Resumen

En este proyecto se aborda la viabilidad de reducir el tiempo de ciclo de un test funcional al final de una línea de producción utilizado para comprobar el correcto funcionamiento de bombas de inyección de combustible. Para ello se utilizan herramientas estadísticas y más concretamente estudios de capacidad. Además también se encontrarán otras herramientas estadísticas debido a problemas con la distribución de los datos utilizados.

En el aspecto puramente técnico se verá que se puede pasar de 4 puntos de ensayo (máxima potencia, máximo par, ralentí y arranque) a 2 (máxima potencia y máximo par) sin comprometer significativamente la calidad.

Además, se comprobará la viabilidad económica del proyecto cuyos resultados muestran una clara rentabilidad con lo que el aspecto económico también es favorable.

En resumidas cuentas, lo que en este proyecto se encontrará es una mejora productiva con claros resultados económicos a pesar de las numerosas dificultades técnicas que han ido apareciendo en el transcurso de su elaboración.

Sumario

RESUMEN 1

SUMARIO 3

1. GLOSARIO 7

2. PREFACIO 9

2.1. Origen del proyecto 9

2.2. Motivación 9

2.3. Requerimientos previos 10

3. INTRODUCCIÓN 11

3.1. Objetivos del proyecto 11

3.2. Alcance del proyecto 11

3.3. Relación con otros trabajos 12

4. DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO 13

4.1. Definición y clasificación 13

4.2. Orígenes 13

4.3. Funcionamiento y componentes 14

4.3.1. Funcionamiento 14

4.3.2. Control y seguridad 16

4.3.3. Componentes 18

5. PROCESO DE FABRICACIÓN 23

5.1. Eje 24

5.2. Zapata/rodillo 25

5.3. Housing 26

5.4. Cabezal hidráulico 28

5.5. Bomba de transferencia 29

6. TEST FUNCIONAL 30

6.1. Bancos de test 30

6.2. Test Plan 31

6.2.1. Definición de variables 31
6.2.2. Llenado 31
6.2.3. Prueba funcionamiento inicial 32
6.2.4. Corte IMV 32
6.2.5. Control ruido acústico 32
6.2.6. Lavado (Flushing) 32
6.2.7. Medidas puntos de funcionamiento 32
6.2.8. Control ruido hidráulico 33
6.2.9. Vaciado 34

7. ESTUDIO DE MEJORA 35

7.1. Vías de estudio 36
7.2. Análisis exploratorio 37
7.3. Estudio R&r de los bancos 42
7.4. Normalización de los datos 45
7.5. Identificación de la distribución 50
7.6. Determinación de la distribución 53
7.7. Análisis viabilidad 56
7.7.1. Máxima potencia 57
7.7.2. Máximo par 61
7.7.3. Ralentí 65
7.7.4. Arranque 69

8. PUESTA EN MARCHA 73

9. ANÁLISIS ECONÓMICO 75

9.1. Presupuesto 75
9.2. Viabilidad económica 76

10. ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL 80

10.1. Aceite 80
10.2. Energía consumida 81
10.3. Emisiones derivadas del transporte 81

CONCLUSIONES 82

AGRADECIMIENTOS **83**

BIBLIOGRAFÍA **84**

Referencias bibliográficas 84

Bibliografía complementaria 84

1. Glosario

- *Common rail*: Acumulador de combustible a alta presión que sirve de alimentador a los inyectores. También da nombre a los sistemas de inyección que usan este alimentador
- *ECU*: Unidad de control electrónico (*Electronic Control Unit* en inglés). Sistema de control que gobierna el sistema de inyección.
- *IMV*: Válvula dosificadora de entrada (*Inlet Metering Valve* en inglés). Válvula de entrada controlada por una bobina proporcional
- *Housing*: Carcasa de la bomba que envuelve la mayoría de los componentes móviles. También llamado *cuerpo*.
- *Plunger*: Émbolo en inglés. Nombre común que se le da a cada uno de los pistones que generan la alta presión.
- *P-valor:* Valor utilizado en contrastes de hipótesis para aceptar o rechazar la hipótesis nula
- *EIA:* Estudio de Impacto Ambiental
- *DDS:* Delphi Diesel Systems

2. Prefacio

El presente proyecto se realiza en una empresa del sector automovilístico llamado Delphi y más concretamente en la planta que tiene ubicada en Sant Cugat del Vallés. Delphi es una multinacional estadounidense dedicada principalmente a la fabricación de componentes de automóvil. Para dar una idea aproximada del tamaño de la empresa basta decir que las ventas en el año 2009 fueron de 11000 millones de dólares (US$) lo que corresponde al decimoquinto (15º) puesto en el ranking de los principales proveedores de productos de automoción. Delphi Diesel Sant Cugat pertenece a la división Powertrain Systems que se dedica a la fabricación de sistemas para el tren de potencia de automóviles. En esta división principalmente se fabrican sistemas de inyección tanto para motores de gasolina como para motores diésel. Concretamente, la planta de Sant Cugat solo se dedica a la fabricación de bombas de combustible para motores diésel.

2.1. Origen del proyecto

En el final de la línea de producción de las bombas existen unos bancos de test donde se ensayan todas las bombas fabricadas con el objetivo de controlar el correcto comportamiento de éstas antes de ser enviadas al cliente. Es decir, un Test Final de Línea (o también conocido como EOLT por sus siglas en inglés). Este proceso, conocido internamente como Test Funcional (de ahora en adelante se denominará de esta forma), es relativamente lento (aprox. 5 minutos por bomba). En la empresa, y más concretamente en el departamento de Ingeniería de Fabricación que es el encargado de supervisar los procesos de fabricación, se revisan constantemente los planes de test (Test Plan de ahora en adelante) a los cuales se somete la bomba con el objetivo de reducir el tiempo invertido. Con esto se incide directamente en la capacidad de producción de la planta.

2.2. Motivación

El programa de prácticas de Delphi Diesel Sant Cugat en el cual ha participado el autor es la principal motivación del presente proyecto.

En dicho programa se prioriza la necesidad del estudiante de realizar un proyecto para lo cual se le plantean los diferentes puntos mejorables en la empresa ya conocidos y se le facilitan los recursos disponibles para la realización del proyecto

2.3. Requerimientos previos

Para poder realizar el presente proyecto ha sido necesario una inmersión en el entorno de trabajo de Delphi Diesel Sant Cugat con el objetivo de conocer la metodología, los procesos, el vocabulario, el equipo y, cómo no, los colaboradores que han hecho posible este trabajo.

3. Introducción

3.1. Objetivos del proyecto

El objetivo del proyecto se centra en la reducción del tiempo de ensayo de las bombas en los bancos del Test Funcional. Para ello se propone reducir la cantidad de bombas ensayadas en alguno de los 4 puntos principales del Test Funcional. Éstos son:

1. Máxima potencia
2. Máximo par
3. Ralentí
4. Arranque

En estos puntos se hace trabajar a la bomba de manera similar (a la misma velocidad y presión) a la que lo haría montada en un motor de automóvil en dichos puntos característicos del funcionamiento de un motor de explosión interna.

Además, en cada punto de ensayo se realizan diferentes mediciones:

- Caudal Rail
- Caudal Sobrante
- Presión Venturi
- Par Motor

Con lo que el presente proyecto tiene como objetivo evaluar la viabilidad de dejar de realizar dichas mediciones o incluso eliminar todas las mediciones de uno o más puntos de ensayo en un porcentaje de bombas que también se determinará a lo largo del proyecto

3.2. Alcance del proyecto

El proyecto centra el estudio en la zona de Test Funcional, ya que es donde la empresa quiere actuar con el objetivo de reducir el tiempo de ciclo.

Sin embargo, debido a la naturaleza del proceso no se descarta una eventual actuación en alguna otra área de la fábrica. Es decir, al tratarse de un Test de Final de Línea, este se ve especialmente afectado por las operaciones realizadas anteriormente a la bomba.

3.3. Relación con otros trabajos

Como ya se ha comentado, el Test funcional es un proceso crítico debido a su tiempo de ciclo. Por ello, desde el primer Test Plan creado para un determinado modelo de bomba, ha habido numerosos estudios con el objetivo de ir reduciendo dicho tiempo de ciclo.

Es por eso que este proyecto tiene una relación directa con dichos trabajos. Sin embargo, lo que marca la diferencia de este trabajo respecto a los anteriores estudios es tanto la ambición como la metodología utilizada. Dicho en otras palabras, los anteriores estudios eran pequeñas modificaciones basadas en la experiencia e implantados a base de prueba y error. Es por esa razón que no existe más documentación que los diferentes Test Plan que han existido a lo largo del tiempo.

4. Descripción del producto

4.1. Definición y clasificación

Como ya se ha comentado anteriormente, el producto fabricado en la planta de Delphi Diesel Systems en Sant Cugat son bombas de inyección de combustible para vehículos diesel.

Las bombas de inyección de combustible tienen la función de proporcionar un caudal de combustible a muy alta presión (2000 bar aprox.) al acumulador de alta presión o *common rail* según lo requieran las condiciones de funcionamiento del motor en cada instante.

La clasificación de estas bombas según su principio de funcionamiento es de tipo volumétrico, con lo que el caudal instantáneo es variable a lo largo del tiempo. Este tipo de bombas se caracterizan por proporcionar bajos caudales a alta presión, justo las características requeridas en un sistema de inyección de combustible. Dentro de la clasificación de las bombas volumétricas, las bombas fabricadas en Delphi son del tipo de émbolo alternativo y más concretamente de tipo rotativo. En resumen, las bombas fabricadas son bombas rotativas de pistones. Esto significa que la presión se genera en un cilindro donde un pistón, accionado mediante una excéntrica o una leva moviéndose de forma rotativa, modifica el volumen donde se aloja el combustible. La regulación de la presión de dichas bombas se hace mediante unas válvulas que se abren y cierran alternativamente.

Según el tipo de accionamiento, las bombas de inyección entrarían dentro de la clasificación de motobombas ya que son accionadas desde el cigüeñal del motor del automóvil.

Y según su control, su clasificación sería de tipo electrónico ya que la regulación del caudal se hace mediante la señal de la unidad de control electrónico (o *ECU* por sus siglas en inglés) mediante una válvula de admisión electrónica llamada *IMV*.

4.2. Orígenes

Actualmente en la planta se fabrican diferentes modelos de bombas. Esto es debido a, principalmente, los requerimientos internacionales de emisión de partículas denominados

por la palabra *Euro* y un número que determina el orden en el que han ido apareciendo las diferentes normativas. Actualmente está vigente la normativa *Euro 5* la cual requiere que los vehículos de clase M (vehículos automotores de cuatro ruedas o más, diseñados y construidos para el transporte de pasajeros) con combustible diesel cumplan las siguientes especificaciones respecto a emisiones:

- Monóxido de carbono: 500 mg/km
- Partículas: 5 mg/km (o una reducción del 80% de las emisiones respecto a la norma *Euro 4*)
- Óxidos de nitrógeno (NOx): 180 mg/km (o una reducción del 20% de las emisiones respecto de la norma Euro 4)
- Emisiones combinadas de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno: 230 mg/km

Por tanto, las bombas de inyección, al formar parte del tren de potencia juega un papel crucial en lo que a emisiones se refiere con lo que, con la entrada en vigor de cada nueva normativa, suelen aparecer nuevos modelos (o modificaciones de los modelos anteriores) con el objetivo de cumplirla.

El modelo DFP1.15 nace debido a esta necesidad de cumplir con las normativas europeas de emisión, concretamente la actual *Euro 5.* La DFP1.15 es una modificación de la anterior DFP1.1 la cual no cumplía con dicha normativa. La principal diferencia con respecto a su predecesora es que la DFP1.15 incluye un 5º inyector que no es otra cosa que un conector que va unido al sistema de escape el cual proporciona una pequeña cantidad de combustible a baja presión directamente desde la propia bomba. Esto provoca que las partículas adheridas al sistema de escape vayan consumiéndose por combustión lentamente y sean expulsadas a través del tubo de escape como humos y no como partículas. Esto se debe a que la restricción sobre la emisión de partículas ha sido la que más se ha endurecido respecto a la normativa anterior.

4.3. Funcionamiento y componentes

4.3.1. Funcionamiento

En este apartado se explicará el funcionamiento del modelo DFP1.15 en particular y las características que la diferencian del resto de modelos de bombas.

Con el objetivo de hacerlo más entendedor y visual se explicará el funcionamiento siguiendo el camino que seguiría el combustible por dentro de la bomba. Además, en la siguiente figura (Fig. 4.3.1) se puede observar gráficamente dicho recorrido.

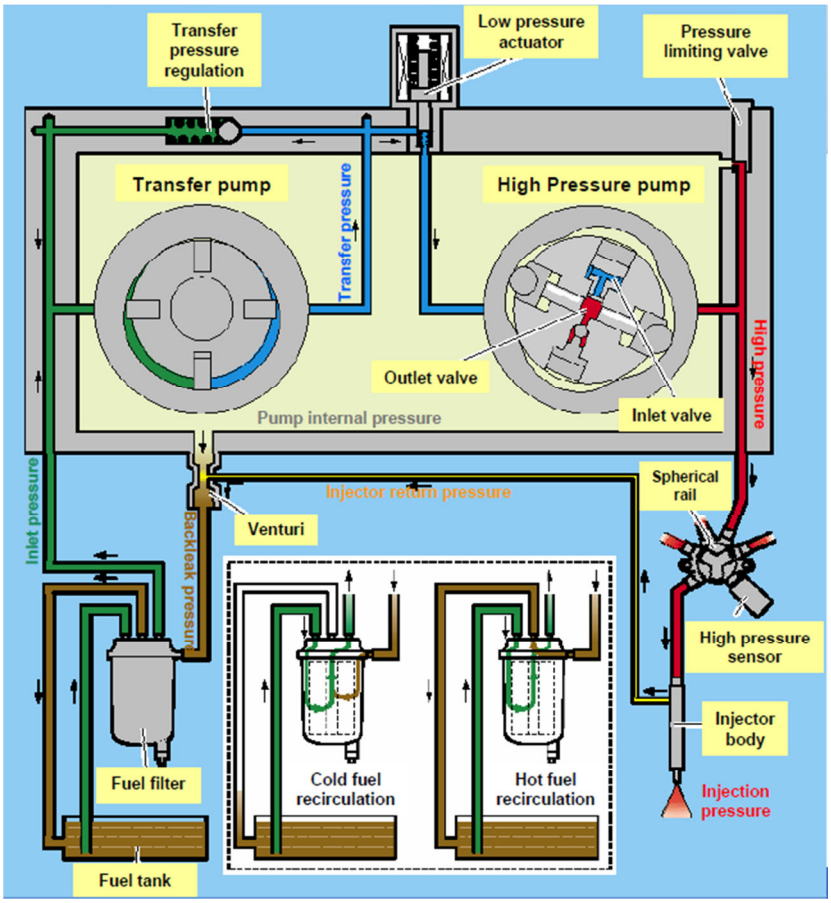

Fig. 4.3.1 Circuito de combustible en un sistema common rail *Fuente: Delphi*

Primero, el combustible es aspirado desde el depósito (pasando por el filtro de combustible) gracias a la acción de la bomba de transferencia, una “sub-bomba” de paletas que genera una presión intermedia de unos 8 bar que alimenta el circuito principal de la bomba.

A la salida de la bomba de transferencia el caudal de combustible se ve dividido en 4 caminos diferentes:

- El primero y más importante se dirige hacia el circuito de la alta presión
- El segundo se dirige hacia el circuito de lubricación
- El tercero se dirige hacia una válvula de recirculación
- El cuarto se dirige hacia el sistema de escape (5º inyector)

El caudal de recirculación no es más que un circuito que une la salida y la entrada de la bomba de transferencia mediante una válvula la cual limita la presión de salida de la bomba de transferencia (abriéndose si la presión de salida supera los 8 bar).

El caudal de lubricación tiene como objetivo ir renovando el combustible que rodea las partes móviles de la bomba (eje, rodillos, rodamientos, la propia bomba de transferencia,…) y que actúa como lubricante y, en cierta medida, como refrigerante. Este caudal, como la mayoría de lubricantes, evita que la bomba se gripe. El caudal de combustible expulsado por el combustible nuevo se dirige a un circuito de sobrante. Este caudal sobrante pasa por un estrechamiento del conducto creando una depresión con el objetivo de aspirar el combustible sobrante de los inyectores mediante efecto Venturi.

El caudal del 5º inyector, como ya se ha explicado se dirige hacia el sistema de escape para suministrar el caudal necesario para quemar las partículas acumuladas.

Finalmente el caudal de alta presión se dirige hacia la IMV, una válvula de aguja regulada mediante una bobina proporcional la cual es controlada desde la ECU. La IMV tiene por función regular, en función del punto de funcionamiento del motor, el volumen de combustible que entra hacia los cilindros donde se generará la presión. Una vez dosificado el volumen adecuado, el combustible pasa a través de una válvula anti retorno para llegar finalmente a los cilindros. Allí es donde los pistones generarán la presión necesaria para abrir la válvula de escape hacia el common rail. Los pistones son movidos por una leva mecanizada en el eje principal de la bomba (el cual también acciona la bomba de transferencia) mediante un rodillo y una zapata. Este conjunto de rodillo y zapata es necesario para asegurar que la fuerza aplicada sobre el pistón es exclusivamente axial ya que, debido al finísimo juego existente entre pistón y cilindro (para minimizar las pérdidas), una fuerza radial podría bloquear el pistón.

4.3.2. Control y seguridad

4.3.2.1. Control

La responsabilidad del control de la bomba de inyección recae sobre la ECU ya que es el componente que gobierna todo el sistema de inyección. Para ello utiliza la IMV que, de hecho, es el único actuador que gobierna el funcionamiento de la bomba.

Claro está, cabe tener en cuenta que es el propio motor del coche el que mueve el eje principal de la bomba. Sin embargo, como es lógico, no se puede modificar la velocidad de giro del motor para regular el suministro de combustible. Así pues, sólo queda la IMV que como ya se ha dicho, regula el flujo de combustible hacia los inyectores.

Las órdenes dadas por la ECU hacia la IMV dependen de diversos sensores distribuidos por todo el sistema. Con algunas variantes dependiendo del vehículo, estos son:

- Sensor de temperatura del aire
- Sensor de temperatura del refrigerante
- Caudal de masa de aire de admisión
- Acelerómetro
- Sensor régimen motor
- Sensor de fase del cigüeñal
- Sensor de posición del acelerador
- Sensor de presión de sobrealimentación (si corresponde)

A estos sensores se les ha de añadir 2 más correspondientes al propio sistema de inyección. Estos son:

- Sensor de temperatura del combustible (medido en la bomba de inyección)
- Sensor de presión del combustible (medido en el common rail)

Así pues, con todos estos sensores, la ECU decide qué posición de la IMV es la óptima para cada momento.

4.3.2.2. Seguridad

Como todo aparato cuyo objetivo es elevar la presión de un fluido, en la bomba de inyección existe una válvula limitadora de presión que libera el combustible del circuito de alta presión de forma controlada hacia el circuito de combustible sobrante donde acabará llegando de nuevo al depósito del vehículo.

Esta válvula es especialmente crítica teniendo en cuenta las altas presiones a las que trabajan este tipo de bombas (1600 – 2000 bar) y el fluido que bombean. Parece bastante

evidente que un colapso de la bomba o una fuga descontrolada de gasóleo a alta presión resulta tremendamente peligroso.

4.3.3. Componentes

A continuación se puede ver una vista general de una bomba modelo DFP1.15 (Fig. 4.3.2):

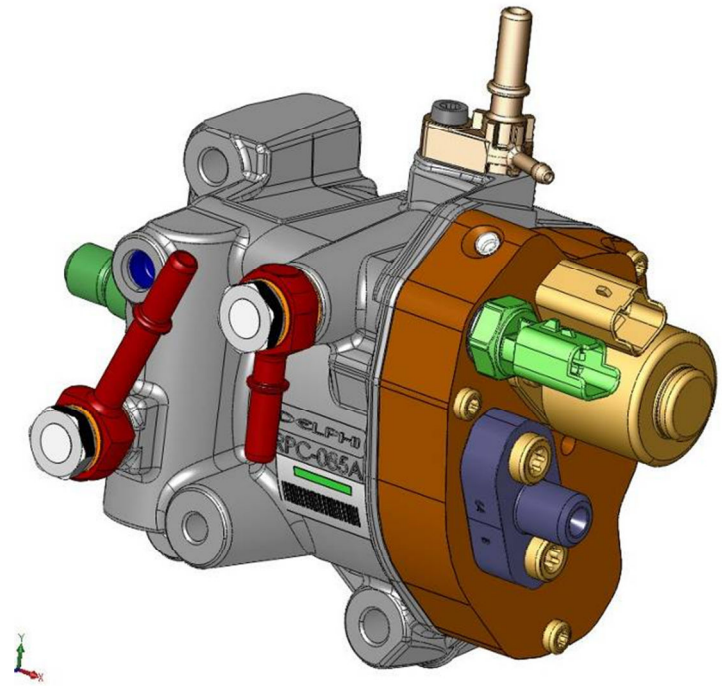

Fig. 4.3.2 Vista general de una bomba DFP1.15 *Fuente: DDS*

Las bombas fabricadas en Delphi siempre tienen, como mínimo, 2 partes diferenciadas. Éstas se denominan *cabezal hidráulico* y *housing o cuerpo*. El cabezal hidráulico es el submontaje donde se genera la alta presión mientras que el housing es la carcasa que envuelve la mayoría de las partes móviles (que no formen parte del cabezal hidráulico claro está). Además, dependiendo del modelo, pueden existir otras partes claramente diferenciadas. En la siguiente figura (Fig. 4.3.3) se puede apreciar algunas de estas partes identificadas:

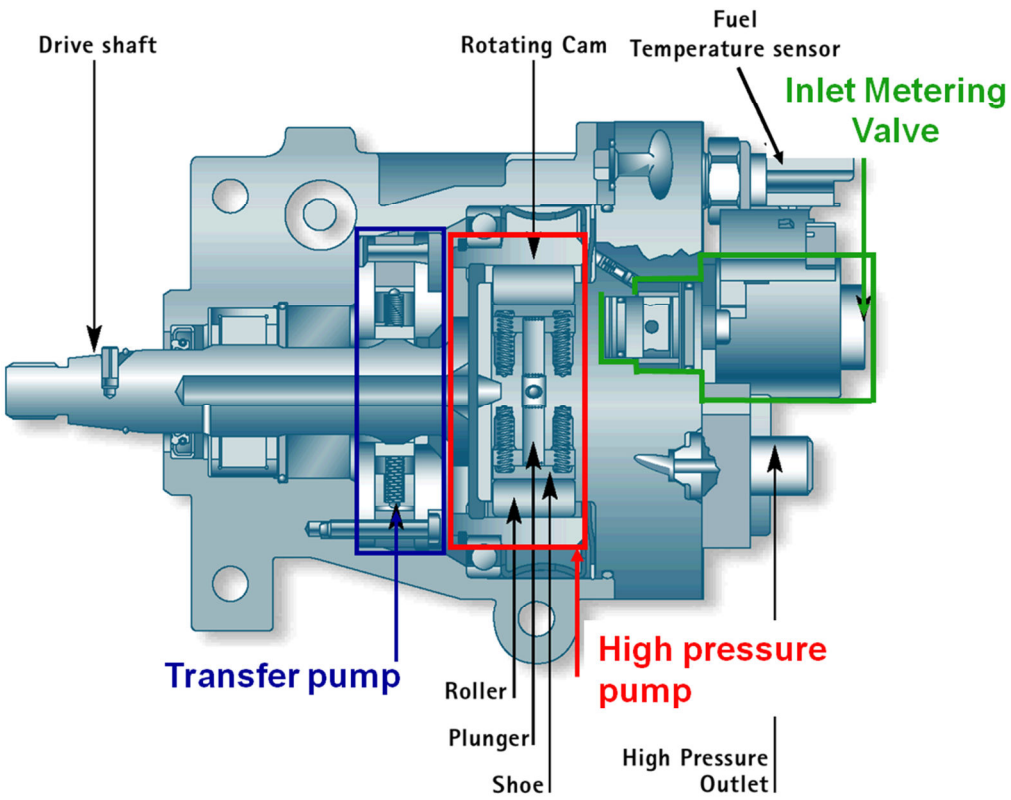

Fig. 4.3.3 Sección de una bomba DFP1.15 *Fuente: DDS*

En el caso de la DFP1.15 además del cabezal hidráulico y del housing cabe destacar la existencia de la bomba de transferencia (a pesar de que se aloje dentro del housing) como un subconjunto a tratar separadamente. Así pues, la enumeración y descripción de los componentes se clasificará en los 3 submontajes principales que se han descrito.

