



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Optimización del rendimiento de un motor de encendido
provocado mediante modificaciones internas y de periféricos*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Antonio Peñalver Alcaraz

DIRECTOR: Guillermo Lareo Calviño

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Optimización del rendimiento de un motor de encendido
provocado mediante modificaciones internas y de periféricos*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Grado analiza la optimización del rendimiento del motor de encendido provocado PSA TU5JP4 (NFU) de serie hacia un entorno de competición. El objetivo es incrementar su eficiencia volumétrica y respuesta dinámica mediante modificaciones internas y de sistemas periféricos, fundamentadas en actuaciones de diversa índole del ámbito de la ingeniería mecánica.

La metodología se estructura en cuatro fases: (I) establecimiento de la línea base en banco de potencia (108 CV); (II) selección de componentes mediante estrategia de modularidad técnica (cross-model sourcing) y aftermarket; (III) integración mecánica; y (IV) validación final.

Entre las actuaciones implementadas, se incluyen, por citar algunas, la sustitución de árboles de levas (NFU→NFX) junto con poleas Vernier, la optimización de la admisión con mariposa de mayor diámetro, inclusión de colectores de escape 4-2-1, aligeramiento del volante motor (-48,6%) o reprogramación de la ECU. Asimismo, se ha adoptado una transmisión de relaciones cerradas y un sistema de refrigeración de alta conductividad.

Los resultados certificados en banco de potencia arrojan 137 CV y 167 Nm, suponiendo un incremento neto del 26,3% en potencia. Se concluye que una adecuada integración de actuaciones en admisión, distribución y escape, junto a la gestión de inercias, es el factor determinante para maximizar el potencial de la plataforma de forma coste-efectiva.

PALABRAS CLAVE

Motor de encendido provocado, eficiencia volumétrica, optimización del rendimiento, dinámica de gases, modificaciones.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia. Han sido mi mayor apoyo y el motor que me ha dado fuerzas para seguir adelante en cada proyecto. Gracias por estar siempre ahí, por vuestra colaboración incondicional y por proporcionarme todo lo necesario en cada momento, permitiéndome alcanzar esta meta.

Quiero hacer una mención especial a la persona que más ha caminado a mi lado en este proceso: mi hermano, Fran. Gracias por las incontables horas y días trabajando codo con codo, sin descanso. De este proyecto nos llevamos momentos inolvidables, tanto los buenos como los de máxima exigencia, que no han hecho más que reforzar nuestra relación. Gracias por ser mi apoyo fundamental en el proyecto y en la vida.

A mis amigos, pilares esenciales en mi camino. Gracias a todos los que os habéis prestado voluntarios para dedicar horas de vuestro tiempo a este motor, y a quienes habéis aportado vuestro granito de arena de cualquier otra forma. Sin vuestra ayuda, nada de lo que estoy consiguiendo sería posible. Gracias de corazón a Jaime, José Javier, Juanma, Dioni, Pepe, Diego, Juan, José, Joaquín, Cristian, Álvaro, Toni, Víctor, Antonio, Elena, Sole, Carmen, Nuria, Sarah y Patri.

A mis compañeros de promoción, y de forma muy especial a mi camareta. Habéis sido quienes habéis sufrido el día a día, soportando toda la montaña rusa de emociones que conlleva la ingeniería, desde las alegrías por los logros alcanzados hasta los momentos de enfado y desesperación. Gracias por la convivencia y por hacer este camino más llevadero.

