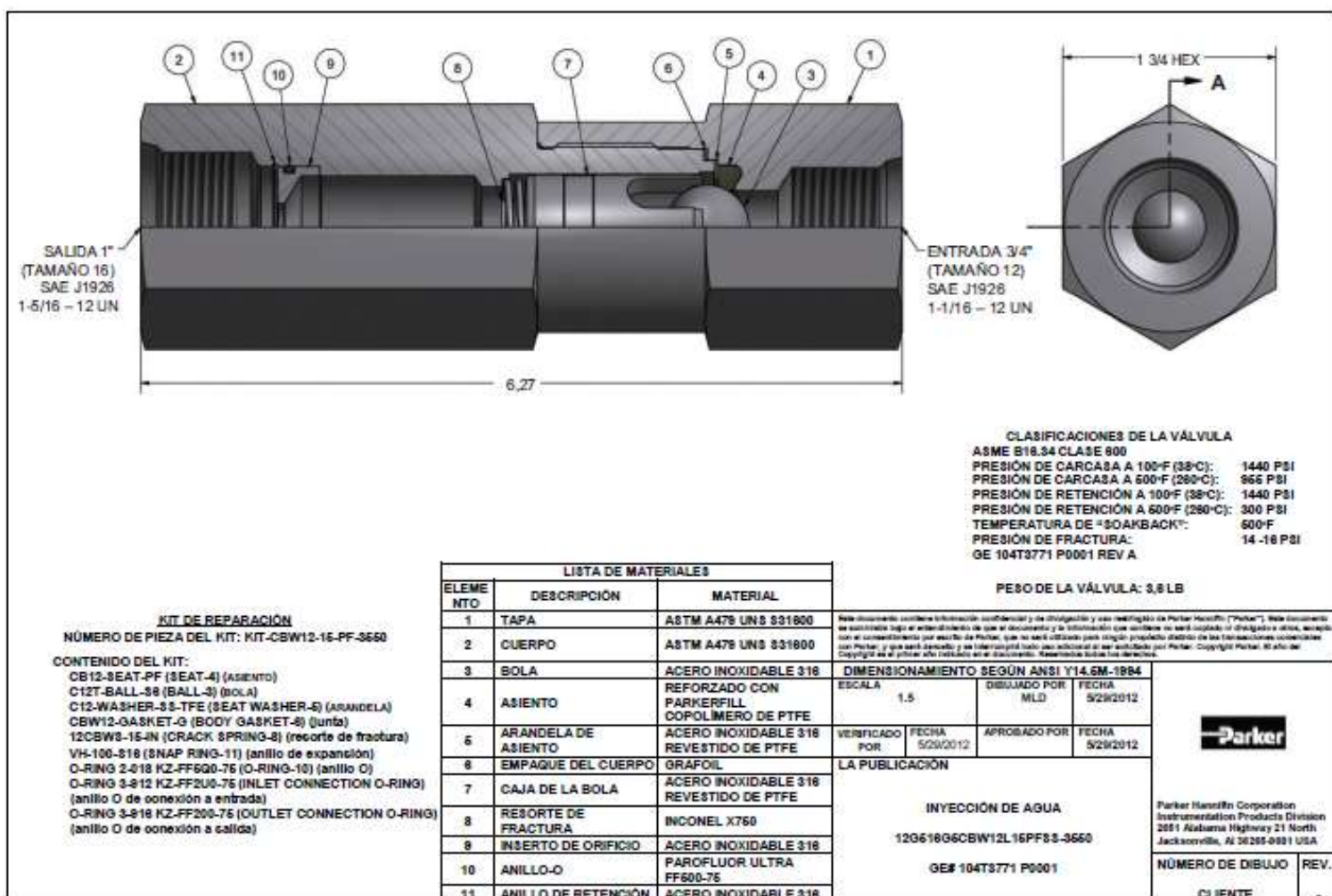


## SISTEMA DE ALIMENTACION

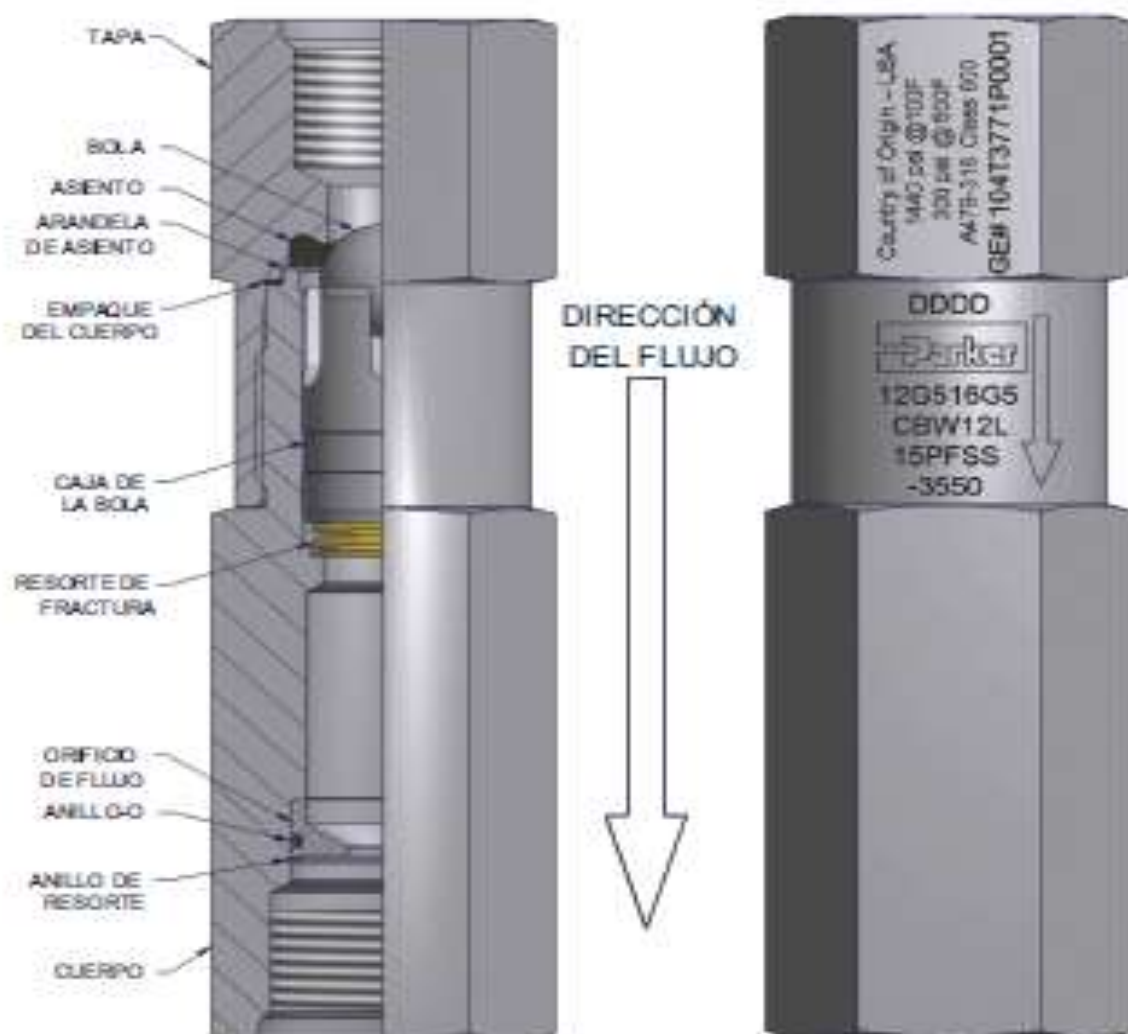
### CALCULO DEL CIRCUITO DE COMBUSTIBLE







# 1. DETALLE DE LA CONSTRUCCIÓN CON ORIENTACIÓN DEL FLUJO



Instrumentation Products Division  
Huntsville, Alabama

IOM-131-WPV\_ESMX  
CONFIDENCIAL Y DE USO  
Y DIVULGACIÓN RESTRINGIDOS

A  
Página 3 de 6



# Bombas Sunflo.

Bombas industriales de alta presión				
				
	<b>P-1500</b>	<b>P-2500</b>	<b>P-3000</b>	<b>P-3400</b>
Ventajas principales	Alta presión	Elevada eficiencia	Fiabilidad	Reparado (consulta con informático médico)
Alcance hasta	de 100 a 1188 pies (de 32 a 277 m)	de 250 a 2830 pies (de 83 a 554 m)	de 300 a 4200 pies (de 100 a 1280 m)	de 1000 a 5000 pies (de 305 a 1585 m)
Flujo hasta	de 10 a 55 GPM (de 1 a 6 m <sup>3</sup> /h)	de 25 a 180 GPM (de 3 a 48 m <sup>3</sup> /h)	de 50 a 500 GPM (de 6 a 81 m <sup>3</sup> /h)	de 50 a 500 GPM (de 6 a 125 m <sup>3</sup> /h)
Potencia máxima	10 hp (7 kW)	75 hp (55 kW)	100 a 200 hp (74 a 166 kW)	100 a 400 hp (73 a 293 kW)
Rango de temperatura	de -50 a 300 °F (de -46 a 149 °C)	de -50 a 300 °F (de -46 a 149 °C)	de -50 a 300 °F (de -46 a 149 °C)	de -50 a 300 °F (de -46 a 177 °C)
Número de etapas	1,8	1,8	1,8	1,8