Seguidamente se adjunta una figura y una tabla (Fig. 4.3.4 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) donde se identifican los componentes de la bomba:

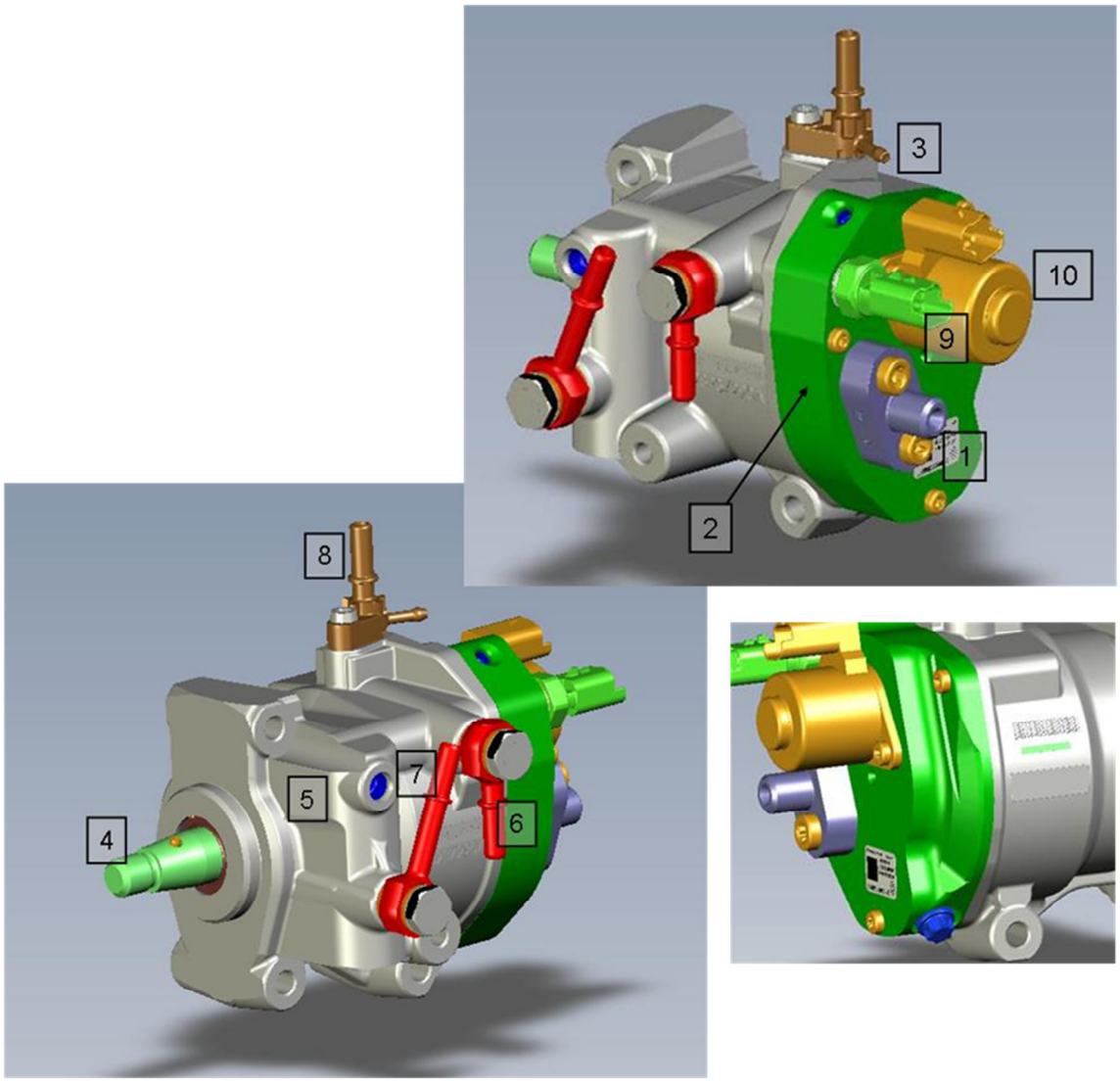

Fig. 4.3.4 Enumeración de los componentes de una bomba DFP1.15 *Fuente: DDS*

1	*Válvula/Salida de alta presión*
2	*Cabezal hidráulico*
3	*Conector Venturi*
4	*Eje motor*
5	*Housing*
6	*5º inyector*

7	*Conector de entrada*
8	*Conector caudal sobrante*
9	*Sensor de temperatura*
10	*IMV*
11	*Válvula limitadora*

Tabla 4.3.1 Leyenda de los componentes

- Cabezal hidráulico:
  - *Émbolos o plungers*: en la DFP1.15 hay 2 diametralmente opuestos
  - *Rodillos*: en contacto con la leva del eje transmite el movimiento axial a la zapata
  - *Zapata*: en contacto con los rodillos asegura un contacto perpendicular a los émbolos
  - *Válvula de entrada*: evita que al generar la presión (émbolos próximos entre sí) el combustible retorne hacia la IMV
  - *Válvula de salida*: evita que cuando no hay alta presión entre los émbolos (separados entre sí) entre combustible proveniente del common rail. También regula la presión mínima a la que saldrá el combustible de la bomba
  - *IMV*: regula la cantidad de combustible que pasa hacia los émbolos
  - *Sonda de temperatura*: sensor que mide la temperatura a la entrada de los émbolos
  - *Válvula limitadora*: libera el combustible hacia el caudal sobrante en caso de sobrepresión
- Housing:
  - *Venturi + Conector caudal sobrante*: unión al circuito de retorno y venturi para aspirar el combustible de los inyectores
  - *Conector entrada*: unión al circuito procedente del tanque de combustible
  - *5º inyector:* salida de combustible hacia el escape para quemar partículas acumuladas
  - *Eje motor:* unido a la distribución acciona la bomba mediante una leva que mueve los pistones
  - *Bomba de transferencia:* aspira el combustible procedente del tanque y eleva la presión a 8 bar aproximadamente
  - *Retén:* asegura la estanqueidad de la bomba en la zona del eje
- *Bomba de transferencia:*
  - *Palas:* empujan el combustible a través de la leva
  - *Estator (leva):* gracias a su forma aumenta la presión del combustible
  - *Rotor:* accionado por el eje mueve las palas
  - *Placa de distribución:* boca de entrada – salida de combustible
  - *Placa de cierre:* tapa en el extremo contrario a la placa de distribución

En la siguiente figura (Fig. 4.3.5) se puede observar las diferentes partes de la bomba de transferencia:

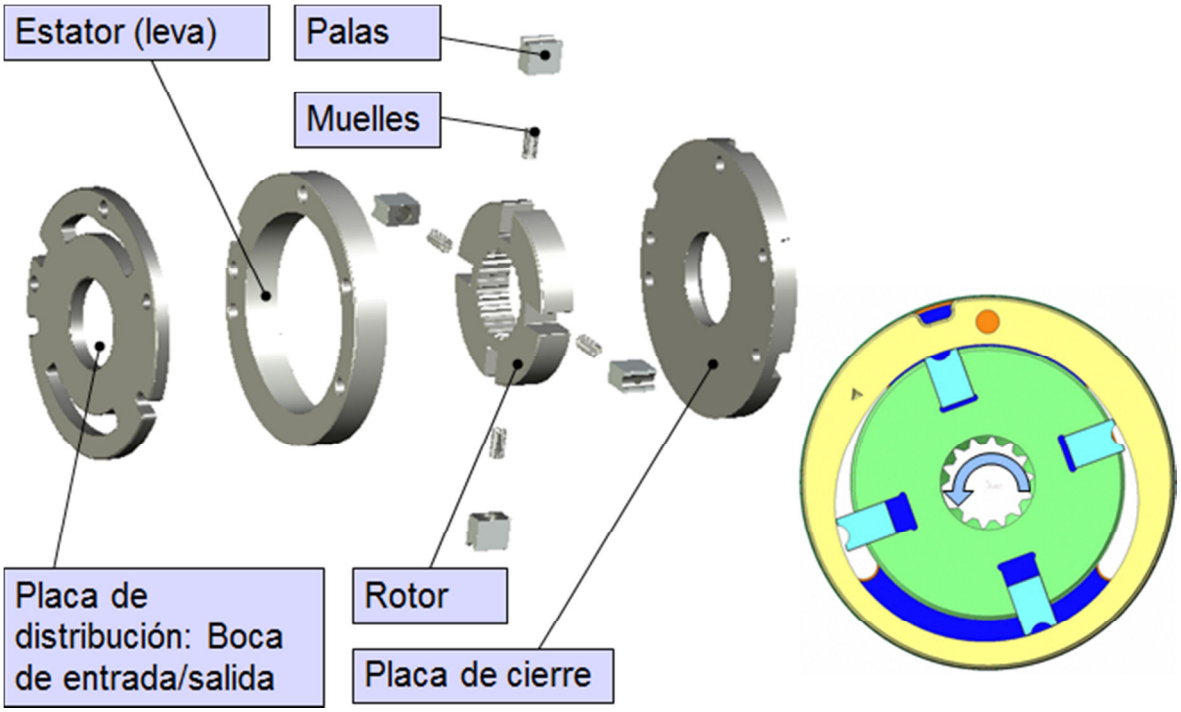

Fig. 4.3.5 Componentes de la bomba de transferencia *Fuente: Delphi*

5. Proceso de fabricación

El proceso de fabricación de la bomba DFP1.15 consta de 4 partes claramente diferenciadas:

- Mecanizado blando
- Tratamiento térmico
- Mecanizado duro
- Montaje

Evidentemente no todos los componentes siguen las 4 partes ya que, por ejemplo, hay componentes que directamente vienen de proveedor listos para el montaje.

Sin embargo, la organización del proceso de fabricación en la planta se lleva a cabo por componentes. En la siguiente figura (Fig. 5.1) se puede observar cuales son estas secciones:

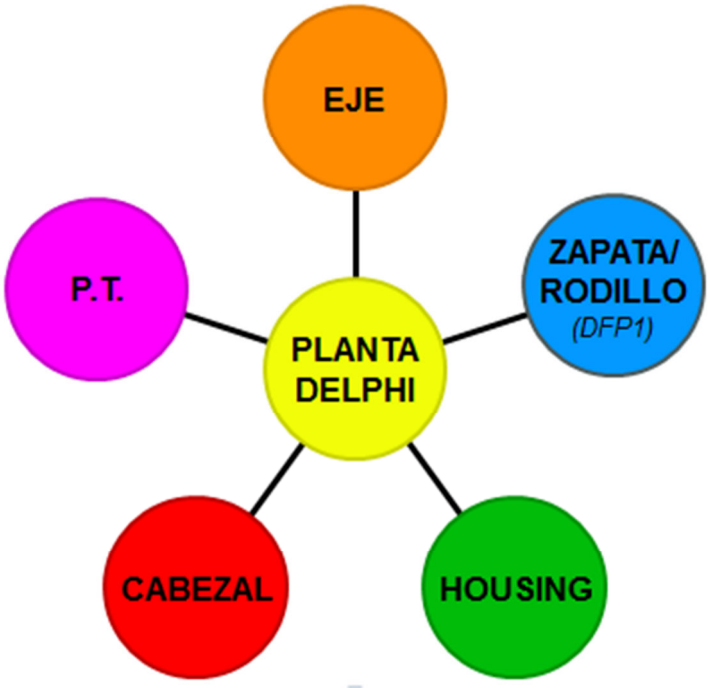

Fig. 5.1 Secciones de fabricación *Fuente: Delphi*

A continuación se describe el proceso de fabricación para cada uno de estos componentes:

5.1. Eje

La Fig. 5.1.1 y Fig. 5.1.2 muestran la forma del eje y su diagrama de flujo del proceso de fabricación donde se puede seguir de un solo vistazo que pasos sigue el eje dentro de la planta.

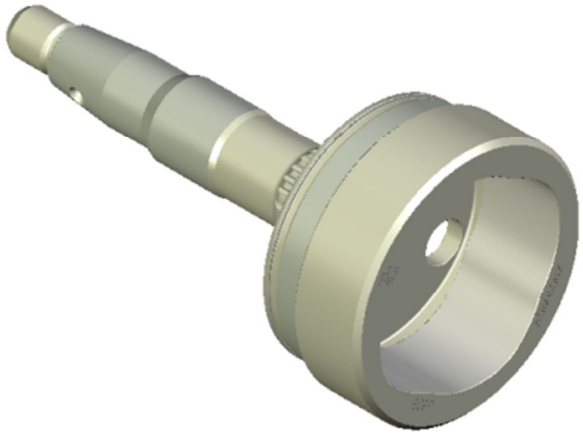

Fig. 5.1.1 Modelo 3D del eje de DFP1.15 *Fuente: Delphi*

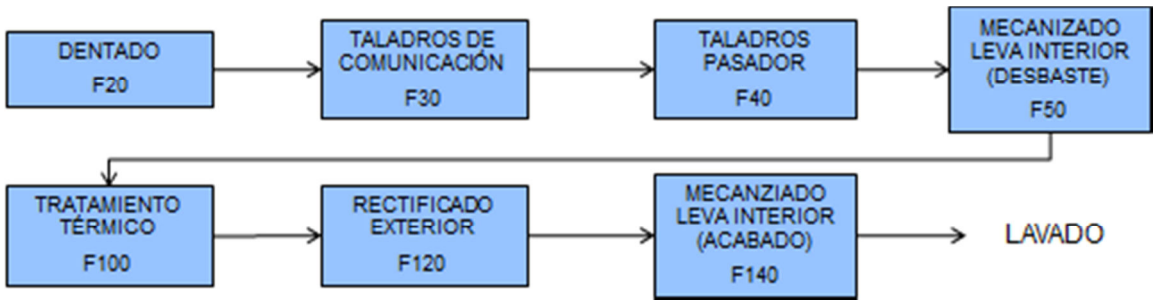

Fig. 5.1.2 Diagrama de flujo del eje *Fuente: Delphi*

- Dentado: este dentado se realiza para accionar la bomba de transferencia
- Taladros de comunicación: a través de estos agujeros el combustible circula a través de la bomba para refrigerarla y lubricarla
- Talados pasador: en este taladro va ubicado un pasador para garantizar una correcta sincronización con el resto del árbol del transmisión del motor
- Mecanizado leva interior (desbaste): aquí se desbasta la leva que accionará los pistones

- Tratamiento térmico: consistente en cementación, temple y revenido endurece el eje para que soporte las tensiones a las que se ve sometido
- Rectificado exterior: evita fugas y asegura un correcto clavado de rodamientos
- Mecanizado leva interior (acabado): rectifica las irregularidades creadas en el tratamiento térmico.
- Lavado: necesario para asegurar el correcto funcionamiento (evitar partículas y desgaste)

5.2. Zapata/rodillo

El proceso de fabricación del rodillo dentro de la planta de Sant Cugat solamente consiste en un rebarbado para mejorar el deslizamiento en la zapata ya que viene desde proveedor prácticamente finalizado. En la Fig. 5.2.1 se puede ver un modelo de rodillo y uno de zapata:

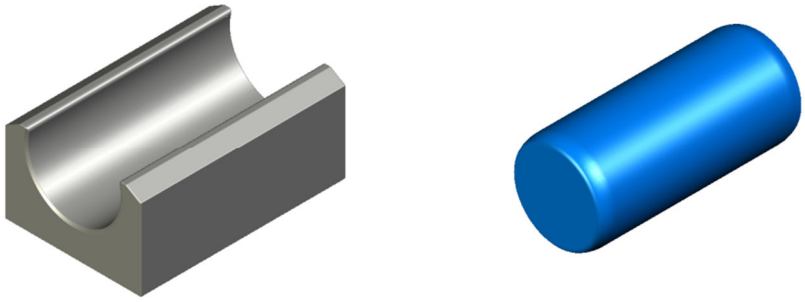

Fig. 5.2.1 Modelo 3D de zapata y rodillo de DFP1.15 *Fuente: Delphi*

A continuación (Fig. 5.2.2) se muestra el diagrama de flujo de la zapata:

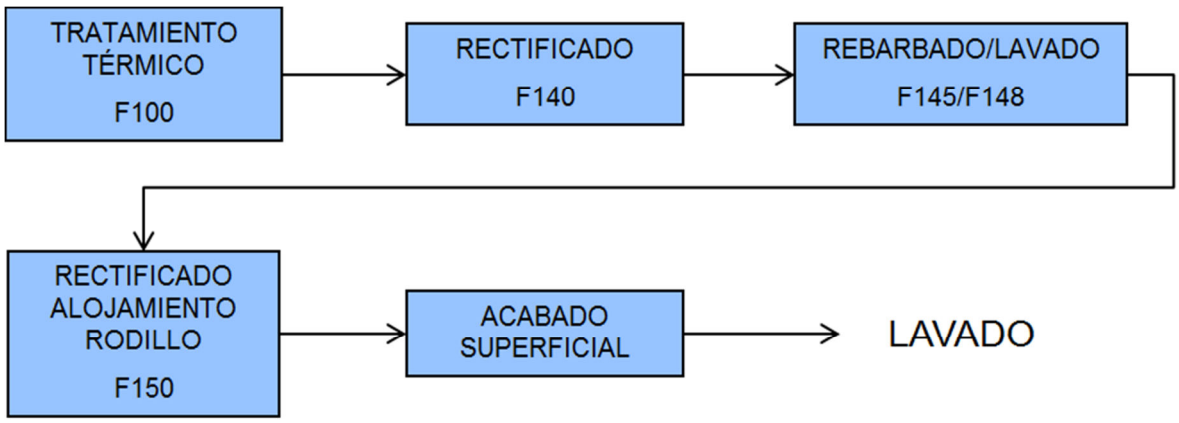

Fig. 5.2.2 Diagrama de flujo de las zapatas *Fuente: Delphi*

- Tratamiento térmico: Se endurece para poder resistir las altas solicitaciones
- Rectificado: se rectifican las caras para mejorar el deslizamiento y evitar agarrotamiento en su alojamiento
- Rebarbado/lavado: se busca eliminar aristas vivas que desgastarían prematuramente el conjunto
- Rectificado alojamiento rodillo: de nuevo el objetivo es mejorar el deslizamiento y evitar desgaste prematuro
- Acabado superficial: se recubre la superficie para evitar desprendimientos
- Lavado: necesario para asegurar el correcto funcionamiento (evitar partículas y desgaste)

5.3. Housing

En la Fig. 5.3.1 se puede ver el modelo 3D de un housing y en la Fig. 5.3.2 su diagrama de flujo

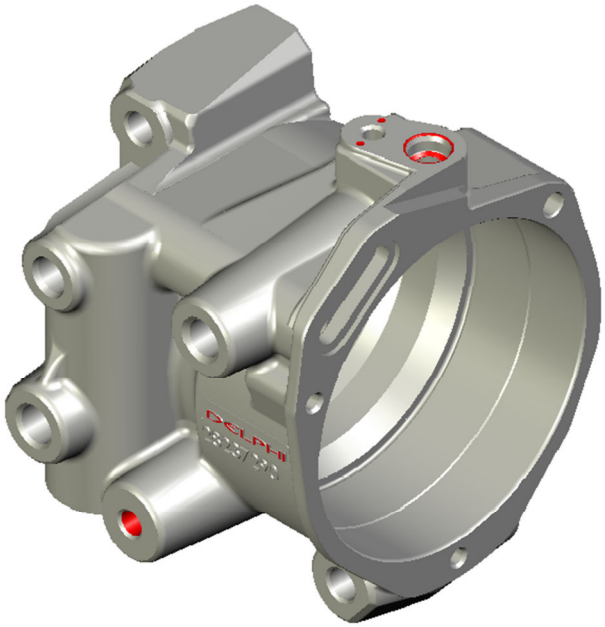

Fig. 5.3.1 Modelo 3D del Housing de DFP1.15 *Fuente: Delphi*

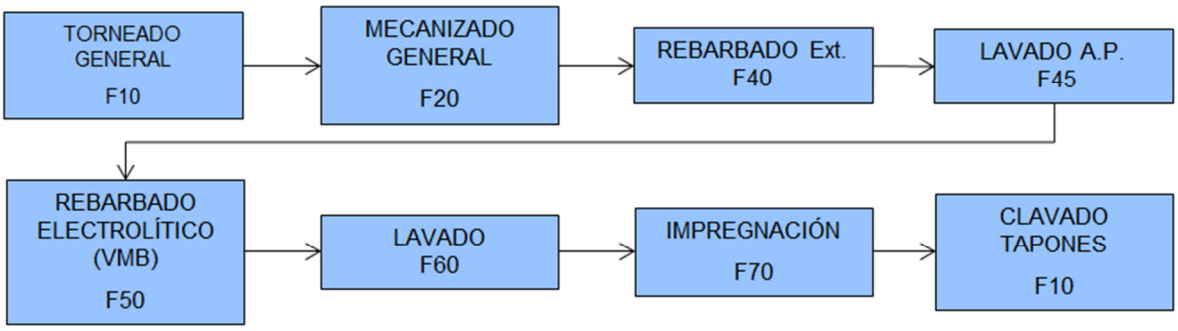

Fig. 5.3.2 Diagrama de flujo del Housing *Fuente: Delphi*

- Torneado general: se mecaniza todo el interior del cuerpo
- Mecanizado general: en 7 módulos se mecanizan el resto de partes, principalmente taladros y algún coliso
- Rebarbado exterior: elimina rebabas y aristas vivas de la superficie vista del cuerpo
- Lavado alta presión : necesario para la siguiente fase
- Rebarbado electrolítico: mediante electroerosión se eliminan rebabas y aristas vivas del interior de los agujeros
- Lavado: necesario para la siguiente fase
- Impregnación: evita fugas debidos a posibles poros existentes en el cuerpo
- Clavado tapones: tapona agujeros no funcionales pero inevitables para realizar otros mecanizados
- Lavado: necesario para asegurar el correcto funcionamiento (evitar partículas y desgaste)