Finalmente, quiero agradecer a mi tutor de TFG, Guillermo Lareo Calviño. Gracias por ser el director de esta orquesta, marcando las pautas con firmeza y siendo un guía excepcional. Gracias por aceptar este reto cuando aún no sabíamos a dónde nos llevaría, pero teniendo claro que trabajaríamos duro por el mejor resultado. Le agradezco profundamente el tiempo dedicado a corregir y mejorar cada detalle, y especialmente el no haberme permitido relajarme cuando las cosas salían bien, exigiéndome siempre un poco más para sacar la mejor versión de este proyecto. Muchas gracias, profesor.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos.....	7
1.1 Introducción	7
1.2 Motivaciones.....	7
1.3 Objetivos	8
2 Estado del arte.....	9
2.1 Fundamentos y clasificación general de las máquinas térmicas	9
2.1.1 Definición y principio de funcionamiento	9
2.1.2 Clasificación general.....	10
2.2 Partes principales de un motor	12
2.2.1 Bloque motor y conjunto interno	13
2.2.2 Sistema de distribución y culata.....	14
2.2.3 Sistemas de admisión	14
2.2.4 Sistemas de escape	15
2.2.5 Periféricos	16
2.3 Evolución tecnológica de los motores de encendido provocado	17
2.3.1 Culata y cinemática de válvulas.....	17
2.3.2 Termodinámica de los ciclos de trabajo reales	18
2.3.3 Dinámica de gases no estacionaria.....	18
2.3.4 Avances en sistemas de alimentación y control.....	19
2.3.5 Evolución de materiales	19
2.3.6 Simulación numérica: la nueva era del diseño	20
2.4 Motores PSA (Peugeot Société Anonyme).....	21
2.4.1 Contexto histórico y posicionamiento de PSA	21
2.4.2 Motores de la familia TU	21
2.5 Tecnologías de optimización de rendimiento	22
2.5.1 Bloque motor y conjunto interno	22
2.5.2 Sistema de distribución y culata.....	24
2.5.3 Sistemas de admisión	27
2.5.4 Sistemas de escape	28
2.5.5 Masas rotativas y alternativas	30

2.5.6	Sistemas de transmisión	31
2.5.7	Gestión electrónica del motor	32
2.5.8	Sistema de refrigeración de alta eficiencia	34
3	Desarrollo del TFG	37
3.1	Metodología	38
3.1.1	Fase I: Establecimiento de la línea base.....	39
3.1.2	Fase II: Selección y análisis de compatibilidad de componentes	40
3.1.3	Fase III: Integración, montaje y adaptación mecánica.....	40
3.1.4	Fase IV: Validación final y correlación de resultados	41
3.2	Instrumentación y equipos de medida.....	42
3.2.1	Instrumentos de metrología.....	42
3.2.2	Instrumentos de la fase de ejecución.....	44
3.2.3	Instrumentos de validación	45
3.3	Toma de datos	46
3.3.1	Bloque motor y pistones	46
3.3.2	Cigüeñal y bielas	47
3.3.3	Válvulas	49
3.4	Actuaciones.....	50
3.4.1	Bloque motor y conjunto interno	50
3.4.2	Sistema de distribución y culata.....	51
3.4.3	Sistemas de admisión	57
3.4.4	Sistemas de escape	59
3.4.5	Masas rotativas y alternativas	60
3.4.6	Sistemas de transmisión	64
3.4.7	Gestión electrónica de motor	66
3.4.8	Sistema de refrigeración de alta eficiencia	68
4	Resultados / Validación / Prueba	71
4.1	Análisis del motor	72
4.2	Análisis de relaciones de transmisión	74
4.3	Análisis del sistema de refrigeración	76
4.4	Análisis masas rotativas	76
4.5	Soluciones de fabricación y ajustes de precisión	77
4.6	Fiabilidad mecánica	78
4.7	Limitaciones de medición	78
5	Conclusiones y líneas futuras.....	79
5.1	Conclusiones	79