Máxima presión de operación de la caja	1000 psi (70 kg/cm <sup>2</sup> )	1440 psi (105 kg/cm <sup>2</sup> )	2160 psi (152 kg/cm <sup>2</sup> )	2160 psi (152 kg/cm <sup>2</sup> )
Presión de succión máxima	200 psi (14 kg/cm <sup>2</sup> )	200 psi (14 kg/cm <sup>2</sup> )	300 psi (20 kg/cm <sup>2</sup> )	300 psi (20 kg/cm <sup>2</sup> )
Rango de velocidades	de 13 300 a 32 000 rpm-60 Hz	de 5807 a 56 707 rpm-60 Hz	de 6756 a 17 750 rpm-60 Hz	de 6756 a 21 000 rpm-60 Hz
Materiales de construcción	Acero inoxidable 316	Acero inoxidable 316 (acero inoxidable duplex opcional), Hastelloy, AISI 4140/4130/4130, acero, aluminio o acero fundido	Acero inoxidable 316 (acero inoxidable duplex opcional), Hastelloy, AISI 4140/4130/4130, acero, aluminio o acero fundido	Acero inoxidable 316 (acero inoxidable duplex opcional), Hastelloy, AISI 4140/4130/4130, acero, aluminio o acero fundido
Tecnología de cojinetes	Modulo con lubricación por salpicadura	Modulo con lubricación por salpicadura	Modulo con lubricación por salpicadura	Cojinetes de deslizamiento lubricados por presión
Presión hidráulica	1000 psig (70 kg/cm <sup>2</sup> g)	2160 psig (151 kg/cm <sup>2</sup> g)	2160 psig (151 kg/cm <sup>2</sup> g)	2160 psig (151 kg/cm <sup>2</sup> g)