5.4. Cabezal hidráulico

De nuevo, a continuación se muestra tanto el modelo 3D del cabezal hidráulico como su diagrama de flujo en las Fig. 5.4.1 y Fig. 5.4.2

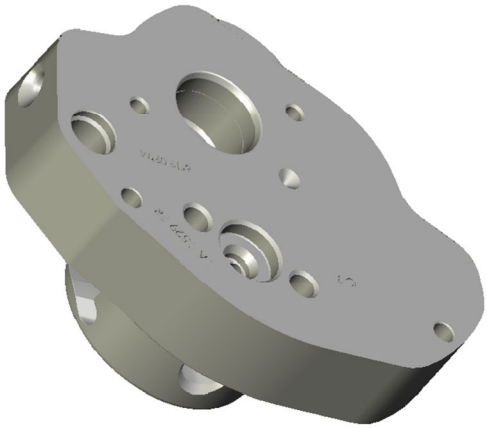

Fig. 5.4.1 Modelo 3D del cabezal hidráulico de DFP1.15 *Fuente: Delphi*

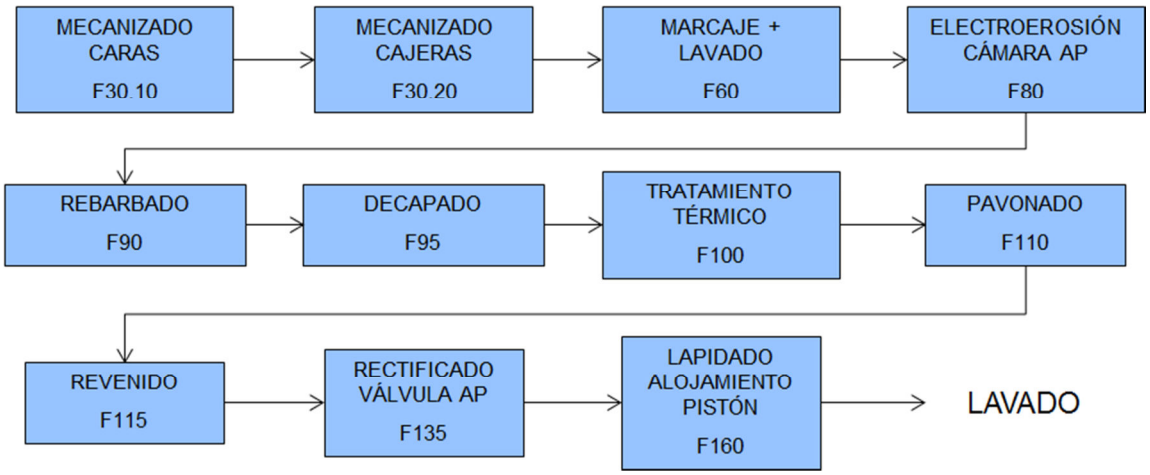

Fig. 5.4.2 Diagrama de flujo del cabezal hidráulico *Fuente: Delphi*

- Mecanizado caras[1]: mediante 7 módulos diferentes, se mecanizan todos los taladros y roscas de la cara superior así como el alojamiento de las zapatas y el taladro de la limitadora de presión
- Mecanizado cajeras[2]: se mecanizan los taladros de las válvulas, la comunicación de combustible de la bomba de transferencia y se hace el acabado del conjunto rodillo/zapata. De nuevo, estas operaciones se realizan en 7 módulos.
- Marcaje y lavado: se identifica la pieza para poder trazarla y se lava para la siguiente fase
- Electroerosión cámara alta presión[3]: se mejora el acabado de la zona donde se genera la presión del common rail
- Rebarbado: mediante una explosión se eliminan virutas y aristas vivas
- Decapado: se elimina la capa de óxido generada en la fase anterior
- Tratamiento térmico: consistente en cementación y temple se endurece la pieza para que soporte las tensiones necesarias
- Pavonado: se trata superficialmente para evitar ligeramente el óxido
- Revenido: se elimina la fragilidad del temple
- Rectificado válvula alta presión: debido al tratamiento térmico y el pavonado es necesario rectificar para asegurar un buen asentamiento
- Lapidado alojamiento pistón: a causa del mínimo juego entre pistón y alojamiento es necesario este paso para evitar gripaje
- Lavado: necesario para asegurar el correcto funcionamiento (evitar partículas y desgaste)

5.5. Bomba de transferencia

El proceso de fabricación de la bomba de transferencia se encuentra en el Anexo A debido a la poca transcendencia que tiene este subconjunto en el presente proyecto y a la gran cantidad de espacio que ocuparía al estar compuesto por varias piezas.

[1] Crítico para las medidas en el test-plan

[2] Crítico para las medidas en el test-plan

[3] Crítico para las medidas en el test-plan

6. Test funcional

En este apartado se describirán brevemente el funcionamiento de los bancos de test así como el programa utilizado para ensayar las bombas.

6.1. Bancos de test

Los bancos para ensayar las bombas son una compleja combinación entre mecánica, hidráulica y electrónica. Las bombas llegan al banco en un utillaje especifico donde ya hay algunos tapones para proteger ciertas partes de la bomba así como evitar fugas durante el test.

Una vez dentro del banco, por la parte inferior del utillaje, un motor eléctrico síncrono de 11kW se acopla mediante una junta Oldham (para permitir desalineaciones). Dicho motor es el que acciona el eje de la bomba a una velocidad establecida por el programa. Puede sorprender la alta potencia del motor pero se hace necesario debido a los rápidos y frecuentes cambios de velocidad que hay a lo largo del test.

Por la parte superior desciende otro utillaje con numerosas conexiones eléctricas e hidráulicas. Este utillaje o máscara une todas las salidas y entradas de la bomba con los circuitos del banco. Debido a todas estas uniones y a la gran cantidad de partes móviles, este utillaje es la parte más crítica y problemática de los bancos. Además, si la bomba no está bien situada o alguna parte móvil de la máscara no ha vuelto a su lugar al acabar el test anterior, al descender puede dañar alguna parte de la bomba, especialmente aquellas que están hechas en plástico.

Una vez conectada la bomba al motor y a la máscara se ejecuta el programa de test y se monitorizan todas las variables de interés como son presiones, caudales y temperaturas entre otras. Mientras dura el test, dentro de la bomba circula un aceite de características muy similares al gasóleo utilizado en los vehículos para conseguir unos resultados lo más fiables posibles. A este aceite, además, se le añade un pigmento que brilla bajo luz ultravioleta para poder detectar fácilmente si ha habido alguna fuga durante el test

A continuación se describirán las variables (y sus respectivos sensores) que toman parte en las medidas utilizadas en este proyecto ya que pormenorizar todas ellas sería excesivamente largo:

- Caudal: se mide mediante una pequeña turbina con lo que se obtiene un caudal volumétrico. Los datos se muestran en l/h
- Presión: se mide con sensores propios de Delphi idénticos al sistema de inyección de un vehículo. Los datos se muestran en mbar[1]
- Par: al ser un motor síncrono se mide a partir del consumo del motor. Los datos se muestran en N·m

6.2. Test Plan

El test plan es el programa que sigue el banco de test para ensayar las bombas. La duración de este programa es de 4 minutos aunque se puede alargar ya que a lo largo del programa hay algunos bucles que se repiten en caso de no cumplirse cierta condición. En este apartado se describirá dicho programa de forma breve ya que detallar todos los pasos sería excesivamente largo. Sin embargo, aquellas partes que sean de especial importancia para el desarrollo del proyecto sí que se describirán más exhaustivamente. Además, en el Anexo B se puede consultar el documento que recoge todas las líneas de comando del test-plan.

Para hacer más fácil la comprensión del programa se describirá por bloques.

6.2.1. Definición de variables

Nada más empezar el programa define algunas variables que interrumpirían en el acto la ejecución del test-plan. Esto se hace para evitar dañar bombas y/o bancos. Por poner un ejemplo se limita el para resistente de la bomba a 20 N·m.

6.2.2. Llenado

Como su nombre indica, en este bloque se conecta la bomba al banco, se la hace girar lentamente y se llena de aceite hasta que el caudal principal (caudal rail de ahora en

[1] En el caso de la depresión en el Venturi

adelante) y el caudal sobrante alcanzan un valor preestablecido. En este bloque hay uno de los bucles mencionados anteriormente ya que, en caso de no alcanzar dichos valores, se sigue haciendo girar la bomba a la vez que continúa el suministro de aceite

6.2.3. Prueba funcionamiento inicial

Aquí se controla que todas las conexiones con la máscara estén en correcto estado para poder tomar adecuadamente las medidas.

6.2.4. Corte IMV

En este bloque se comprueba que la IMV cierra correctamente. Para ello se toman diferentes medidas del caudal rail con diferentes consignas aplicadas a la IMV. Esta prueba es esencial ya que en caso de no cortar adecuadamente el caudal de combustible, el vehículo podría embalarse en bajadas.

6.2.5. Control ruido acústico

Para controlar el ruido que emite la bomba se la hace girar a 1000rpm con la IMV cerrada y con la válvula del rail abierta. Las medidas se realizan con un micrófono ubicado en el interior del banco

6.2.6. Lavado (Flushing)

El lavado del test consiste en abrir y cerrar varias veces la IMV con la velocidad de giro del eje de la bomba constante con el objetivo de hacer fluctuar el caudal y la presión del aceite en el interior de la bomba para que éste arrastre cualquier partícula que pudiese haber en el circuito hidráulico de la bomba

6.2.7. Medidas puntos de funcionamiento

Este bloque es el punto clave de este proyecto ya que en esta parte el banco acciona la bomba de forma similar al funcionamiento en un coche en 4 puntos básicos: máxima potencia, máximo par, ralentí y arranque. Para cada uno de estos puntos el motor hace girar la bomba a una velocidad determinada y fija la presión del rail a un valor concreto. Una vez ha establecido estos parámetros hay un tiempo de estabilización ya que hay un periodo transitorio en las variables medidas.

Todas las medidas realizadas en este bloque se almacenan con un código de la forma XYY donde X determina el tipo de medida e YY determina el punto de funcionamiento que se está ensayando. Así pues las medidas son:

- Máxima potencia:
  - 015 – Caudal Rail
  - 115 – Caudal Sobrante
  - 215 – Presión Venturi
  - 915 – Par motor
- Máximo par:
  - 016 – Caudal Rail
  - 116 – Caudal Sobrante
  - 216 – Presión Venturi
  - 916– Par motor
- Ralentí:
  - 017 – Caudal Rail
  - 117 – Caudal Sobrante
  - 217 – Presión Venturi
  - 917– Par motor
- Arranque[1]:
  - 018 – Caudal Rail
  - 118 – Caudal Sobrante
  - 918 – Par motor

6.2.8. Control ruido hidráulico

Finalmente se controla la fluctuación de presión entregada para verificar que la bomba de transferencia funciona adecuadamente ya que si faltase alguna paleta o algún muelle se vería reflejado en un descenso anormal de la presión de forma periódica.

[1] En la parte de arranque no se realiza medida de presión Venturi ya que el caudal sobrante es tan reducido que no genera depresión.

6.2.9. Vaciado

Evidentemente, para no tener bombas perdiendo aceite por todas partes a lo largo de la línea de producción estas se vacían de forma similar al proceso de llenado. Es decir, se hace girar lentamente la bomba mientras se inyecta aire a la vez que se redirige todo el aceite que sale de la bomba al depósito de aceite de los bancos.

7. Estudio de mejora

Como ya se ha comentado anteriormente, el objetivo del presente proyecto es reducir el tiempo del Test Plan para así tener mayor capacidad de producción. En este apartado se describen las diferentes propuestas para cumplir con el objetivo así como la metodología utilizada para llegar a los resultados.

Uno de los requerimientos iniciales del estudio es que solamente se puede actuar sobre los puntos del Test Plan en el que se simula el comportamiento real. Es decir, no se estudiará la mejora de las pruebas iniciales de las conexiones, ni del test IMV, etc.

Esta limitación surge a raíz de la observación a lo largo del tiempo de los responsables del test donde se veía que diversas medidas estaban relacionadas entre sí y que algunas de las medidas jamás resultaban erróneas y por lo tanto opinaban que se podía reducir el porcentaje de las bombas en esa medición.

A partir de estas observaciones se extrajeron los datos registrados de todas las mediciones en los puntos ya indicados desde enero del 2011. Se escogió esta fecha de inicio ya que el modelo analizado se lleva fabricando desde septiembre del 2010 con lo que se ha optado por dar un margen de 3 meses para evitar contaminar los datos con los errores típicos de lanzamiento de un nuevo producto. Además, desde enero del 2011 deja un periodo de 6 meses con datos más que suficientes para poder extraer conclusiones adecuadas (aproximadamente 250 000 observaciones).

Precisamente debido a la gran cantidad de datos resulta casi imposible tratarlos directamente debido a la lentitud de un ordenador de oficina para procesar tal cantidad de cálculos. Además, con la mezcla de datos de 6 meses diferentes es altamente probable que exista mezcla de poblaciones por culpa de variaciones temporales. Por estas razones se ha optado estudiar los datos en periodos más reducidos. Concretamente se han dividido los datos en semanas ya que de esta forma solo se acumulan alrededor de 9 000 observaciones lo cual es mucho más manejable y es una cantidad suficiente para poder obtener resultados fiables.

7.1. Vías de estudio

Para conseguir eliminar ciertas medidas del programa del Test Plan habían dos principales vías de estudio: relacionar medidas del mismo tipo (caudal, presión, etc.) entre puntos diferentes de ensayo (máx. potencia, ralentí,…) mediante regresiones lineales y un estudio de capacidad de las medidas mediante gráficos de control. Con la primera vía de estudio se busca predecir el resultado de una medición a partir de las otras mientras que con la segunda vía se pretende demostrar que las tolerancias requeridas son mayores que los limites naturales de los datos y por tanto no es necesario hacer un control 100% de las bombas para asegurar la calidad.

Se comenzó el estudio con la alternativa de las regresiones pero, después de realizar las primeras regresiones, donde se demostró cierta relación ya prevista entre medidas, esta vía de estudio se descartó debido a que bajo esta metodología, al vincular un punto de ensayo con otro se estaba "blindando" el punto de ensayo remanente. Es decir, los puntos que se decidiese que sí que se ensayaban y por tanto los que servirían para predecir los puntos eliminados no se podrían eliminar en un futuro. Este hecho chocaba con los planes de la empresa ya que, en caso de ser posible, se eliminarían todos los puntos de ensayo en cierto porcentaje de las bombas.

Así pues, después de esta aclaración, el estudio se centró en la segunda de las vías expuestas anteriormente. Para decidir qué medidas eran candidatas a ser eliminadas y cuáles no, era necesario encontrar cual era la capacidad de los bancos de test en cada medida. Es decir, una vez determinados los límites naturales de la distribución de los datos disponibles, compararlos con las tolerancias exigidas por el procedimiento. Para realizar esta comparación se usarán gráficos de control ya que permiten, de un solo vistazo, observar dicha relación entre ambos límites.

Sin embargo, en la mayoría de programas estadísticos, incluido el utilizado en este proyecto, se basan en la hipótesis de que los datos siguen una distribución Normal. Con lo cual, para poder obtener unas conclusiones válidas es necesario comprobar dicha hipótesis.

Cabe comentar que, debido al tipo de proceso, el cual realiza la medida bomba a bomba, no son válidos los gráficos de control $\bar{X} - R$ ya que hacen falta subgrupos en las medidas para poder determinar la media aritmética y el rango. Para lecturas individuales existe el gráfico $I - MR$ el cual representa las lecturas individuales en un gráfico y las medias móviles en el

otro, entendiendo como medias móviles la diferencia entre una lectura y la inmediatamente anterior, con lo cual este tipo de gráfico se ajusta a la perfección al tipo de medida presente.

Así pues, antes de comenzar el estudio mediante gráficos de control, se procede a realizar un estudio preliminar para comprobar las hipótesis en las que se basa la metodología y de paso se comprueban posibles anomalías existentes en los datos.

7.2. Análisis exploratorio

En este análisis exploratorio principalmente se han graficado los datos en forma de histograma ya que de esta forma se puede observar rápidamente si la forma de la distribución de los datos existentes es asimilable a una Normal o por el contrario hay que rechazar dicha hipótesis. Además, mediante los histogramas también se pueden detectar otras interferencias como por ejemplo la mezcla de poblaciones.

Como se observa en la Fig. 7.2.1 y la Fig. 7.2.2 las distribuciones no son simétricas y por lo tanto difícilmente seguirán una distribución normal. Además, en según qué medidas se observa, a través de los diversos “picos” en el gráfico, una clara mezcla de poblaciones (Fig. 7.2.3).

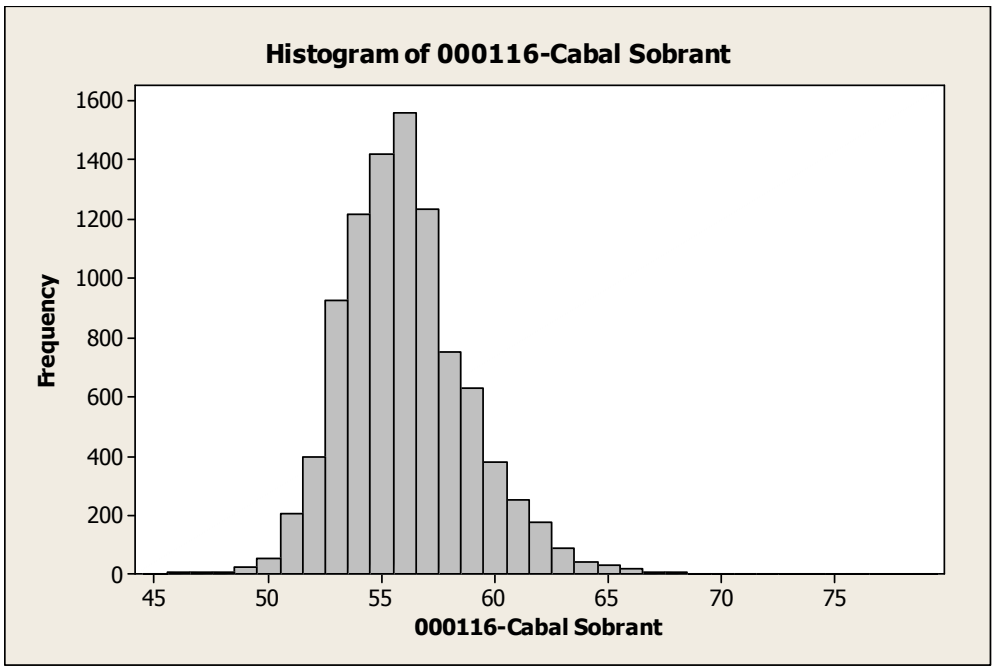

Fig. 7.2.1 Histograma del Caudal Sobrante a máximo par en la semana 15

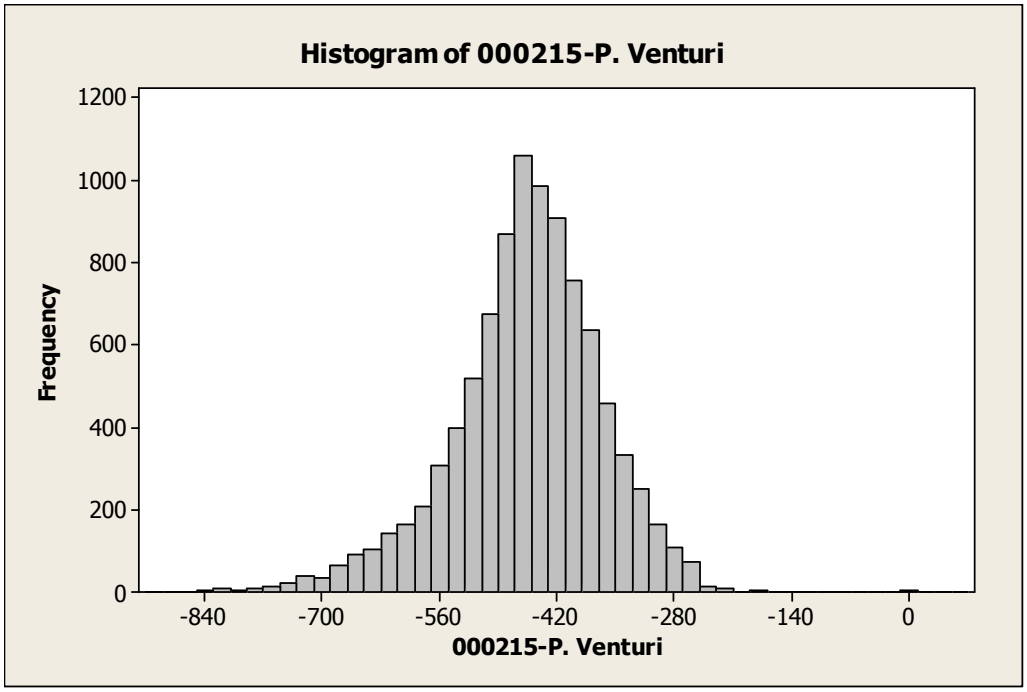

Fig. 7.2.2 Histograma de la Presión Venturi a máxima potencia en la semana 15

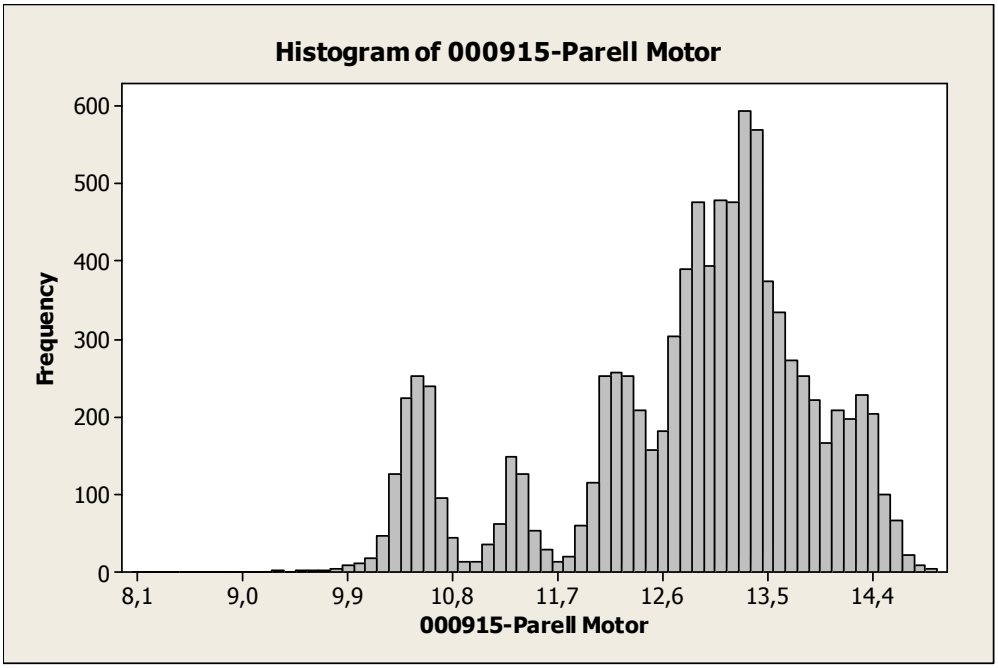

Fig. 7.2.3 Histograma del Par Motor a máxima potencia en la semana 15

Ante estos resultados se consultó con los responsables del Test Funcional cual podía ser la causa de dicha mezcla de poblaciones y se llegó a la conclusión de que el factor más probable fuese la influencia del mismo banco de test. Es decir que cada banco midiese un valor significativamente diferente a otro. Para confirmar dicha teoría de forma aproximada y preliminar se realizó un análisis de la variancia (más conocido como ANOVA) de una sola vía con el número del banco como factor.