5.1.1	Optimización del motor	79
5.1.2	Ingeniería de transmisión	79
5.1.3	Viabilidad económica y sostenibilidad del proyecto	79
5.2	Líneas futuras	80
6	Bibliografía	81
	Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	83
	Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	84
	Anexo III: Glosario de términos.....	85
	Anexo IV: Uso responsable de la inteligencia artificial.....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Partes de un pistón (fuente: [2]).....	10
Figura 2-2. Ciclo de cuatro tiempos (izquierda) y de dos tiempos (derecha) (fuente: <i>wikimedia</i>) ..	11
Figura 2-3. Motor TU9 y despiece motor (fuente: <i>wikimedia</i> y autoría propia)	12
Figura 2-4. Bloque motor y conjunto interno (fuente: autoría propia).....	13
Figura 2-5. Sistema de distribución y culata (fuente: autoría propia)	14
Figura 2-6. Sistemas de admisión (fuente: autoría propia)	15
Figura 2-7. Sistemas de escape (fuente: autoría propia).....	15
Figura 2-8. Periféricos (fuente: autoría propia).....	17
Figura 2-9. Funcionamiento de la distribución desmodrómica (fuente: <i>wikimedia</i>).....	18
Figura 2-10. Curtain area y culata tipo rent-poop (fuente: autoría propia y <i>wikimedia</i>)	18
Figura 2-11. Pistón forjado (fuente: autoría propia).....	23
Figura 2-12. Árboles de levas (fuente: autoría propia).....	25
Figura 2-13. Válvula modificada y válvula normal (fuente: autoría propia)	27
Figura 2-14. Enfriador de aceite de Audi (fuente: <i>wikimedia</i>).....	35
Figura 3-1. Motor NFU (fuente: autoría propia)	37
Figura 3-2. Fases del desarrollo del proyecto (fuente: autoría propia).....	39
Figura 3-3. Clasificación instrumentos de medida según función técnica (fuente: autoría propia) .	42
Figura 3-4. Galgas de espesores (fuente: <i>wikimedia</i>).....	43
Figura 3-5. Goniómetro (fuente: <i>wikimedia</i>).....	43
Figura 3-6. Llave dinamométrica (fuente: <i>wikimedia</i>).....	44
Figura 3-7. Banco de potencia de rodillos inerciales (fuente: <i>dynostar</i>).....	45
Figura 3-8. Zonas de mecanizado preventivo (fuente: autoría propia)	52
Figura 3-9. Árboles de levas del motor NFU (fuente: autoría propia)	52
Figura 3-10. Diagrama circular de admisión y escape del motor NFU (fuente: autoría propia).....	53
Figura 3-11. Árboles de levas del motor NFX (fuente: autoría propia)	53
Figura 3-12. Diagrama circular de admisión y escape del motor NFX (fuente: autoría propia).....	54
Figura 3-13. Poleas NFU y NFX (fuente: autoría propia).....	55
Figura 3-14. Distribución montada y marcada (fuente: autoría propia).....	56
Figura 3-15. Cuerpo de admisión y mariposa de NFX (fuente: autoría propia)	57
Figura 3-16. Adaptación del cuerpo de admisión (fuente: autoría propia).....	57
Figura 3-17. Válvula de ralentí defectuosa (fuente: autoría propia)	58
Figura 3-18. Campana de admisión tipo Brozi y filtro de aire Green (fuente: autoría propia)	59
Figura 3-19. Colectores de escape 4-2-1 (fuente: autoría propia)	59
Figura 3-20. Línea de escape acero inoxidable (fuente: autoría propia)	60
Figura 3-21. Volante de inercia aligerado (fuente: autoría propia)	61

Figura 3-22. Polea de accesorios original y modificada (fuente: autoría propia)	62
Figura 3-23. Llantas Speedline 15” (fuente: autoría propia).....	62
Figura 3-24. Pinza de freno Brembo 4 pistones (fuente: autoría propia)	63
Figura 3-25. Bomba de freno de Peugeot 406 Coupé (fuente: autoría propia)	63
Figura 3-26. Ensamble caja de cambios MA5 (fuente: autoría propia)	65
Figura 3-27. Palieres reforzados y bujes cónicos (fuente: autoría propia)	66
Figura 3-28. Centralita de 1 pin (fuente: autoría propia).....	67
Figura 3-29. Instalación eléctrica simplificada (fuente: autoría propia)	67
Figura 3-30. Bujías Iridium BKR5EIX y bobina de encendido NFX (fuente: autoría propia).....	68
Figura 3-31. Radiador de aluminio junto con electroventiladores (fuente: autoría propia)	69
Figura 4-1. Gráficas de potencia y par motor (fuente: autoría propia).....	72
Figura 4-2. Velocidades en función de las RPM (fuente: autoría propia).....	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Medición del diámetro de los cilindros (fuente: autoría propia).....	46
Tabla 3-2. Medición de la altura de los cilindros (fuente: autoría propia)	46
Tabla 3-3. Medición del diámetro de los pistones (fuente: autoría propia).....	47
Tabla 3-4. Medición del diámetro de las muñequillas de biela (fuente: autoría propia).....	47
Tabla 3-5. Medición del espesor de las muñequillas de biela (fuente: autoría propia)	48
Tabla 3-6. Medición de la altura del cuerpo de biela (fuente: autoría propia)	48
Tabla 3-7. Medición del diámetro de la cabeza de biela (fuente: autoría propia)	48
Tabla 3-8. Medición del diámetro del pie de biela (fuente: autoría propia).....	48
Tabla 3-9. Medición del diámetro del vástago de las válvulas (fuente: autoría propia)	49
Tabla 3-10. Medición del diámetro del vástago de las válvulas (fuente: autoría propia)	49
Tabla 3-11. Medición del diámetro del vástago de las válvulas (fuente: autoría propia)	49
Tabla 3-12. Medición del diámetro del vástago de las válvulas (fuente: autoría propia)	49
Tabla 3-13. Comparación de lubricantes (fuente: autoría propia).....	51
Tabla 3-14. Diagrama de distribución de los árboles del motor NFU (fuente: autoría propia)	53
Tabla 3-15. Diagrama de distribución de los árboles del motor NFX (fuente: autoría propia)	54
Tabla 3-16. Relación de engranajes de serie (fuente: autoría propia)	64
Tabla 3-17. Relación de engranajes modificada (fuente: autoría propia)	65
Tabla 4-1. Medidas del neumático (fuente: autoría propia)	74