Viscosidad máxima	10 cp	10 cp	10 cp	10 cp
Rango de sólidos	0.015" (0.381 mm), 400 micras	0.015" (0.381 mm), 400 micras	0.015" (0.381 mm), 400 micras	0.015" (0.381 mm), 400 micras
Configuraciones de montaje	Acoplamiento cerrado, montaje sobre soporte	Acoplamiento cerrado, montaje sobre soporte	Acoplamiento cerrado, montaje sobre soporte	Montaje sobre soporte
Número de unidades hidráulicas disponibles	39,6	147,9	244,9	244,9
Configuraciones de salida disponibles	Simple, doble	Simple, doble, tandem	Simple, doble	Simple, doble
Inductor disponible	Si	Si	Si	Si
Conexiones disponibles	NPT, 3/8" NPT	NPT, 3/8" NPT, 1/2" NPT	Brida de purga 600RF, 800RF	Brida de purga 600RF, 800RF
Margen de corrosión de la caja de la bomba	Amplias aberturas	Amplias aberturas	Amplias aberturas	Amplias aberturas
Tamaño de succión y descarga	1" x 1"	2" x 1,5"	3" x 2" y 4" x 3"	3" x 2" y 4" x 3"
Plano de sellado de las bombas Sello	11, 13, 21, 31, 41, 53	11, 13, 21, 31, 41, 52, 53	11, 13, 21, 31, 41, 53	11, 13, 21, 31, 41, 53



**Sunflo P-1500 Industrial Grade Pump**

Flows to 33 gpm (6 m<sup>3</sup>/hr)

Heads to 1,300 ft (277 m)

Maximum Power 10 HP, 7 kW

Maximum Suction Pressure 200 psi (14 kg/cm<sup>2</sup>)

Minimum NPSH

Temperature Range -50 to 300°F (-46 to 149°C)