Observando la Fig. 7.2.4 podemos asegurar que hay indicios claros de que los bancos tienen una influencia importante en la distribución de los datos obtenidos ya que las medias observadas en cada banco son significativamente diferentes entre bancos. En el resto de medidas ocurre algo similar y se puede observar en el Anexo D.

One-way ANOVA: 000015-Cabal Rail versus Banc

```
Source    DF        SS      MS      F      P
Banc      23   4816,76  209,42  51,17  0,000
Error   9373  38359,90    4,09
Total   9396  43176,67

S = 2,023   R-Sq = 11,16%   R-Sq(adj) = 10,94%


                          Individual 95% CIs For Mean Based on
                          Pooled StDev
Level    N    Mean  StDev  -------+---------+---------+---------+--
1880     1  56,600      *  (-------------------*-------------------)
2056   278  55,355  1,083              (*)
2057   301  54,383  1,264         (*)
2058   446  55,625  1,433               (*)
2059   428  53,935  1,179       (*)
2060   237  54,344  6,836        (-*)
2062   523  54,644  2,740          (*)
2063    38  54,932  1,406         (---*--)
2104   476  56,244  1,822                   (*)
2105   600  54,809  1,870           (*)
2106   456  55,191  1,304             (*)
2107   410  53,670  1,432      (*)
2108   439  56,279  1,455                   (*)
2109   506  54,775  1,290           (*)
2123   431  54,590  1,317          (*)
2127   512  55,301  1,712              (*
2131   237  53,826  2,402       (*)
2141   438  53,758  1,261       (*)
2142   567  54,891  1,339            *)
2150   498  54,822  1,359          (*)
2151   295  55,307  1,475            (-*)
2228   554  54,286  3,151         *)
2229   310  55,955  1,013                (*)
2254   416  54,915  1,767           (*)
                          -------+---------+---------+---------+--
                              54,0      56,0      58,0      60,0
```

Fig. 7.2.4 Tabla ANOVA del Caudal Rail a máx. potencia en la semana 15

Además, como confirmación adicional se separaron los datos por bancos de tal forma que, en este momento, los datos mostrados están divididos por semanas y por bancos.

En la Fig. 7.2.7 se puede ver que los indicios de la mezcla de poblaciones debido a los bancos son más evidentes ya que desaparecen las crestas secundarias. De todas formas, más adelante se expone el estudio adecuado para confirmarlo sin dejar lugar a dudas. Sin embargo, como se aprecia en las Fig. 7.2.5 y Fig. 7.2.6 el problema de la asimetría de las distribuciones no es debido a la mezcla de poblaciones entre bancos. Con lo que la hipótesis de normalidad sigue sin confirmarse.

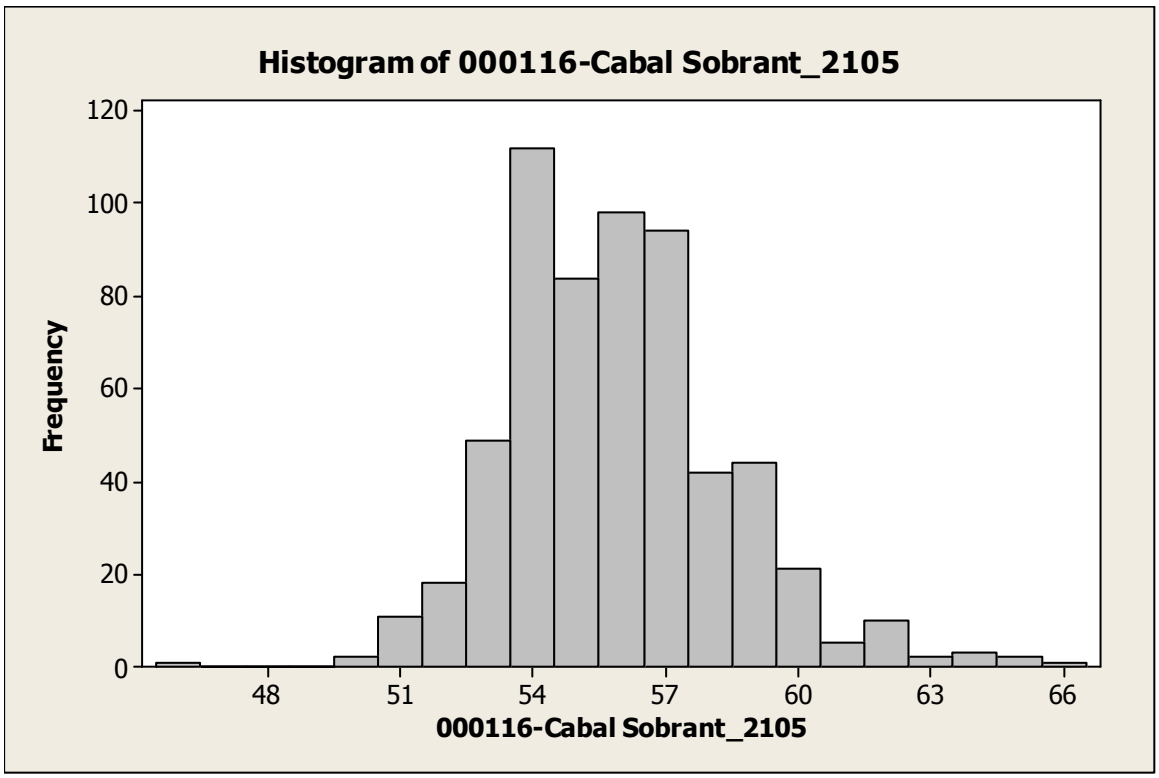

Fig. 7.2.5 Histograma del Caudal Sobrante a máxima potencia del banco 2105

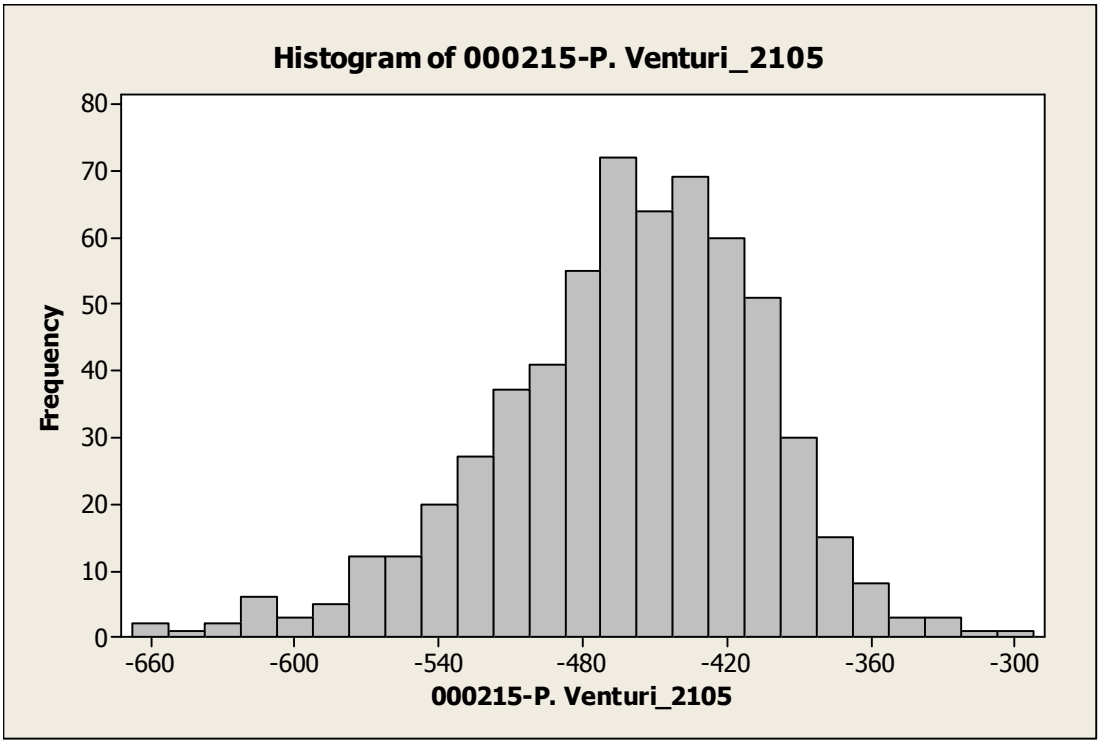

Fig. 7.2.6 Histograma de la Presión Venturi a máxima potencia en el banco 2105

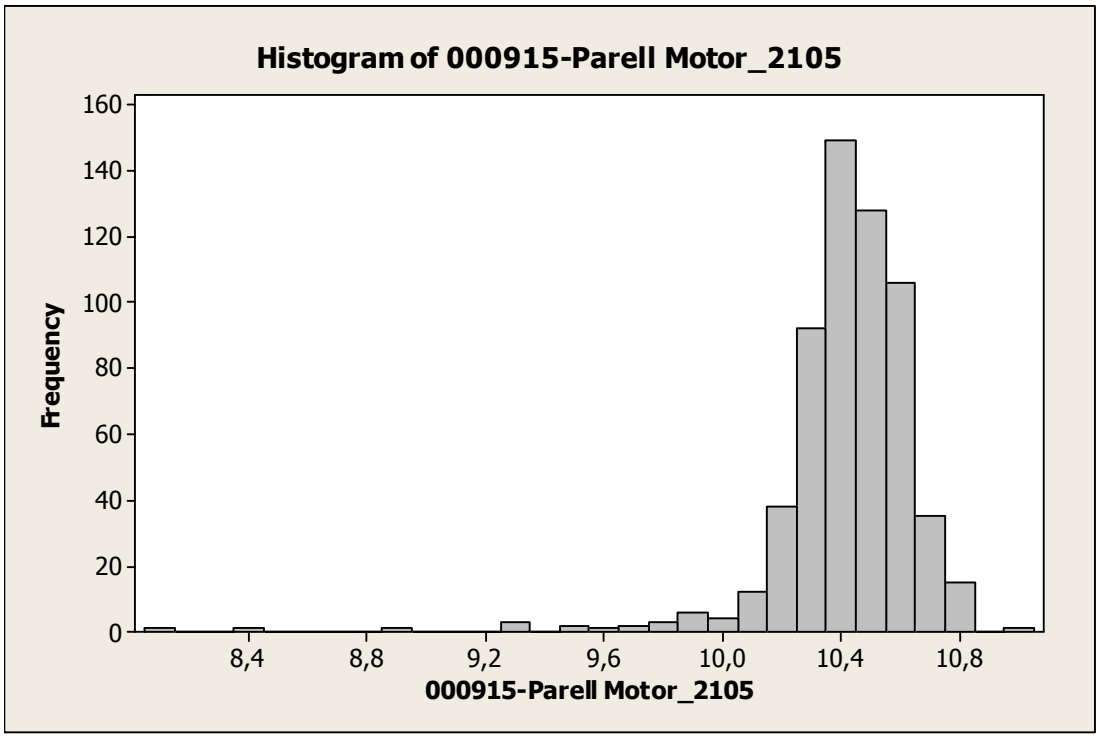

Fig. 7.2.7 Histograma del Par Motor a máxima potencia en el banco 2105

Así pues, es evidente que con los datos en bruto no es posible trabajar de una forma adecuada y por tanto es necesario confirmar por un lado las diferencias entre bancos y por otro normalizar o identificar la distribución de los datos para poder extraer conclusiones válidas.

7.3. Estudio R&r de los bancos

Para evaluar las posibles diferencias entre bancos se realizó un estudio de repetitividad y reproducibilidad (R&r de ahora en adelante) ya que precisamente evalúa la capacidad de una sistema de medición. En otras palabras, mide la variabilidad interna de una herramienta de medida (misma medida varias veces seguida) y la variabilidad entre herramientas de medida (misma medida con varias herramientas similares).

En este caso particular las herramientas de medidas son los bancos de test y para hacer el estudio se utilizaron dos bancos de test (el 2108 y el 2109) y 10 bombas modelo DFP1.1 (de gran similitud constructiva con la DFP1.15 y comprobadas en los mismos bancos) con números de serie correlativos para garantizar una máxima uniformidad entre las bombas.

Para realizar el estudio se mediría cada una de las bombas dos veces en cada uno de los dos bancos con lo que finalmente se obtendrían 40 mediciones en total. Sin embargo, debido a un error durante el proceso se tuvo que rechazar las medidas de una de las bombas. Así pues, finalmente se obtuvieron 36 medidas válidas correspondientes a 9 bombas.

A continuación se presentan algunos de los resultados obtenidos (Fig. 7.3.1, Fig. 7.3.2 y Fig. 7.3.3):

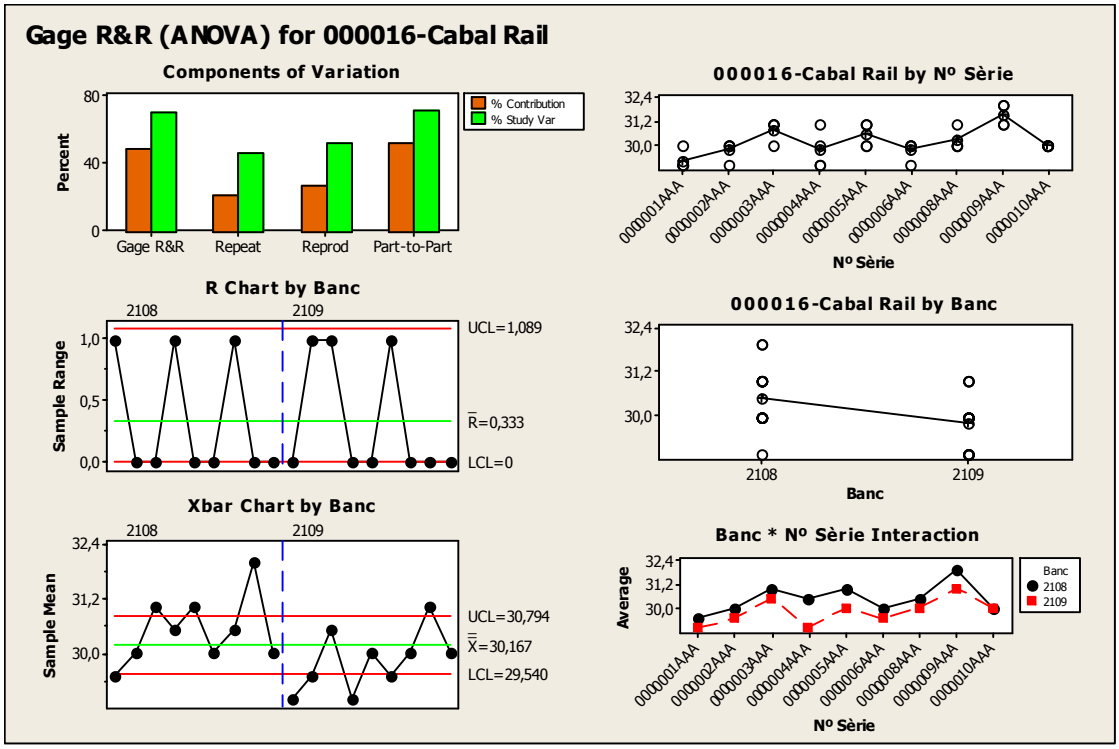

Fig. 7.3.1 R&r del Caudal Rail a máx. par

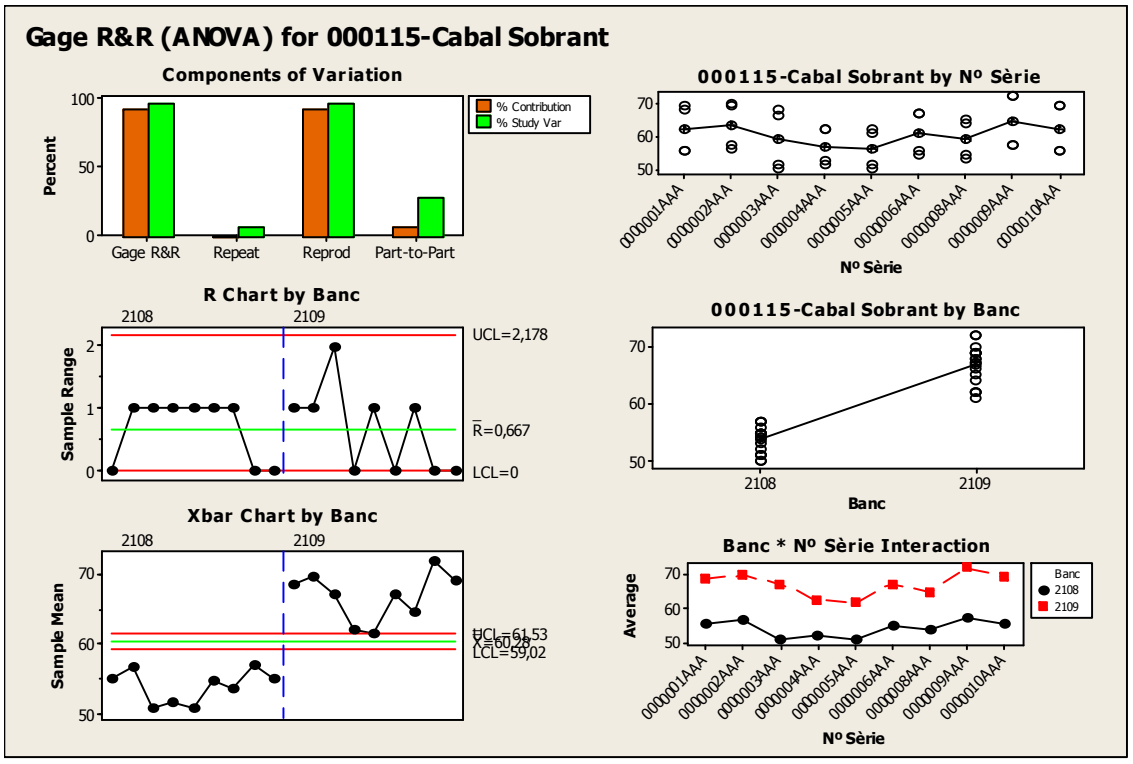

Fig. 7.3.2 R&r del Caudal Sobrante a máx. potencia

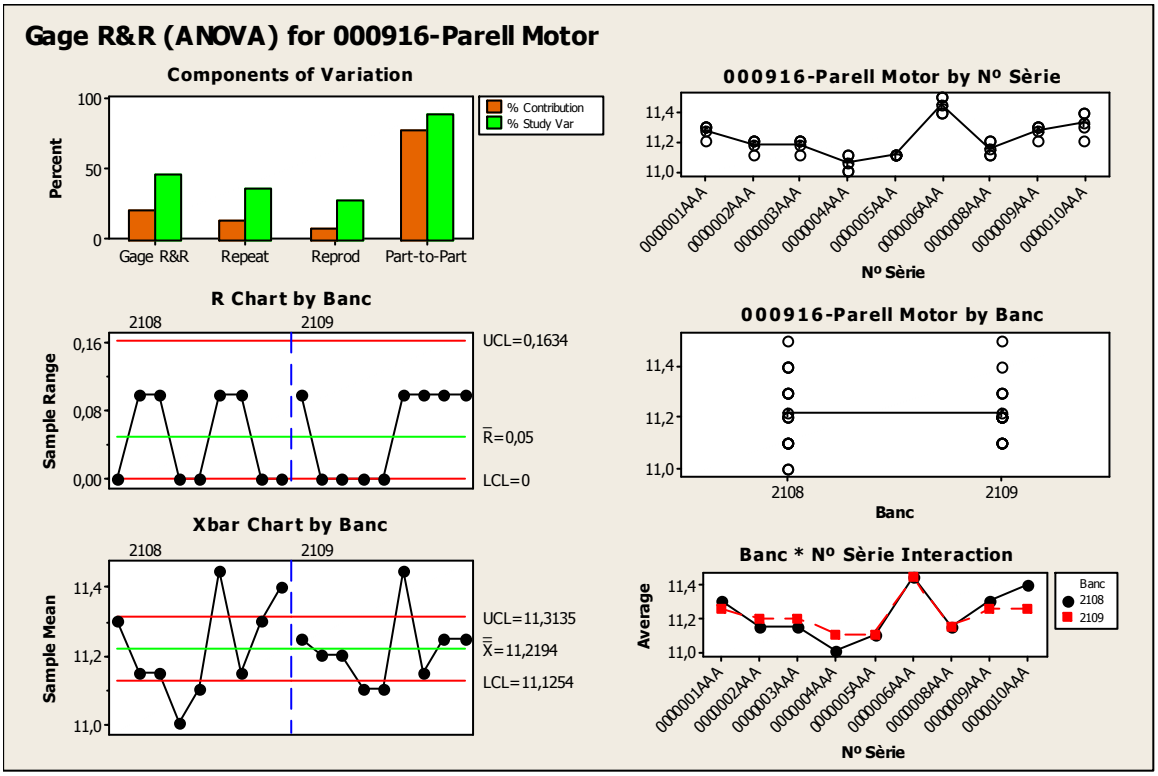

Fig. 7.3.3 R&r del Par motor a máx. par

Como se puede observar en las figuras anteriores, hay diferencias considerables según el tipo de medida.

En la Fig. 7.3.1 se puede observar que la aportación a la variabilidad del sistema de medición por parte de los bancos es muy similar a la aportada por las bombas. Además, la variabilidad de los bancos se reparte casi de forma equitativa entre variabilidad propia del banco y la variabilidad entre bancos.