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La ingeniería de los motores de combustión interna de encendido provocado (MEP) ha experimentado una metamorfosis radical, evolucionando desde configuraciones elementales hacia sistemas de gestión integral contemporáneos. Esta progresión responde a una búsqueda incesante de la optimización de los rendimientos térmico y volumétrico. En las etapas primigenias, la formación de la mezcla dependía exclusivamente de la carburación, un sistema pasivo basado en el efecto Venturi con limitaciones intrínsecas en la dosificación estequiométrica bajo regímenes transitorios.

Con la llegada de la inyección electrónica multipunto y secuencial, como la que equipa el motor TU5JP4 (NFU) objeto de este estudio, la precisión en la entrega de combustible ha permitido alcanzar niveles de presión media efectiva (BMEP) significativamente superiores. No obstante, el motor de serie es un sistema de compromisos económicos y normativos; al intervenir de forma quirúrgica en componentes específicos, es posible liberar un rendimiento latente que la fabricación en serie restringe.

El presente trabajo nace de la inspiración y el respeto hacia la labor del Teniente de Navío Rey Lago (q.e.p.d.), quien realizó experimentos pioneros en la optimización de mecánicas atmosféricas mediante una metodología de ensayo y error controlada. Este TFG propone recoger aquel testigo y trasladarlo a una base mecánica de mayor complejidad tecnológica: un motor de inyección electrónica con culata multiválvula y doble árbol de levas (DOHC). El objetivo es explorar áreas críticas como la dinámica de ondas en colectores sintonizados, la reducción de inercias y la recalibración electrónica, demostrando que la aplicación de la termodinámica aplicada permite transformar el comportamiento de una planta motriz incluso con recursos limitados.

1.2 Motivaciones

Este proyecto no nace solo de la teoría académica, sino de mi experiencia directa en el mundo de la competición. Mi formación técnica se ha visto enriquecida por una trayectoria familiar en el ámbito de los rallyes, participando activamente en la evolución de vehículos de la plataforma PSA (Citroën AX, Saxo, Peugeot 106 y 206).

El nexo común en estas unidades ha sido el propulsor NFU, una planta motriz cuya robustez ha sido contrastada en las condiciones más severas. Sin embargo, la observación directa en carrera permitió identificar limitaciones inherentes a su configuración de serie: una entrega de par subóptima y valles de potencia en regímenes críticos. Esta experiencia de campo, fundamentada en años de asistencia técnica junto a mi progenitor, me otorgó un conocimiento profundo de la arquitectura interna de este motor,

motivando una investigación centrada en mitigar sus puntos débiles y maximizar su escalabilidad mecánica mediante el uso de componentes de alta calidad y soluciones de ingeniería a medida.

1.3 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es el análisis y justificación técnica de un conjunto de modificaciones mecánicas sobre el motor 1.6 16v (NFU), destinadas a incrementar su eficiencia volumétrica y su respuesta dinámica, aproximando sus niveles de rendimiento a los de propulsores de mayor calado tecnológico.

Se busca alcanzar los siguientes objetivos generales:

- Aplicación de las competencias de Ingeniería Mecánica.
- Implementar una metodología basada en el rigor y control de calidad.
- Desarrollar la capacidad de análisis crítico y toma de decisiones fundamentadas.

Para la consecución de este proyecto, se definen los siguientes objetivos específicos:

- Análisis y mejora de la línea de admisión.
- Incrementar la sintonía del sistema de escape.
- Modificación del diagrama de distribución.
- Reducción de masas rotativas y alternativas.
- Análisis y mejora de elementos de la transmisión.
- Adoptar un sistema de refrigeración de alta conductividad.
- Evaluación de la viabilidad económica y relación coste-rendimiento.
- Integración de los parámetros de control.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Fundamentos y clasificación general de las máquinas térmicas

2.1.1 Definición y principio de funcionamiento

Las máquinas térmicas se definen como sistemas transformadores de energía que operan dentro de un ciclo termodinámico [1] [2]. Su funcionamiento se basa en la absorción de calor proveniente de una fuente de alta temperatura para producir un trabajo y ceder el calor remanente a un foco frío [3].