En cambio, en la Fig. 7.3.2 se observa que la práctica totalidad de la variabilidad es debida al sistema de medición, y más concretamente a las diferencias existentes entre los bancos.

A diferencia de los dos casos anteriores, tal y como se puede ver en la Fig. 7.3.3 la variabilidad del sistema de medición es debido a las diferencias existentes entre las bombas.

Expresado en otras palabras, en el caso del caudal rail a máx. par las diferencias entre las mediciones se deben tanto a que un mismo banco no mide dos veces seguidas igual, a que entre bancos no miden igual y, evidentemente a que diferentes bombas no son iguales. En el caso del caudal sobrante a máx. potencia prácticamente la totalidad de la variabilidad

entre medidas se debe a las diferencias existentes entre los bancos, es decir, cada banco sí que mide igual dos veces seguidas, pero el valor entre los bancos discrepa mucho el uno del otro con lo cual es imposible distinguir cuál de las dos medidas es la válida. En el último caso, sin embargo, la variabilidad es debida a las diferencias existentes entre las bombas con lo cual se puede reconocer en cualquiera de los dos bancos ensayados qué bomba estamos comprobando con la lectura del par motor a máximo par.

Así pues, en esta pequeña muestra del estudio R&r (los gráficos completos están en el Anexo E) se pueden confirmar las sospechas sobre las diferencias entre bancos. Como se ha visto en diversas medidas, el sistema de medición es tan poco preciso que es imposible determinar si un posible error es debido a la bomba o al banco. Paradójicamente, la medida más “fiable” es la del par motor, justamente la medida donde más claramente parecía haber mezcla de poblaciones. Sin embargo es posible que precisamente los bancos escogidos al azar para hacer el estudio sí que se pareciesen entre sí en esta medida.

Ante estos hechos lo primero que se debería haber hecho es tomar medidas correctivas en el sistema de medición ya que unas deficiencias tan patentes comprometen seriamente la calidad del proceso. Sin embargo, debido a la imposibilidad del autor de tomar decisiones dentro de la empresa donde se ha desarrollado el presente proyecto se ha optado por aislar los datos de un solo banco para evitar mezclas de poblaciones ya que, además, según el estudio R&r dentro de un mismo banco sí que había una mayor fiabilidad. De entre todos los bancos disponibles se escogió el 2109 ya que era uno de los dos en los que se realizó la prueba R&r.

7.4. Normalización de los datos

Dentro de las posibilidades de normalización de datos se eligieron 2 de las transformaciones más usadas para datos no normales: las transformaciones Box-Cox y la Johnson.

La primera de estas transformaciones se basa en que, a pesar de que una distribución de datos quizás no sigue una Normal, los datos de dicha distribución elevados a una potencia adecuada puede ser que sí que se distribuyan normalmente. En otras palabras, la transformación Box-Cox eleva los datos a diferentes potencias y comprueba si los datos resultantes siguen una distribución normal o no. El procesador estadístico utilizado limita la cantidad de potencias para evitar que este proceso se alargue indefinidamente y concretamente los exponentes utilizados varían de -5 a +5. Con lo que en caso de no

observar una convergencia con valores entre estos límites el programa devuelve como valor más aproximado el límite con el valor P más alto.

La transformación a una familia de distribuciones de Johnson es algo más compleja que la Box-Cox. Para empezar, existen tres familias de distribuciones para una variable aleatoria *X* continua, a saber:

- S_B: Se refiere a *X* acotada.
- S_L: Se refiere a *X* acotada por debajo o lognormal.
- S_U: Se refiere a *X* no acotada.

Por lo tanto, primero es necesario determinar qué tipo de variable aleatoria se está tratando. En este caso, todas las medidas son asimilables al primer caso ya que por ejemplo, en el caso de las medidas de caudal, hay una limitación física para el caudal máximo y el mínimo sólo puede ser 0. En el resto de variables también hay limitaciones físicas debido a la resistencia de los materiales en última instancia.

Así pues, cuando la variable aleatoria es acotada (familia S_B) la transformación aplicada es:

$$Z = \gamma + \eta \ln\left(\frac{X-\epsilon}{\lambda+\epsilon-X}\right) \qquad \text{(Ec. 7.4.1)}$$

sujeta a:

- Condiciones de los parámetros: $\eta, \lambda > 0,\ -\infty < \gamma < \infty, -\infty < \epsilon < \infty$
- Condiciones de la variable *X*: $\epsilon < X < \epsilon + \lambda$
- La estimación de los parámetros $\gamma, \eta, \epsilon, \lambda$ se encuentra en el Anexo F.[1]

Sin embargo la estimación de parámetros no es necesaria calcularla manualmente ya que el programa estadístico utilizado busca automáticamente los parámetros que normalizan más los datos, utilizando como indicador el p-valor de la prueba de contraste de hipótesis de la normalidad de los datos.

[1] (Ingrid Juliana Lagos, 2003)

Como ya se ha comentado anteriormente, para evitar la “contaminación” del efecto de otros bancos se han analizado estas vías para los datos del banco 2109.

La transformación Box-Cox, tal y como se aprecia en las Fig. 7.4.1 y Fig. 7.4.2 no es útil para algunas medidas con lo cual se descarta este método para normalizar los datos. El resto de medidas se puede consultar en el Anexo G.

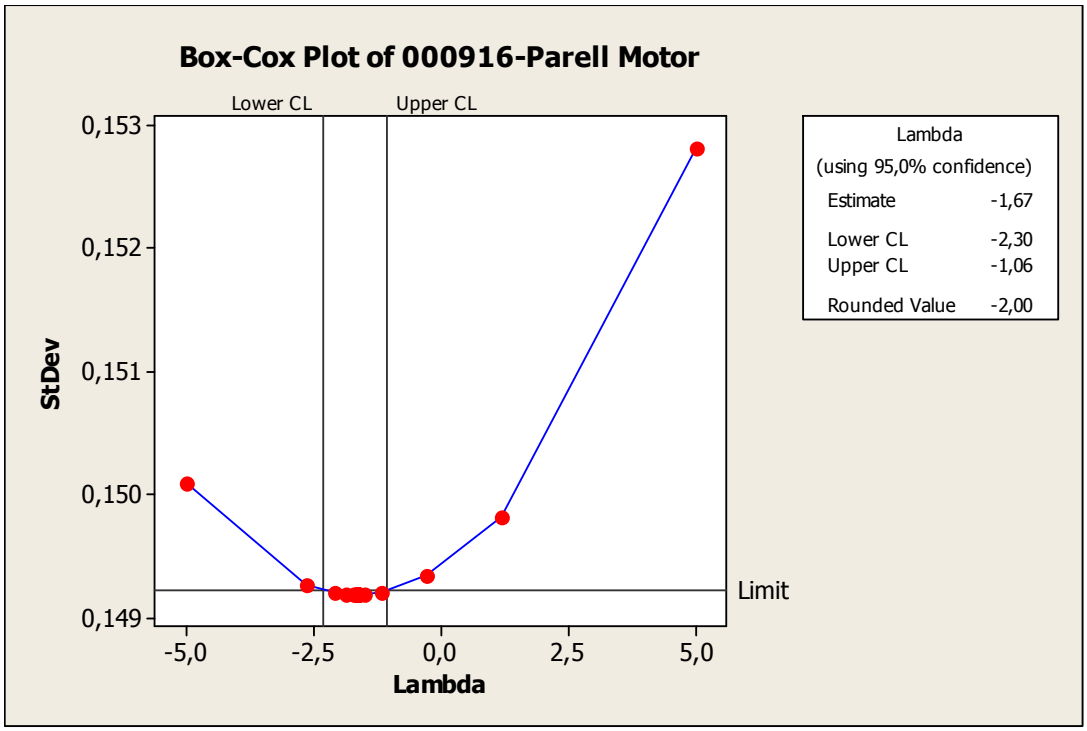

Fig. 7.4.1 Box-Cox del par motor a máx. par del banco 2109

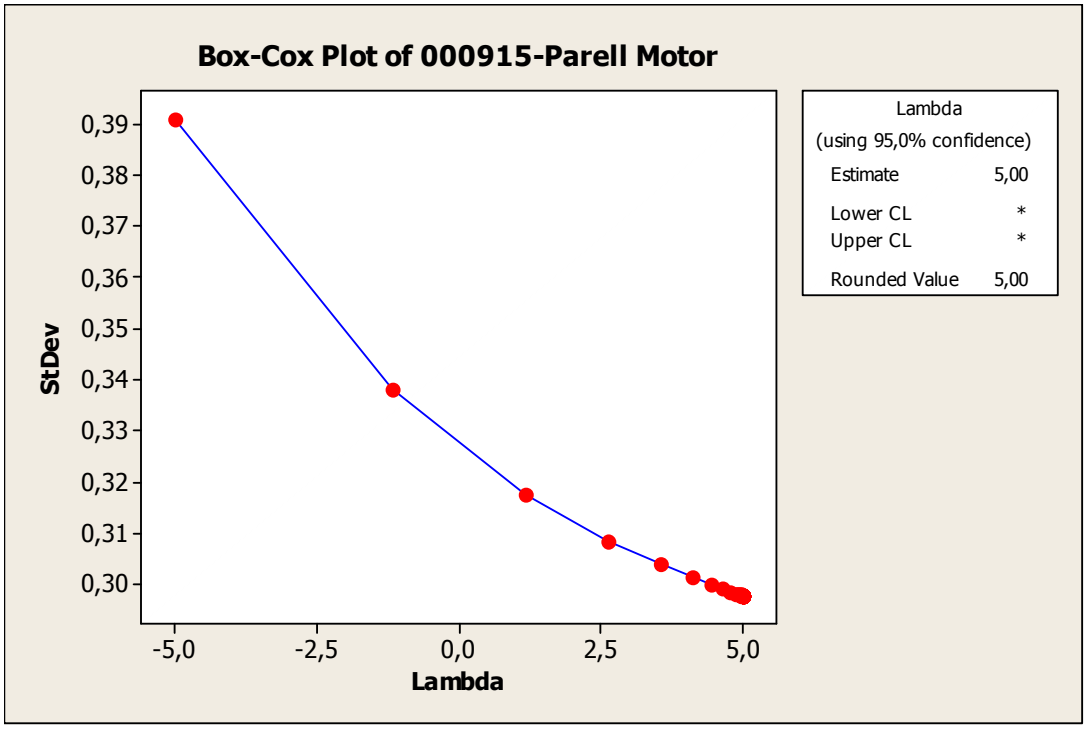

Fig. 7.4.2 Box-Cox del caudal sobrante a máx. potencia del banco 2109

En el caso de la transformación Johnson se observa (en las Fig. 7.4.3 y Fig. 7.4.4) que en ninguno de los dos casos anteriores se consigue encontrar unos parámetros que consigan un p-valor mayor a 0,10 (valor límite por defecto). O dicho de otra forma más sencilla: no es posible normalizar los datos por transformación de Johnson.

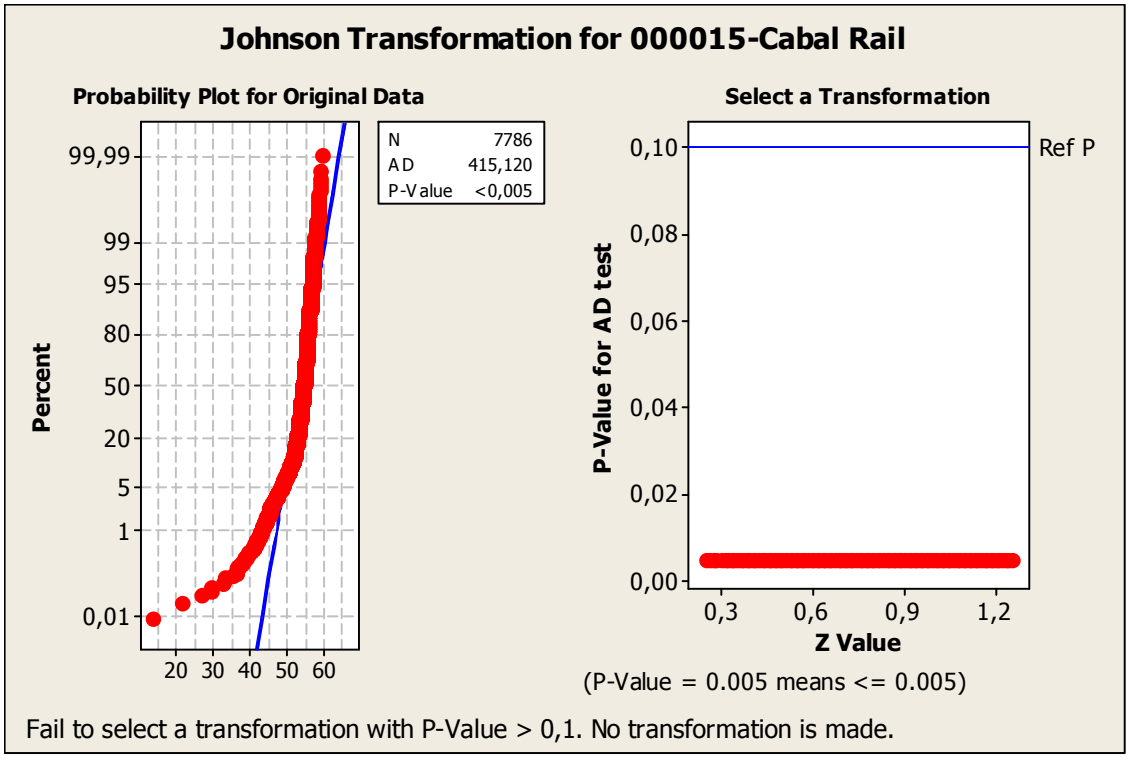

Fig. 7.4.3 Transformación Johnson del C. Rail a máx. pot. del banco 2109

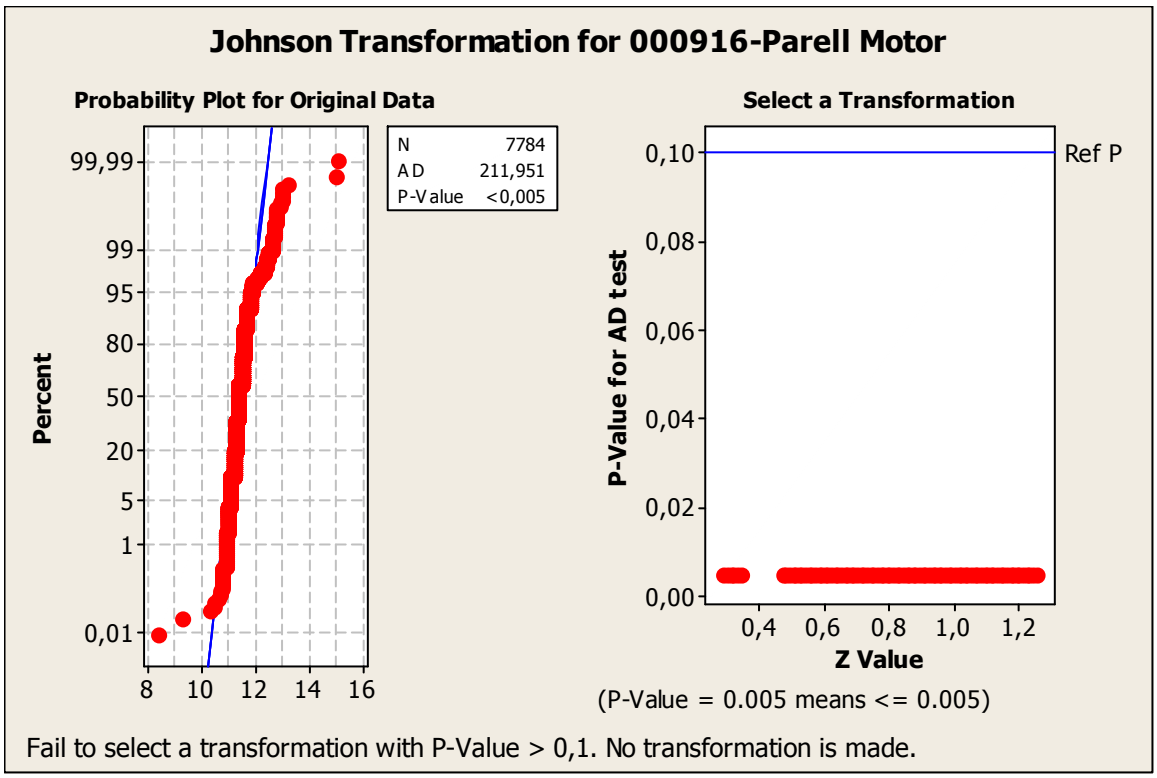

Fig. 7.4.4 Transformación Johnson del Par motor a máx. par. del banco 2109

Ante estos datos resulta evidente que una normalización es inviable con lo que se procede a realizar el estudio de las posibles distribuciones que mejor se ajusten a los datos para poder tener unas hipótesis válidas sobre las que basar los cálculos.

7.5. Identificación de la distribución

Así pues, en este apartado se realiza un estudio para tratar de identificar qué distribución siguen los datos disponibles. Naturalmente, no se estudiarán todas las distribuciones existentes ya que existe una infinidad de distribuciones y frecuentemente son para casos muy particulares. Por lo tanto se tratarán de ajustar solamente las distribuciones más comunes. Para ello, Minitab dispone de una herramienta específica: *Individual Distribution Identification*.

En realidad, esta herramienta no es más que la representación de los datos obtenidos en papel probabilístico de diferentes distribuciones. Con lo cual se obtiene, en un solo paso, la representación para 9 distribuciones diferentes y 6 adaptaciones de distribuciones. Éstas son:

- Distribuciones:
    - Normal
    - Lognormal
    - Exponencial
    - Weibull
    - Smallest Extreme Value
    - Largest Extreme Value
    - Gamma
    - Logistic
    - Loglogistic
- Adaptaciones:
    - Transformación Box-Cox (para distribución Normal)
    - Lognormal de 3 parámetros
    - Exponencial de 2 parámetros
    - Weibull de 3 parámetros
    - Gamma de 3 parámetros
    - Loglogistic de 3 parámetros

Como se observa en las figuras de Fig. 7.5.1 a Fig. 7.5.4 no hay distribución que se ajuste suficientemente a los datos del caudal rail a máxima potencia. De hecho, todas las distribuciones comprobadas ni tan solo se aproximan a los datos existentes. Además, para las otras mediciones pasa prácticamente lo mismo tal y como se puede observar en el Anexo H.

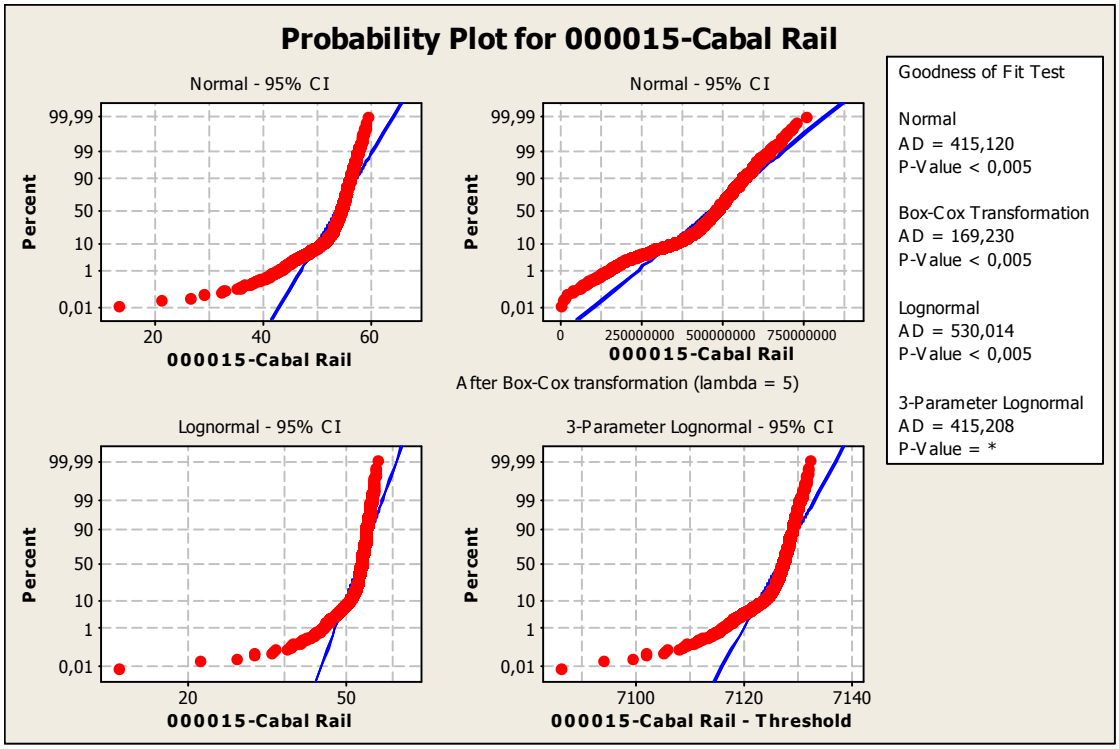

Fig. 7.5.1 Identificación distribución C. Rail a máx. pot. del banco 2109 (1/4)

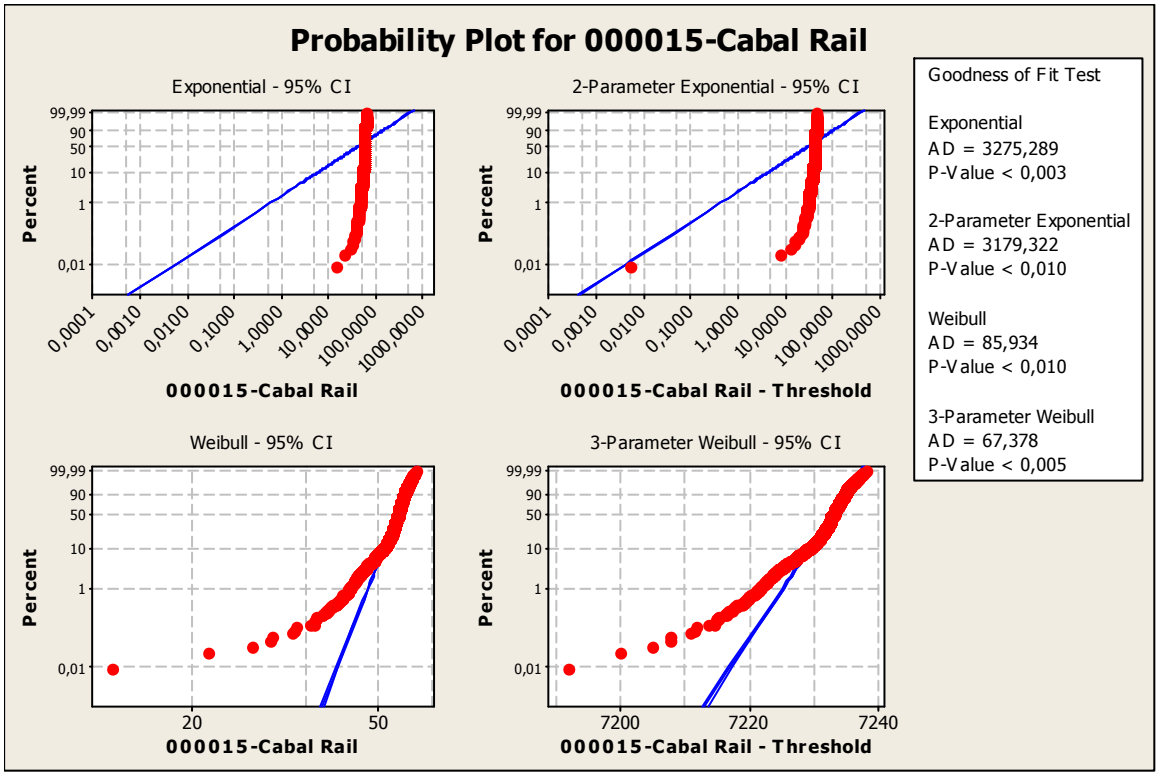

Fig. 7.5.2 Identificación distribución C. Rail a máx. pot. del banco 2109 (2/4)

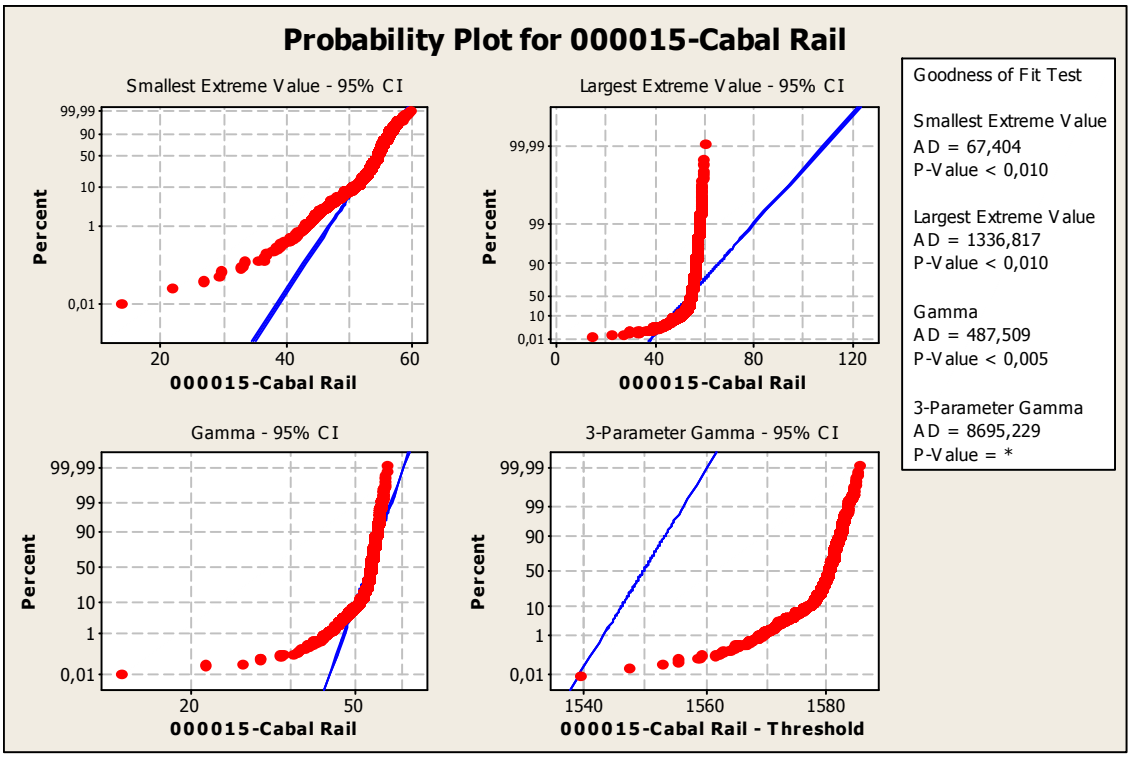

Fig. 7.5.3 Identificación distribución C. Rail a máx. pot. del banco 2109 (3/4)

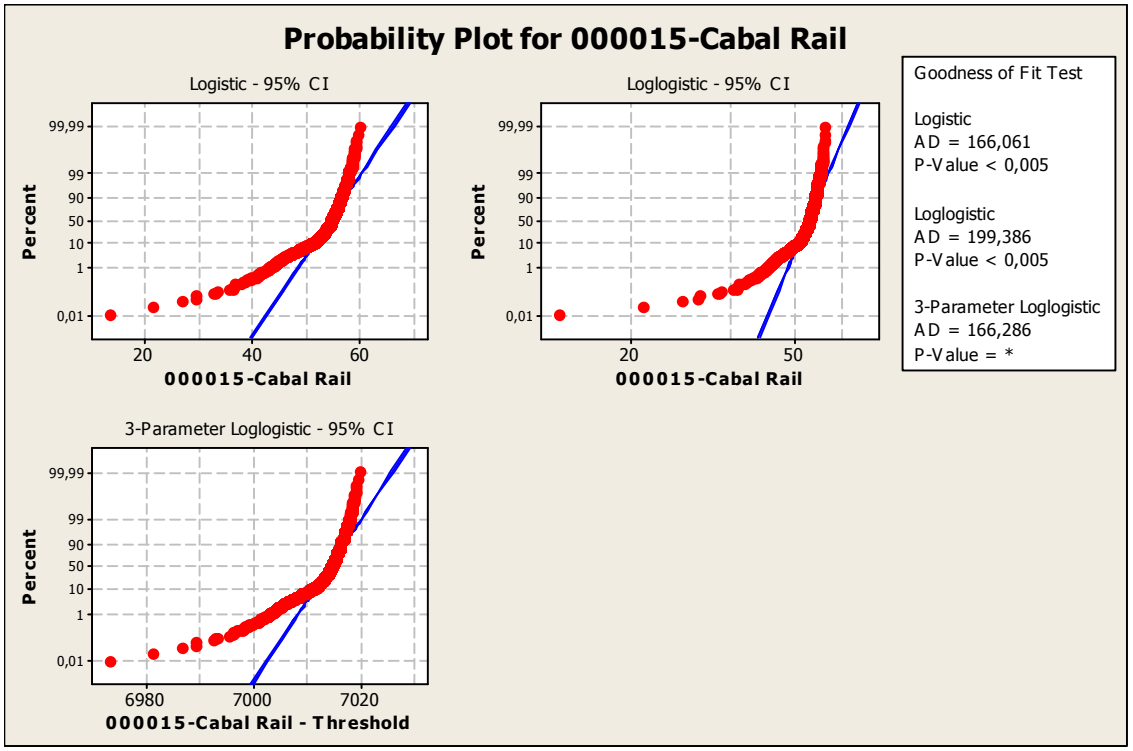

Fig. 7.5.4 Identificación distribución C. Rail a máx. pot. del banco 2109 (4/4)

Con lo cual, a pesar del amplio rango de distribuciones comprobadas (Normal, Lognormal, Weibull, etc.) no se ha encontrado ninguna que permita sentar una base sobre la cual trabajar.

Así pues, teniendo en cuenta que no ha sido posible normalizar los datos ni identificar una distribución conocida para poder trabajar, no queda otro remedio que definir una distribución "propia" ya que únicamente es necesario encontrar los límites (superior e inferior) que dejen un 3‰ en los extremos y por lo tanto no hace falta que dicha distribución reúna toda una familia de características para poder hacer operaciones complejas.

7.6. Determinación de la distribución

Como se ha dicho anteriormente, debido a las características de los datos se decidió utilizar una distribución propia. Es decir, ya que lo que se busca es un estudio de capacidad del proceso, determinar empíricamente los límites de control de los datos.

Esto sólo es posible debido a la gran cantidad de datos existentes: más de 8000 observaciones en cada medición para el banco analizado ya que con una cantidad de datos

reducida la distribución es demasiado escalonada como para poder determinar los límites adecuadamente.

La elaboración de una distribución particular tiene un gran inconveniente que cabe remarcar: las observaciones anómalas o fuera de control son incluidas como observaciones normales con lo que el uso de los gráficos de control procedentes de la distribución personalizada tiene el riesgo de no detectar adecuadamente las observaciones anómalas. Esto es debido a que, a pesar de haber realizado un filtrado básico de los valores anómalos, esto es, valores que eran físicamente imposibles como por ejemplo una medición de caudal por encima del 100% teórico que es capaz de suministrar la bomba, no se ha podido realizar un filtrado más exhaustivo de los datos. Así pues, valores de condiciones fuera de control pero físicamente viables han sido considerados como datos bajo control.

Sin embargo, a pesar de dicho inconveniente no se vio otra alternativa para poder continuar con el proyecto con lo que se asumieron los riesgos descritos. Por otro lado, cabe comentar que este “error deliberado” no es tan descabellado ya que en este caso, las situaciones fuera de control son tan frecuentes y aleatorias que la frontera entre normal y anómalo se difumina. Si además se le añade que sólo se emprenden medidas correctivas en casos muy extremos, menos arriesgada es esta decisión.

Para crear la distribución personalizada se ha simulado un millón de observaciones a partir de los datos existentes con el objetivo de hacer más continua la distribución ya que con 8000 datos aún había saltos considerables. Posteriormente se ha buscado que valores dejan un 1,5‰ a cada extremo de la distribución (equivalente a 6σ en una distribución normal), convirtiéndose éstos en los límites de control. Finalmente se ha comprobado que dicho valor también dejase un 1,5‰ de las observaciones originales (las 8000 aprox.).

Cabe comentar que los límites encontrados no coinciden exactamente con el límite de 1,5‰ ya que los valores de las mediciones tenían una precisión bastante baja, entendiendo como precisión la cantidad de cifras significativas existentes. En algunos casos como las medidas de arranque, este efecto es especialmente acusado debido a los bajos valores del caudal con lo cual una variación de una décima suponía un cambio de hasta 30% en algunos casos particulares .Por suerte este extremo se sitúa en la zona intermedia de la distribución, donde más datos se acumulaban y no influye en la determinación de los límites.

Recapitulando, el procedimiento para determinar la distribución es:

- Simulación de un millón de observaciones a partir de datos originales
- Determinación de los límites que dejan un 1,5‰ de los datos en cada extremo
- Comprobación de los límites con los datos originales

Una vez comprobados los límites se ha graficado los datos originales con 2 pares de límites: por una parte los límites "naturales" de la distribución (es decir, los que se han buscado mediante el procedimiento descrito arriba) y por otra las tolerancias definidas para el control de calidad.

Para realizar todo este procedimiento se ha tenido que utilizar un procesador de hojas de cálculo (Microsoft Excel concretamente) ya que Minitab no permite realizar fácilmente acciones entre filas como las que eran necesarias.

Concretamente, los pasos seguidos para obtener los valores de los límites fueron los siguientes:

Primero de todo, para evitar generar observaciones nulas, se ordenaron los datos de mayor a menor y se eliminaron las observaciones nulas (debido a interrupciones en el programa del banco de test). Después, se generaron el millón de observaciones en Minitab mediante la opción *Calc>Random Data>Sample From Columns*. A continuación se exportaron los datos a un fichero de texto debido a que si se copiaban en el portapapeles no se incluían todos los datos. Posteriormente se importó el millón de observaciones en una hoja de Excel mediante la opción *Datos>Obtener datos externos>Desde texto*. Una vez importados los datos se contaron las observaciones dentro de un rango determinado en una columna aparte (para facilitar cambios en los rangos) y finalmente se calculó la proporción de observaciones de cada rango pudiendo así seleccionar aquellos que daban una proporción acumulada del 1,5‰ y del 99,85‰ respectivamente. Y finalmente estos límites se comprobaron con los datos originales calculando qué proporción de éstos quedaba fuera de los límites encontrados.

7.7. Análisis viabilidad

Una vez obtenidos los límites equivalentes a un intervalo 6σ de una distribución Normal se puede comenzar a hacer un análisis para determinar qué medidas son candidatas a ser eliminadas de un porcentaje de bombas.

En este momento se hace necesario esclarecer que para poder ahorrar tiempo en el Test Plan es necesario que sean candidatas a ser eliminadas todas las medidas de un mismo punto de ensayo (máx. pot, ralentí,…). Esto se debe a que, como ya se ha comentado, existe un tiempo de estabilización una vez se ha determinado la señal consigna de revoluciones y presión con el objetivo de que las fluctuaciones de presión y caudal no interfieran en la medida. Dicho de otro modo, este tiempo de estabilización evita que la medida se realice en el modo transitorio. Con lo cual, sólo si se eliminan todas las medidas de un mismo punto de ensayo se podrá eliminar también el tiempo de estabilización que es, de hecho, lo que más retrasa las medidas (ya que las mediciones en si son instantáneas).

Una vez aclarado este aspecto, a continuación se presentan los gráficos de control tipo I obtenidos. En los gráficos se han representado los límites determinados por el procedimiento explicado anteriormente de color rojo y los límites de tolerancia de color verde.

7.7.1. Máxima potencia

7.7.1.1. Caudal Rail (15)

En esta medida se ve claramente, tanto en el gráfico (Fig. 7.7.1) como en la Tabla 7.7.1, que no es una medida eliminable ya que el límite inferior de la distribución está por debajo de las especificaciones requeridas con lo cual es necesario el control 100% de las bombas para evitar enviar bombas defectuosas a cliente.

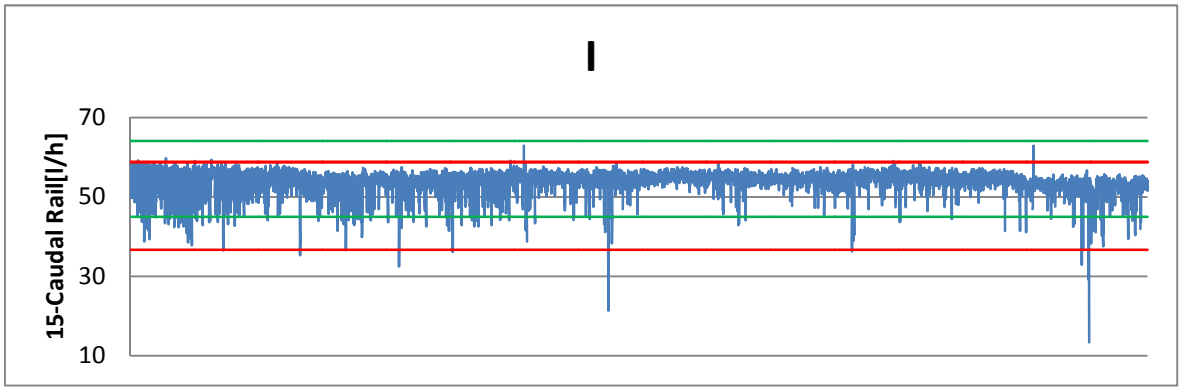

Fig. 7.7.1 Gráfico I del Caudal Rail a máx. potencia

Límites	Inferior[l/h]	Superior[l/h]
Distribución	36,7	58,8
Tolerancia	45,0	64,1
¿Eliminable?	NO	SI

Tabla 7.7.1 Límites del Caudal Rail a máx. potencia

Sin embargo el límite superior es correcto pero, teniendo en cuenta el significado físico, era de esperar. Al tratarse de la medida de un caudal, el límite superior jamás será superado por culpa de un defecto de la bomba ya que el dicho límite corresponde al máximo caudal teórico que puede suministrar la bomba. Dicho de otro modo, este límite se utiliza más bien para comprobar que el banco de test funciona correctamente ya que, como se ha dicho, si una medida sobrepasa el límite superior significa que hay algún error en el banco, no en la bomba.

7.7.1.2. Caudal Sobrante (115)

En este caso (Fig. 7.7.2 y Tabla 7.7.2), ambos límites son válidos para que la medida pueda ser eliminada ya que los límites naturales son más estrechos que los requeridos. Pero como ya se ha comentado anteriormente, no tendría sentido eliminar una sola de las medidas de un punto de funcionamiento ya que no habría ahorro de tiempo.

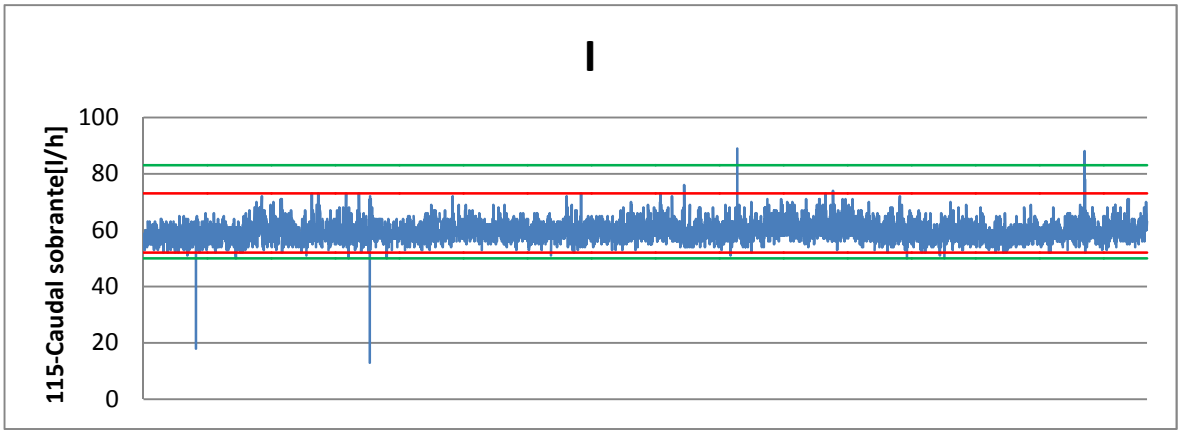

Fig. 7.7.2 Gráfico I del Caudal Sobrante a máx. potencia

Límites	Inferior[l/h]	Superior[l/h]
Distribución	52	73
Tolerancia	50	83
¿Eliminable?	SI	SI

Tabla 7.7.2 Límites del Caudal Sobrante a máx. potencia

7.7.1.3. Presión Venturi (215)

Aquí (Fig. 7.7.3 y Tabla 7.7.3), sólo tiene sentido hablar de uno de los límites ya que, como también se indica en la nota a pie de página, el límite inferior es abierto y por tanto el valor que aparece como "requerido" no es más que un valor suficientemente pequeño para que nunca de error. En cuanto al límite superior queda patente que no es eliminable.

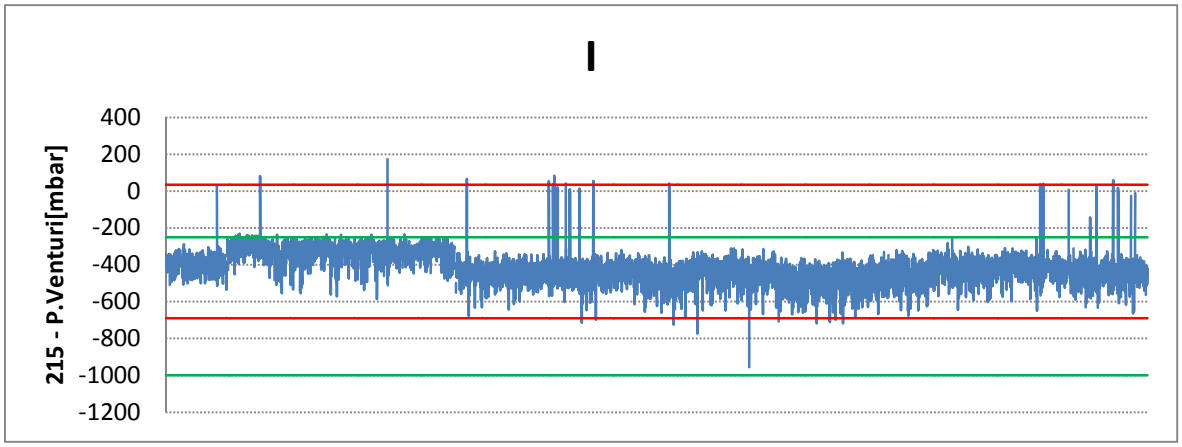

Fig. 7.7.3 Gráfico I de la Presión Venturi a máx. potencia

Límites	Inferior[mbar]	Superior[mbar]
Distribución	-689	35
Tolerancia	-999	-250
¿Eliminable?	SI[1]	NO

Tabla 7.7.3 Límites de la Presión Venturi a máx. potencia

[1] Es eliminable siempre ya que el valor *-999* representa un límite abierto

7.7.1.4. Par motor (915)

En este caso (Fig. 7.7.4 y Tabla 7.7.4), como en el anterior, el valor del límite inferior requerido es meramente funcional para que el banco de test no de error ya que, como es evidente, la bomba nunca ofrecerá un par resistente nulo. Respecto al límite superior, éste permitiría que la medida se eliminase pero como ya se ha explicado, esto no tiene sentido al existir ya una medida no eliminable de un mismo punto de ensayo.

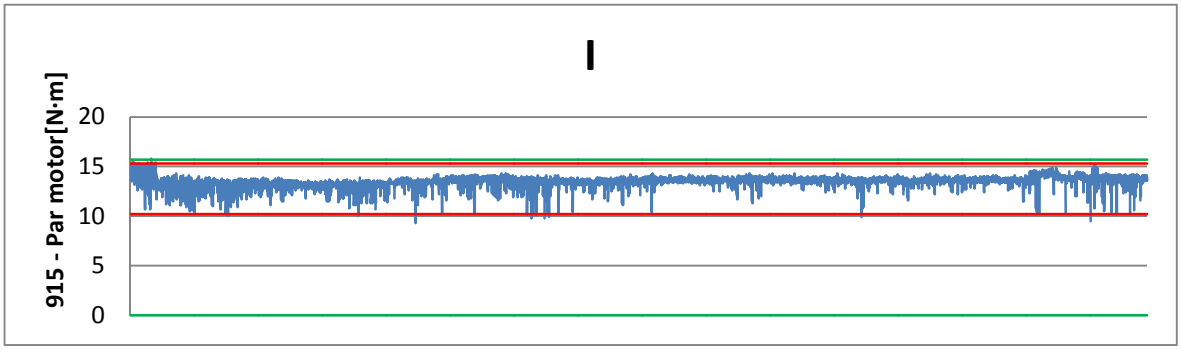

Fig. 7.7.4 Gráfico I del Par Motor a máx. potencia

Límites	Inferior[N·m]	Superior[N·m]
Distribución	10,2	15,3
Tolerancia	0	15,7
¿Eliminable?	SI[1]	SI

Tabla 7.7.4 Límites del Par Motor a máx. potencia

[1] Es eliminable siempre ya que el valor *0* representa un límite abierto

7.7.2. Máximo par

7.7.2.1. Caudal Rail (16)

En esta medida (Fig. 7.7.5 y Tabla 7.7.5), como en la análoga a máxima potencia, el límite inferior impide claramente que la medida pueda ser eliminada con lo que ya no será posible eliminar este grupo de mediciones.