En el ámbito de la ingeniería de automoción, este proceso se cuantifica mediante el rendimiento térmico, definido por la relación que se genera entre el trabajo obtenido y la energía suministrada [3] [4]. La optimización de este rendimiento, que es el núcleo de este TFG, implicar reducir las pérdidas de calor hacia las paredes de la cámara de combustión y maximizar la presión media efectiva (BMEP) sobre el pistón [1] [4] [5].

Antes de proceder con el análisis técnico, se definen los parámetros cinemáticos y termodinámicos que rigen el comportamiento de los motores de combustión interna:

- Combustión: Proceso fisicoquímico de oxidación exotérmica rápida, donde la combinación molecular del combustible con el comburente (oxígeno) transforma la energía química latente en energía térmica, generando productos de reacción y un incremento sustancial de la presión interna [6] [7].
- Relación de compresión (r): Parámetro adimensional que define la proporción entre el volumen máximo del cilindro, cuando el pistón se halla en el punto muerto inferior (PMI), y el volumen mínimo o volumen de la cámara de combustión, cuando el pistón alcanza el punto muerto superior (PMS). Es un factor determinante en el rendimiento térmico del ciclo [1] [6].
- Cilindrada (desplazamiento): Volumen total barrido por todos los pistones del motor durante su carrera desde el PMI al PMS. Matemáticamente, es el producto del área del pistón, la carrera y el número de cilindros [1] [8].
- PMS (Punto Muerto Superior): Posición geométrica del tren alternativo donde el pistón alcanza su cota máxima respecto al eje del cigüeñal, coincidiendo con el momento en que la velocidad lineal del pistón es nula antes de invertir su sentido de giro [6].
- PMI (Punto Muerto Inferior): Posición geométrica donde el pistón se halla en su cota mínima, marcando el final de la carrera de expansión o admisión y el volumen máximo del cilindro [6].

- Carrera (L): Distancia lineal recorrida por el pistón entre sus dos posiciones extremas (PMS y PMI). Este parámetro, junto con el diámetro del cilindro (bore), define la arquitectura del motor (cuadrado, supercuadrado o de carrera larga) [1] [6].

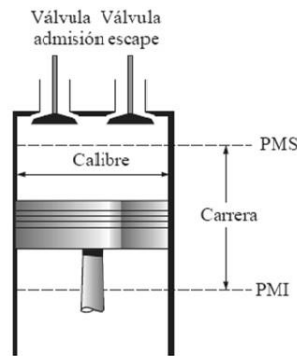


Figura 2-1. Partes de un pistón (fuente: [2])

- Ciclo termodinámico: Sucesión de procesos (admisión, compresión, expansión y escape) que experimenta un fluido operante. Se denomina ciclo teórico al modelo idealizado (como el Ciclo Otto) donde se omiten las pérdidas por bombeo y transferencia de calor, y ciclo real al que considera las irreversibilidades mecánicas y termodinámicas [6].
- Orden de encendido: Secuencia cronológica en la que se produce la combustión en los distintos cilindros. Su diseño tiene como objetivo equilibrar las fuerzas de inercia, minimizar las vibraciones torsionales en el cigüeñal y homogeneizar la entrega de par motor [2].
- Diagrama circular (diagrama de distribución): Representación gráfica y angular de un ciclo completo de trabajo en relación con la posición del cigüeñal (180° o 360°). En él se consignan los ángulos de apertura y cierre de las válvulas, permitiendo visualizar los adelantos y retrasos respecto a los puntos muertos, así como el periodo de solape o cruce de válvulas (overlap) [2].

2.1.2 Clasificación general

Atendiendo a la ubicación donde se produce la transformación de la energía química del combustible en energía térmica, los motores se dividen principalmente en dos categorías:

- Motores de combustión externa (MCE): En estas máquinas, la fuente de calor es externa al fluido de trabajo. Un ejemplo básico es la turbina de vapor, donde el calor se genera en una caldera y se transfiere al agua a través de un intercambiador. Presentan la ventaja de admitir combustibles de baja calidad, pero su baja relación peso/potencia los invalida para la automoción ligera actual [2].
- Motores de combustión interna (MCI): En estos motores, el propio fluido de trabajo es el que reacciona químicamente dentro de la cámara de combustión. Al eliminar el intercambiador de calor intermedio, los MCI logran alcanzar temperaturas de ciclo mucho más altas, lo que se traduce en una mayor eficiencia térmica y una compacidad que permite su integración en vehículos [9].