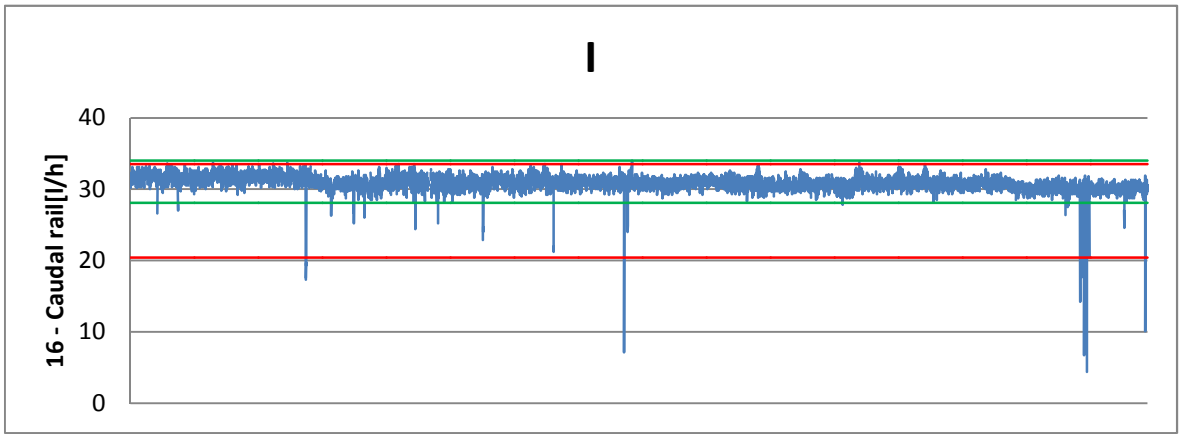

Fig. 7.7.5 Gráfico I del Caudal Rail a máx. par

Límites	Inferior[l/h]	Superior[l/h]
Distribución	20,4	33,5
Tolerancia	28,1	34,0
¿Eliminable?	NO	SI

Tabla 7.7.5 Límites del Caudal Rail a máx. par

7.7.2.2. Caudal Sobrante (116)

Esta medida (Fig. 7.7.6 y Tabla 7.7.6) por si sola se podría eliminar como caso extremo ya que el límite inferior de la distribución es el mismo que el requerido con lo que se sitúa justo en la frontera. Pero como ya se ha comentado no se eliminará debido a la medida del Caudal Rail

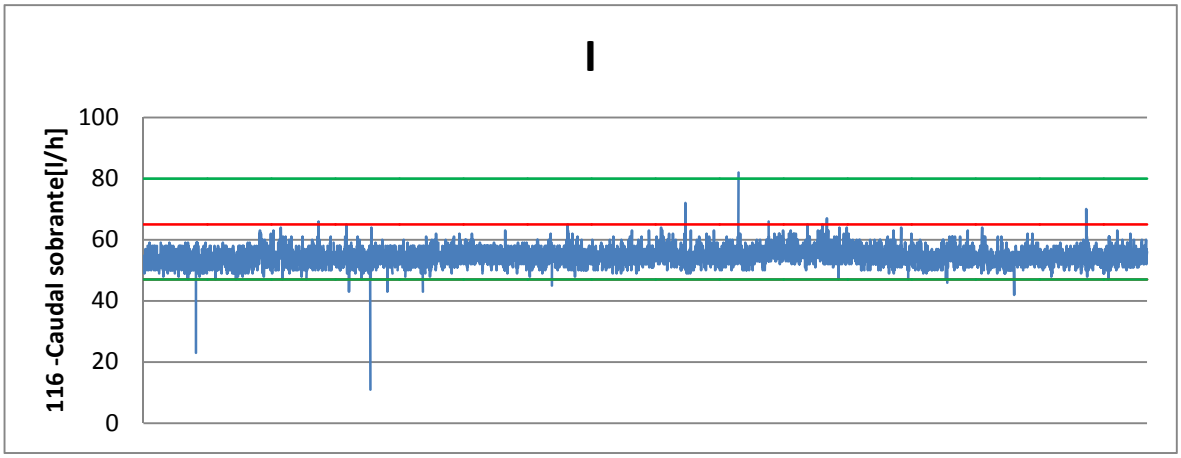

Fig. 7.7.6 Gráfico I del Caudal Sobrante a máx. par

Límites	Inferior[l/h]	Superior[l/h]
Distribución	47	65
Tolerancia	47	80
¿Eliminable?	Caso límite	SI

Tabla 7.7.6 Límites del Caudal Sobrante a máx. par

7.7.2.3. Presión Venturi (216)

Esta medida (Fig. 7.7.7 y Tabla 7.7.7) también provoca que el punto de ensayo no se pueda eliminar debido a que el límite superior de la distribución es superior al requerido (el caso del límite inferior en este tipo de medida ya se ha comentado anteriormente).

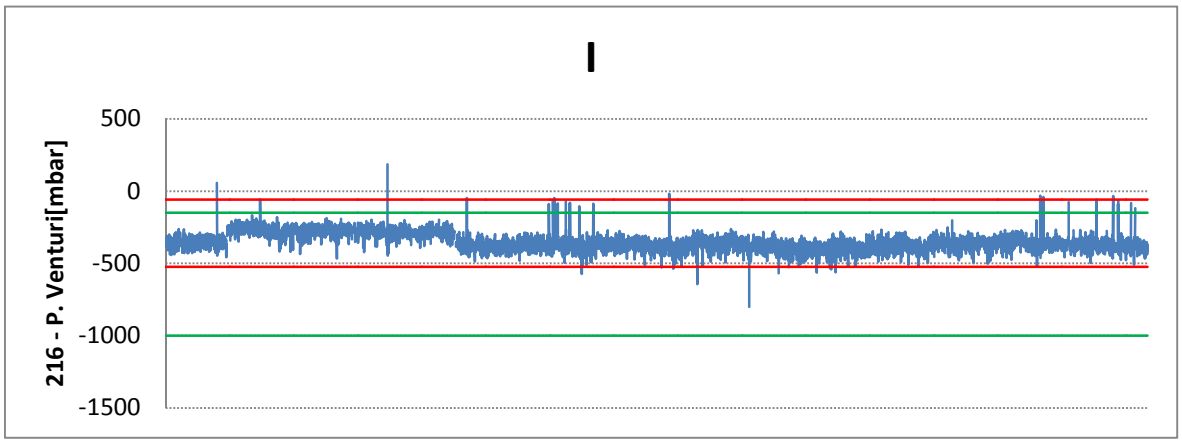

Fig. 7.7.7 Gráfico I de la Presión Venturi a máx. par

Límites	Inferior[mbar]	Superior[mbar]
Distribución	-523	-58
Tolerancia	-999	-150
¿Eliminable?	SI[1]	NO

Tabla 7.7.7 Límites de la Presión Venturi a máx. par

[1] Es eliminable siempre ya que el valor *-999* representa un límite abierto

7.7.2.4. Par motor (916)

Aquí (Fig. 7.7.8 y Tabla 7.7.8) se presenta un caso similar al del Caudal Sobrante ya que el límite superior de la distribución también coincide con el límite requerido con lo que, de nuevo, por si solo podría ser eliminado (ya que el límite inferior no supone nunca un problema)

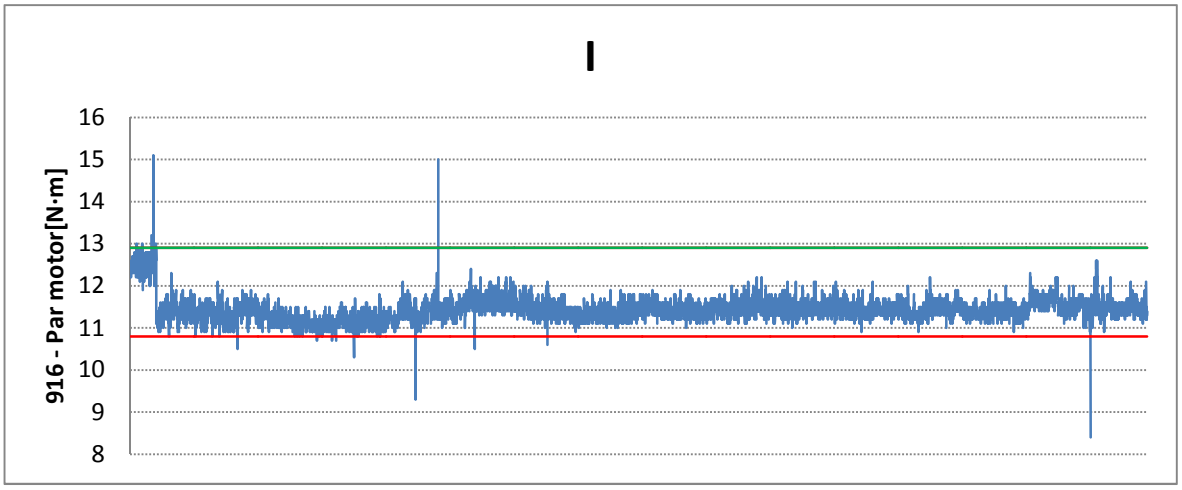

Fig. 7.7.8 Gráfico I del Par Motor a máx. par

Límites	Inferior[N·m]	Superior[N·m]
Distribución	10,8	12,9
Tolerancia	0	12,9
¿Eliminable?	SI[1]	Caso límite

Tabla 7.7.8 Límites del Par Motor a máx. par

[1] Es eliminable siempre ya que el valor *0* representa un límite abierto

7.7.3. Ralentí

7.7.3.1. Caudal Rail (17)

En la Fig. 7.7.9 y en la Tabla 7.7.9 se puede apreciar que esta medida se puede eliminar con un margen más que amplio ya que los límites naturales de la distribución son considerablemente más cerrados que los límites de las especificaciones.

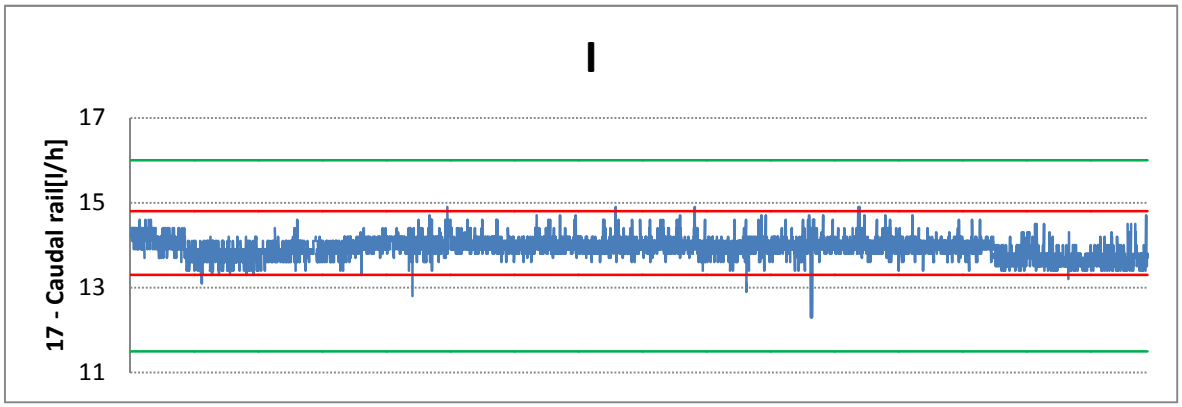

Fig. 7.7.9 Gráfico I del Caudal Rail al ralentí

Límites	Inferior[l/h]	Superior[l/h]
Distribución	13,3	14,8
Tolerancia	11,5	16
¿Eliminable?	SI	SI

Tabla 7.7.9 Límites del Caudal Rail al ralentí

7.7.3.2. Caudal Sobrante (117)

En este caso (Fig. 7.7.10 y Tabla 7.7.10) el margen anterior se reduce considerablemente en el límite inferior pero sin embargo siguen siendo más cerrados los límites naturales que los requeridos con lo que el Caudal Sobrante al ralentí también es eliminable.

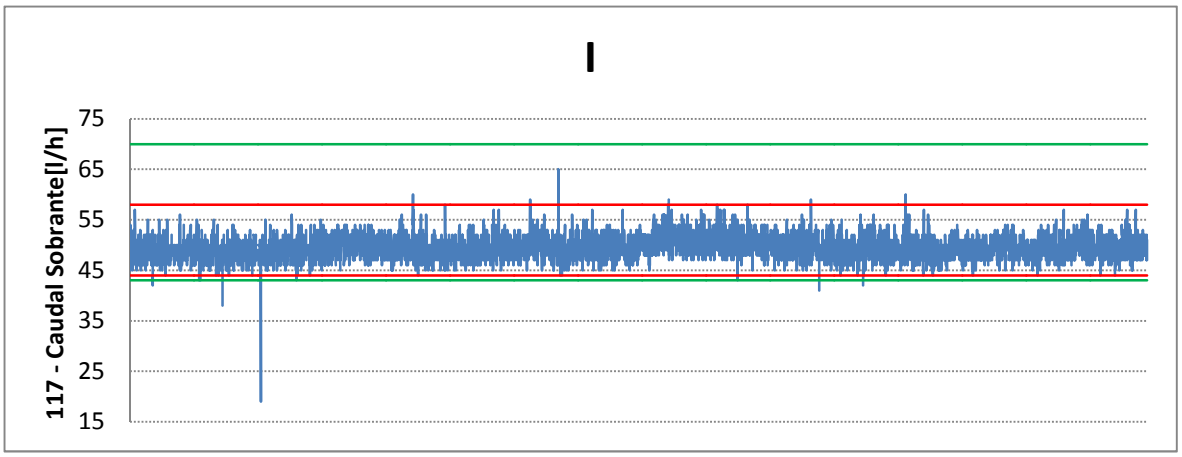

Fig. 7.7.10 Gráfico I del Caudal Sobrante al ralentí

Límites	Inferior[l/h]	Superior[l/h]
Distribución	44	58
Tolerancia	43	70
¿Eliminable?	SI	SI

Tabla 7.7.10 Límites del Caudal Sobrante al ralentí

7.7.3.3. Presión Venturi (217)

Aquí (Fig. 7.7.11 y Tabla 7.7.11), aun siendo el margen más reducido, el límite superior natural todavía está por debajo del requerido con lo que, por el momento, todas las medidas del ralentí son candidatas a ser eliminadas

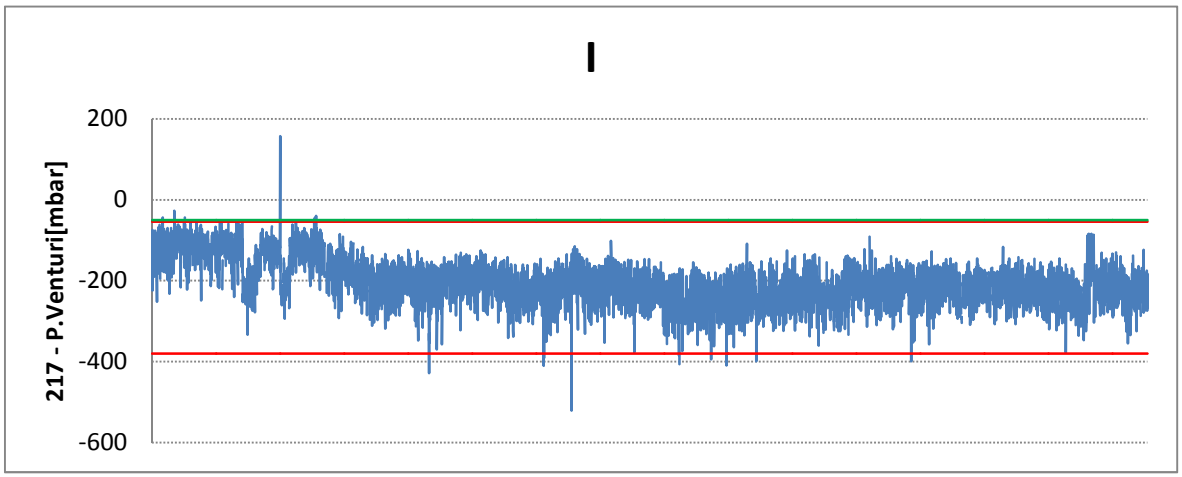

Fig. 7.7.11 Gráfico I de la Presión Venturi al ralentí

Límites	Inferior[mbar]	Superior[mbar]
Distribución	-380	-54
Tolerancia	-999[1]	-50
¿Eliminable?	SI	SI

Tabla 7.7.11 Límites de la Presión Venturi al ralentí

[1] Es eliminable siempre ya que el valor *-999* representa un límite abierto

7.7.3.4. Par motor (917)

Con esta medida (Fig. 7.7.12 y Tabla 7.7.12), se llega a límite del margen entre límite natural y límite requerido, o dicho de otro modo, de nuevo hay un caso de frontera entre límites. Aun siendo un caso extremo, técnicamente la medida es candidata a ser eliminada.

Así pues, todas las medidas de este punto de ensayo (ralentí) son candidatas a ser eliminadas con lo que este es el primer punto de ensayo que es posible eliminar de cierto porcentaje de bombas con el objetivo de ahorrar tiempo.

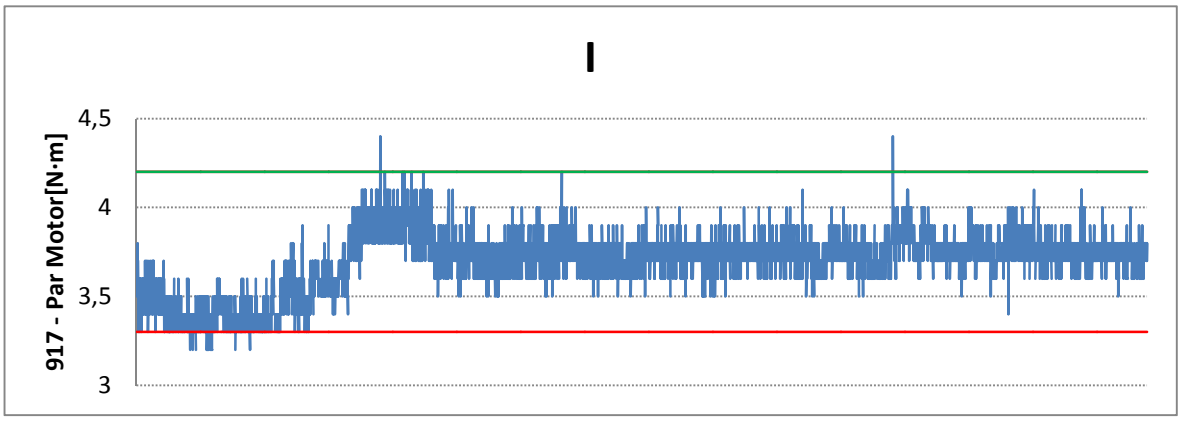

Fig. 7.7.12 Gráfico I del Par Motor al ralentí

Límites	Inferior[N·m]	Superior[N·m]
Distribución	3,3	4,2
Tolerancia	0[1]	4,2
¿Eliminable?	SI	Caso límite

Tabla 7.7.12 Límites del Par Motor al ralentí

[1] Es eliminable siempre ya que el valor *-0* representa un límite abierto

7.7.4. Arranque

7.7.4.1. Caudal Rail (18)

Este caso (Fig. 7.7.13 y Tabla 7.7.13) resulta un tanto particular ya que, debido a la precisión de los datos, había variaciones demasiado grandes para determinar con suficiente exactitud cuál era el límite que dejaba fuera de la distribución al 3‰ de las bombas. Por ejemplo, si se escogía el valor de 1,2 como límite natural inferior, el porcentaje de las bombas fuera de la distribución era un 3,3‰ y en cambio si se escogía el 1,1 como límite el porcentaje de las bombas fuera de distribución caía hasta el 0,4‰ con lo cual es evidente que el valor que dejaría fuera al 1,5‰ de las bombas estará entre 1,2 y 1,1 pero para determinarlo sería necesario obtener datos con una mayor precisión. Ocurre exactamente lo mismo con el límite superior e incluso de una forma más pronunciada ya que pasar de 2,2 a 2,3 como límite modificaba el porcentaje de bombas de 50,32‰ (5,03%) a 0,8‰.

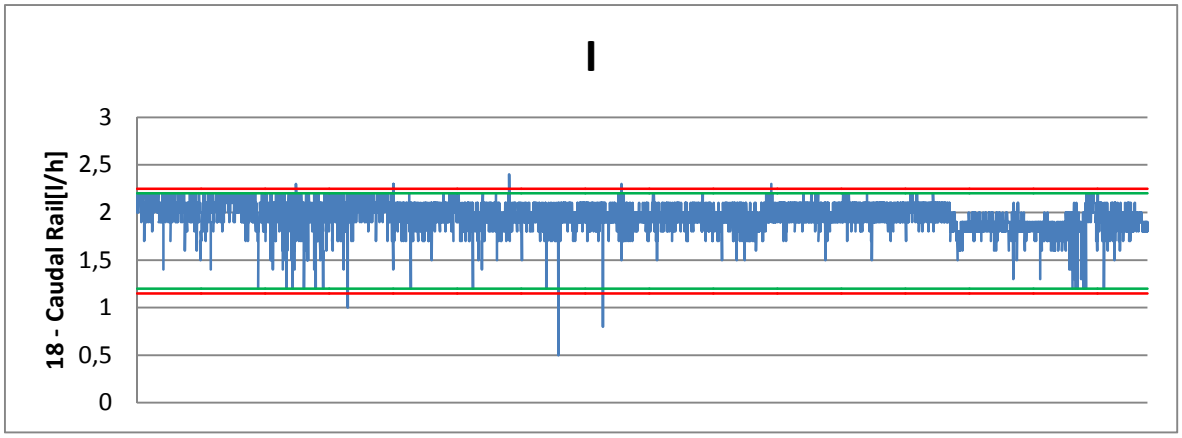

Fig. 7.7.13 Gráfico I del Caudal Rail al arranque

Límites	Inferior[l/h]	Superior[l/h]
Distribución	1,15	2,25
Tolerancia	1,2	2,2
¿Eliminable?	NO*	NO*

Tabla 7.7.13 Límites del Caudal Rail al arranque

Así pues, a pesar de no ser técnicamente aceptable, si se tiene en cuenta la falta de precisión de los datos y que, como se verá más adelante, ésta es la única medida no eliminable, se puede asumir el riesgo frente a las ventajas que supone. Todo esto, claro está, como primera aproximación ya que se vería en las pruebas iniciales de la puesta en marcha si es asumible o no este riesgo añadido.

7.7.4.2. Caudal sobrante (118)

Aquí se puede apreciar tanto en la Fig. 7.7.14 como en la Tabla 7.7.14 que la medida es eliminable al tener los límites naturales claramente más cerrados que los requeridos por las especificaciones.

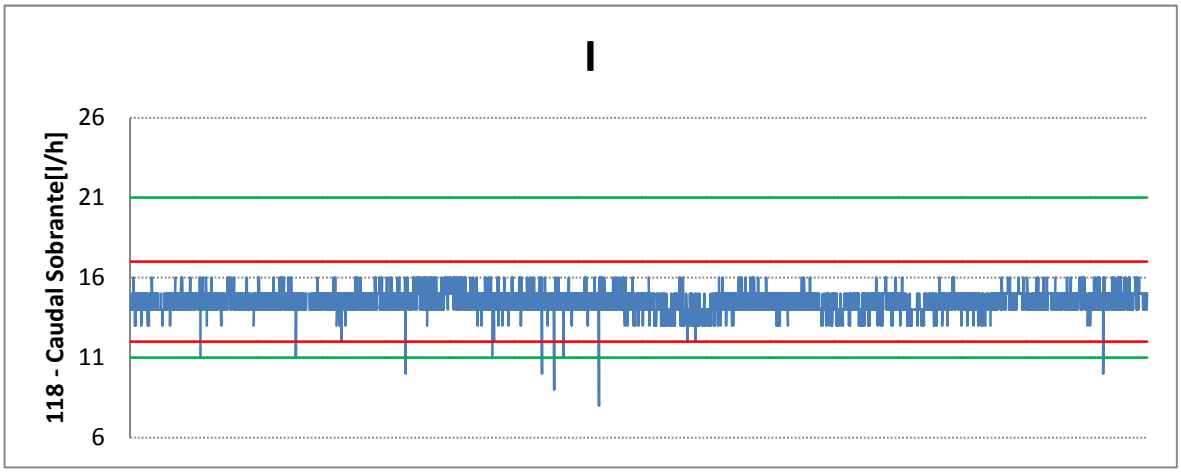

Fig. 7.7.14 Gráfico I del Caudal Sobrante al arranque

Límites	Inferior [l/h]	Superior[l/h]
Distribución	12	17
Tolerancia	11	21
¿Eliminable?	SI	SI

Tabla 7.7.14 Límites del Caudal Sobrante al arranque

7.7.4.3. Par motor (918)

En este caso (Fig. 7.7.15 y Tabla 7.7.15) se repite la situación inmediatamente anterior: margen más que suficiente para eliminar esta medida.

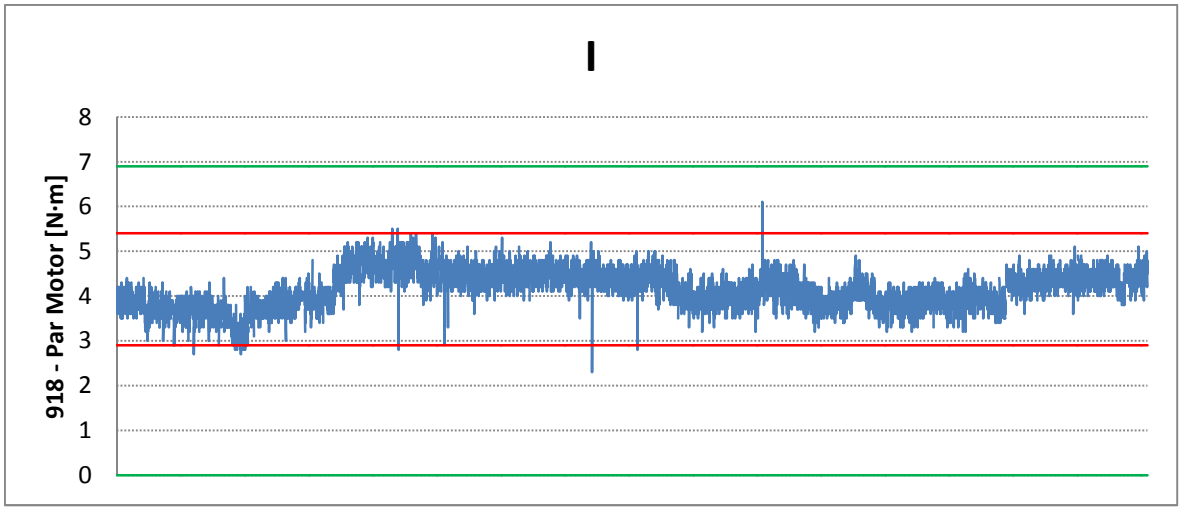

Fig. 7.7.15 Gráfico I del Par Motor al arranque

Limites	Inferior [N·m]	Superior [N·m]
Distribución	2,9	5,4
Tolerancia	0[1]	6,9
¿Eliminable?	SI	SI

Tabla 7.7.15 Límites del Par Motor al arranque

Con lo que, a pesar del caso del Caudal Rail, esta medida se considera como eliminable de cierto porcentaje de bombas con el objetivo de ahorrar tiempo.

Recopilando se tiene que, de las 15 medidas son candidatas a ser eliminadas 11. Sin embargo, como ya se ha dicho, no tiene sentido eliminarlas si no son conjuntamente con el resto de medidas de un punto de ensayo con lo cual realmente solo se pueden eliminar 7 de

[1] Es eliminable siempre ya que el valor *-0* representa un límite abierto

las 11 candidatas. Éstas corresponden a las medidas del ralentí y del arranque. La eliminación de estas medidas en el test-plan supone un ahorro de 22 segundos por bomba con lo cual, a partir de este punto, solo es necesario conocer qué porcentaje de bombas se ensayarán con el test-plan reducido para saber cuál es el ahorro total de tiempo o, lo que es lo mismo, la cantidad de bombas adicionales que se podrían ensayar en ese tiempo adicional.

8. Puesta en marcha

Los datos expuestos a partir de este punto ya no se basan en experiencias del autor en la empresa sino que se plantea un escenario posible para poder tener los datos necesarios para evaluar el impacto económico del proyecto. Esto se debe a que el proyecto "real" está pendiente de la aprobación del departamento técnico de toda la división y, al ser un centro externo a la planta resulta ser un proceso largo ya que, además el cliente ha de dar el visto bueno a los cambios propuestos.

Así pues, como prueba inicial para simplificar el proceso de reconfiguración de la línea se decide ejecutar el test-plan corto en el 100% de las bombas de 1 solo banco. Esto supone un 4.35% de las bombas totales (1 de 23 bancos asumiendo que pasa la misma cantidad de bombas por cada banco).

Para realizar una validación del cambio se considera suficiente una semana de pruebas. Durante esta semana todas las bombas comprobadas con el banco con el test-plan reducido se ensayarán por segunda vez en otro banco para corroborar que la cantidad de bombas defectuosas que se "escapan" por el hecho de no realizar todas las medidas no sea mayor a la prevista (3‰). Estas pruebas suponen una pérdida de tiempo en los bancos la cual cosa significa que el número de bombas ensayadas será menor durante las pruebas y por tanto existirá una pérdida de ingresos que se contabilizará como "inversión" en el apartado de impacto económico.

Una vez superado el periodo de prueba la línea se ha de reconfigurar para que, de forma aleatoria, los bancos ejecuten el test-plan corto en el porcentaje de bombas deseado. Este porcentaje puede (y debe) ser modificable en función de la situación de la planta en cuanto a calidad se refiere. Por ejemplo, en épocas sin crisis de calidad el porcentaje se puede relajar hasta una reducción del 60-70% de las bombas comprobadas con el test-plan completo y en casos de problemas con la calidad de la fabricación o montaje se puede aumentar hasta el 90% o incluso el 100% para asegurar que no se expide ninguna bomba defectuosa. Evidentemente, cuanta mayor proporción de bombas se ensayen con el test-plan corto mayor será el beneficio y también mayor el riesgo de enviar a cliente una bomba defectuosa y viceversa.

En el presente proyecto se considera una situación intermedia-conservadora de un porcentaje del 30% de bombas comprobadas con el programa corto.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que, aunque teóricamente si se ensayan el 100% de las bombas con el test-plan corto la probabilidad de enviar una bomba defectuosa a cliente es del 3‰, en la realidad esta probabilidad es menor ya que las medidas que se han mantenido en el programa de test están relacionadas con las eliminadas. Es decir, una bomba si la bomba es defectuosa en las medidas eliminadas, seguramente también resultara defectuosa en las medidas que se han mantenido y por tanto se detectará. En resumen, muy pocas bombas resultarán defectuosas en las medidas de ralentí y arranque sin resultar defectuosas en máxima potencia y máximo par. Además, en el caso de que una bomba comprobada con el test-plan corto resulte estar fuera de tolerancias en las medidas conservadas, se volverá a comprobar con el test-plan largo para asegurar que se comprueban todas las medidas.

Aun así, el escenario que se considera en este proyecto será el peor de los posibles y por tanto se asume que la probabilidad de error es la teórica y por tanto la máxima.

9. Análisis económico

9.1. Presupuesto

A continuación se detallarán los gastos asociados a la elaboración del presente proyecto pero antes cabe comentar que es necesario tener en cuenta una serie de aspectos para entender mejor dicho presupuesto.

Al tratarse de un estudio de viabilidad de reducción de tiempo de un proceso existente no ha habido gasto alguno en material ya que, por un lado los datos utilizados en el estudio estadístico principal han sido obtenidos a partir de la base de datos ya existente y por el otro, los datos utilizados en el estudio R&r que, a pesar de haber realizado pruebas in situ, las bombas utilizadas se devolvieron a la cadena de producción y siguieron su curso normal con lo que no hubo ninguna pérdida. Además, todos los cambios propuestos a partir de los resultados obtenidos son puramente reconfiguraciones de software.

Así pues, únicamente se considerarán los gastos asociados a los recursos humanos utilizados y, como ya se ha dicho, también se contabilizarán como gasto el descenso de ingresos debido a las pruebas de la puesta en marcha descrita en el punto anterior.

Para hacer el cálculo de las horas invertidas por el ingeniero junior en el proyecto se ha utilizado un tercio de las horas que el autor ha trabajado en la empresa ya que es aproximadamente la proporción de tiempo empleado en este proyecto (el autor realizaba otros proyectos al mismo tiempo). En el caso del ingeniero sénior se ha considerado que ha invertido la mitad de las horas que el ingeniero junior. A pesar de que evidentemente unas prácticas en empresa no están remuneradas a 60€/h se ha considerado este coste horario para simular la contratación de un servicio de consultoría y hacer el presupuesto más realista.

En cuanto al coste de las bombas no vendidas se ha calculado a partir del tiempo empleado para realizar el test-plan corto durante las pruebas. Durante una semana la producción de DFP1.15 es de aproximadamente 10 000 unidades con lo que la cantidad de bombas que pasa por cada banco es de:

$$Bombas\ por\ banco = \frac{10000}{23} = 434.78 = 435\ bombas \qquad \text{(Ec. 9.1.1)}$$

Si la duración del test-plan corto es de 218 segundos se obtiene un tiempo total de:

$$tiempo\ total = 435 \cdot 218 = 94830\ s \qquad \text{(Ec. 9.1.2)}$$

Así pues, teniendo en cuenta que la duración del test-plan normal es de 240s:

$$Bombas\ \text{perdidas} = \frac{94830}{240} = 395.125 = 396\ bombas \qquad \text{(Ec. 9.1.3)}$$

En resumen, en la Tabla 9.1.1 se puede ver el desglose completo del presupuesto

RECURSOS HUMANOS			
Partida	h	Coste por hora [€/h]	Coste total [€]
Ingeniero Junior	400	60	24000
Ingeniero Sénior	200	120	24000
TOTAL RECURSOS HUMANOS			**48000**
OTROS GASTOS			
Partida	u	Coste unitario [€/u]	Coste total [€]
Bombas no vendidas	396	121	47916
Bombas no fabricadas	396	-107.5	-42570
Varios	-	-	100
TOTAL OTROS GASTOS			**5446**
		TOTAL	**53446**

Tabla 9.1.1 Desglose del Presupuesto

9.2. Viabilidad económica

En todo proyecto no sólo es importante conocer el coste de implantación sino también la rentabilidad del mismo ya que por muy correcto que sea en el ámbito técnico, si no resulta viable económicamente el proyecto no tendrá futuro.

A continuación se detallan los cálculos necesarios para obtener los valores de todas las partidas que participan en el estudio económico.

- Fondos Invertidos: los fondos invertidos son precisamente los detallados en el apartado de presupuesto (53 446€)

- Incremento bombas vendidas: la cantidad de bombas adicionales que se pueden ensayar se obtiene a partir del incremento de tiempo disponible debido al test-plan corto.

  Primero se calcula el tiempo disponible actualmente a partir de la producción anual y la duración del test-plan original:

$$t\ total\ disponble = 50\ sem \cdot 10\ 000 \frac{u}{sem} \cdot 240 \frac{s}{u} \qquad \text{(Ec. 9.2.1)}$$
$$= 120\ 000\ 000s == 33\ 333.33h$$

  Seguidamente se calcula el tiempo invertido en ensayar la misma cantidad de bombas pero comprobando un 30% de éstas con el test-plan corto:

$$t\ test\ corto = 50sem\left(10\ 000 \frac{u}{sem} \cdot 240 \frac{s}{u} \cdot 70\% + 10\ 000 \frac{u}{sem} \cdot 218 \frac{s}{u} \cdot 30\%\right) =$$
$$= 116\ 700\ 000s = 32\ 416.67h$$

(Ec. 9.2.2)

  Con lo cual el aumento de tiempo disponible es de:

$$\Delta t = 120\ 000\ 000 - 116\ 700\ 000 = 330\ 000s = \ 916.67h \qquad \text{(Ec. 9.2.3)}$$

  El cual se utilizará para ensayar nuevas bombas:

$$\Delta bombas = \frac{330\ 000s}{(240 \frac{s}{u} \cdot 70\% + 218 \frac{s}{u} \cdot 30\%)} = 14138.82 \qquad \text{(Ec. 9.2.4)}$$
$$= 14\ 138\ u$$

  Con lo que el aumento de ingresos anuales será de:

$$\Delta ingresos = 14138u \cdot 121 \frac{€}{u} = 1\ 710\ 698€ \qquad \text{(Ec. 9.2.5)}$$

- Incremento de coste bombas: en esta partida se contabiliza el coste asociado al material más el valor añadido de las bombas de más fabricadas gracias al aumento de tiempo disponible

$$\Delta costes = 14138u \cdot 107.5 \frac{€}{u} = 1\ 519\ 835€ \qquad \text{(Ec. 9.2.6)}$$

- Bombas en garantía: esta partida es la correspondiente a los gastos generados por el posible incremento de bombas devueltas por el cliente debido a la reducción del control de las medidas

  Así pues, la cantidad de bombas que se prevén serán devueltas es:

$$devoluciones = 50sem\left(10\,000\frac{u}{sem}\cdot 0.3\%\ error^{1}\cdot 30\%\right) = 450\ u/año \quad \text{(Ec. 9.2.7)}$$

  Con lo que, junto el coste de sustitución de cada bomba tendremos:

$$coste\ devoluciones = 450\frac{u}{año}\cdot 250\frac{€}{u} = 112\,500€ \quad \text{(Ec. 9.2.8)}$$

Estos son todos los conceptos que intervienen en el análisis económico con lo que a continuación, en las tablas siguientes (Tabla 9.2.1 y Tabla 9.2.2) se puede ver un resumen así como la evolución económica

FONDOS INVERTIDOS	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3
Inversión tareas	48000,00			
Inversión materiales	5446,00			
TOTAL FONDOS INVERTIDOS	**53446,00**			

Tabla 9.2.1 Fondos invertidos

FONDOS GENERADOS	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3
Incremento bombas vendidas		1710698,00	1710698,00	1710698,00
(+)Total Ingresos		**1710698,00**	**1710698,00**	**1710698,00**
Incremento bombas fabricadas		1519835,00	1519835,00	1519835,00
Bombas en garantía		112500,00	112500,00	112500,00
(-) Total Gastos		**1632335,00**	**1632335,00**	**1632335,00**
(-) Amortizaciones		**0,00**	**0,00**	**0,00**
BAI		**78363,00**	**78363,00**	**78363,00**
Impuestos (30%)		23508,90	23508,90	23508,90
BdI		**54854,10**	**54854,10**	**54854,10**
(+) Amortizaciones		**0,00**	**0,00**	**0,00**
TOTAL FONDOS GENERADOS	-53446,00	54854,10	54854,10	54854,10
FLUJO DE CAJA ACUMULADO	-53446,00	1408,10	56262,20	111116,30

Tabla 9.2.2 Fondos Generados

[1] Equivalente al 3‰ fuera de la distribución (6σ)

Es necesario añadir que la partida correspondiente a amortizaciones es nula debido a que no ha habido ninguna inversión en bienes materiales.

Finalmente, utilizando una tasa de actualización del 4% se obtienen los siguientes indicadores económicos:

- VAN: 94 979.92 €
- TIR: 87%
- Pay-Back: 1 años

El estudio se ha realizado a 3 años vista ya que el contrato para la fabricación de este modelo de bomba precisamente finaliza el año 2014.

Como se puede ver con los indicadores la inversión es claramente rentable. A pesar de que era esperable un resultado positivo ya que no había prácticamente gastos y en cambio el aumento de ingresos era evidente, no se esperaba unos indicadores tan favorables. El valor que alcanza el TIR indica que es una inversión realmente segura. Además, el pay-back es de 1 solo año con lo que no es necesario esperar mucho para empezar a observar beneficios globales.

Otro aspecto a tener muy en cuenta es que este resultado se ha obtenido reduciendo el test-plan únicamente en un 30% de las bombas con lo que si se aumenta esta proporción los resultados serán aún más favorables.

10. Estudio de impacto ambiental

Una evaluación de impacto ambiental (EIA) es la identificación de las posibles consecuencias que una actividad humana puede producir en el medio ambiente: el equilibrio ecológico, la calidad de vida o la preservación de los recursos naturales son factores a considerar. Es una aspecto muy importante para cualquier proyecto predecir la repercusión ambiental que puede tener.

Un EIA desfavorable condiciona la viabilidad del proyecto ya que cada vez hay más concienciación por la protección del medio ambiente y se limitan los impactos de los nuevos proyectos de innovación tecnológica mediante una normativa ambiental cada vez más estricta.

Los aspectos ambientales a considerar en este proyecto son el aceite que circula por las bombas mientras se ensayan en los bancos de test, la energía consumida por estos mismos bancos y las emisiones derivadas del transporte de las bombas.

10.1. Aceite

A pesar de que ya se ha explicado anteriormente, se recuerda que el aceite utilizado en los bancos de test se utiliza tanto para poder medir caudales como para evitar que la bomba se gripe. El aceite lleva un sustancia trazadora que brilla con la luz ultravioleta que permite detectar fácilmente si ha habido fugas durante el ensayo en los bancos.

El aceite tiene unas propiedades muy similares al gasóleo utilizado en los motores de automóvil por una sencilla razón: cuanto más parecido sea el fluido en las pruebas más fiable será la predicción de funcionamiento. Sin embargo, esta necesidad también implica que la nocividad del aceite es similar a la del gasóleo y por eso este aceite necesita ser tratado en plantas especializadas.

El presente proyecto, al hacer una reducción de tiempo de ciclo, reduce la cantidad de aceite empleado por cada bomba (en promedio) con lo cual el impacto ambiental por bomba producida se ve reducido respecto a este punto.

10.2. Energía consumida

Evidentemente, los bancos utilizados para ensayar las bombas consumen energía eléctrica y por lo tanto, en origen generan emisiones de CO_2 a no ser que la generación sea a partir de energías renovables.

Por la misma razón que el punto anterior, la energía consumida por cada bomba en promedio se verá reducida con lo cual las emisiones de CO_2 también disminuirán.

10.3. Emisiones derivadas del transporte

Las expediciones de las bombas hacia los clientes se realizan mediante camiones de gran tonelaje o incluso en avión si el destino está muy alejado y se trata de un envío urgente. Esto significa que las emisiones derivadas de dicho transporte han de ser seriamente consideradas en el estudio de impacto ambiental.

Debido al incremento de probabilidad de generar bombas defectuosas estas emisiones se verán incrementadas ya que, evidentemente, si el cliente detecta una bomba defectuosa, ésta será recogida y se entregará una nueva unidad. Además, la bomba defectuosa volverá a planta para ser reparada con lo que la cantidad de kilómetros que hacen las bombas en promedio se verá aumentado. Por consiguiente, al estar directamente relacionadas distancia y emisiones, las emisiones de CO_2 y otros gases contaminantes se verán aumentadas en promedio.

Conclusiones

Después de la realización de este proyecto se pueden extraer varias conclusiones interesantes. Como no, para empezar, resulta evidente que el presente proyecto es realmente rentable y si además se tiene en cuenta la facilidad con la que se podría llevar a cabo, resulta sorprendente que no se haya ejecutado antes.

Por otro lado cabe comentar las dificultades que han existido para procesar los datos con lo que se puede apreciar que cuando se trata de datos reales, éstos no tienen una distribución tan idónea como en ejemplos teóricos con lo que, desde la obtención de dichos datos hasta su explotación puede pasar un mundo. Todo esto, claro está, si se quieren obtener unos resultados válidos. También es remarcable el hecho de que estas dificultades no son debidas exclusivamente a la naturaleza de los datos sino que hay otros factores externos que influyen.

Y precisamente éste es el último punto remarcable de las conclusiones. La falta de control debido a un seguimiento de la calidad bastante mejorable provocan casos como los que se han visto en el estudio R&r. Esta falta de integración en todos los niveles de la gestión de calidad explica la cantidad de crisis sufridas en Delphi. En este proyecto se ha visto solo una pequeña muestra donde se puede apreciar el gran potencial de mejora existente. Por poner un ejemplo, un seguimiento mediante gráficos de control haría mucho más estable todo el proceso productivo.

Resumiendo, en este proyecto se ha podido observar el potencial de mejora de la planta, las dificultades para conseguir resultados fiables y un claro y rentable ejemplo de mejora.

Agradecimientos

Como es natural querría comenzar los agradecimientos a Delphi Diesel por haberme dado la oportunidad de desarrollar este proyecto en su planta de Sant Cugat y más concretamente a Francisco Cabezos y a Jona Gómez por su permanente disposición a ayudar. También me gustaría agradecer a Pilar Mella y a Jaime Sanz por su comprensión durante mi periodo de prácticas en su departamento.

A Xavier Tort, ponente de este proyecto, quiero darle las gracias por su esfuerzo por ayudarme a pesar de su apretada agenda.

En otro ámbito, aunque no menos importante, querría agradecer a Filipa da Silva su gran apoyo en los momentos más difíciles. Estoy convencido que este proyecto no hubiese sido el mismo sin su ayuda.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

[1] LAGOS, I.J., VARGAS, J.A., *Revista Colombiana de Estadística*. Vol. 26, Nº 1, Junio 2003, p. 25-40

Bibliografía complementaria

[2] LEVINE, D.M. *Statistics for Six Sigma Green Belts with Minitab and JMP*, New Jersey: Pearson Education. 2006.