Dentro de los motores de combustión interna, existe una distinción fundamental basada en la temporalidad del proceso de quemado:

- Motores de movimiento circular (combustión continua): Representados principalmente por la turbina de gas y el motor Wankel. En las turbinas, los procesos de compresión, combustión y expansión ocurren de manera ininterrumpida en secciones dedicadas. Aunque ofrecen una

entrega de par muy suave y alta potencia específica, presentan dificultades para operar con eficiencia en cargas parciales y regímenes variables [8].

- Motores de movimiento alternativo (combustión discontinua): Utilizan un mecanismo biela-manivela para transformar el movimiento lineal del pistón en rotativo. Son máquinas volumétricas, lo que significa que procesan una cantidad discreta de fluido en cada ciclo. Esta configuración permite un control extremadamente preciso de la mezcla y el encendido, razón por la cual dominan la industria del transporte personal [1].

Los motores de combustión interna alternativos (MCIA), se categorizan mediante una serie de parámetros constructivos y funcionales que determinan su comportamiento y aplicaciones. La clasificación principal se rige por los siguientes factores:

- Según el proceso de combustión:

Motores de encendido provocado (MEP): Funcionan bajo el ciclo Otto. La mezcla de aire y combustible se prepara de forma previa (homogénea) y se activa mediante una chispa eléctrica que genera el encendido del motor. La velocidad de combustión depende de la propagación del frente de llama, factor que optimizaremos en este proyecto mediante la mejora del llenado y avance de encendido [1].

Motores de encendido por compresión (MEC): Funcionan bajo el ciclo Diesel. El combustible se autoinflama al ser inyectado en aire a alta temperatura tras la compresión. No requieren de sistema de encendido externo, pero sus presiones internas son mucho más elevadas, exigiendo estructuras más pesadas y resistentes.

- Según el ciclo de trabajo:

Motores de cuatro tiempos (4T): Realizan un ciclo completo cada dos vueltas del cigüeñal. Cada tiempo (admisión, compresión, expansión y escape) está claramente diferenciado, lo que permite un llenado óptimo de los cilindros y un vaciado eficiente de los gases residuales, clave para la longevidad y eficiencia del motor [1].

Motores de dos tiempos (2T): Para realizar el ciclo únicamente tienen que completar en una vuelta de cigüeñal. Normalmente carecen de válvulas convencionales haciendo uso de lumbreras, lo que simplifica la mecánica, pero complica la renovación de carga, resultando en mayores pérdidas de combustible sin quemar [1] [10].

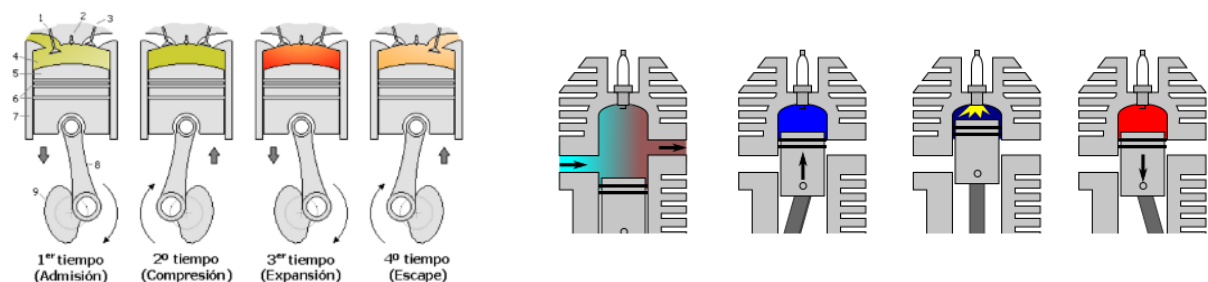


Figura 2-2. Ciclo de cuatro tiempos (izquierda) y de dos tiempos (derecha) (fuente: *wikimedia*)

- Según el aporte de combustible:

Carburación: Sistema mecánico basado en la depresión del flujo del aire para succionar el combustible. Es una tecnología limitada por su incapacidad para adaptarse con precisión a los cambios de temperatura o presión atmosférica entre otros.

Inyección electrónica: Utilizan inyectores gobernados por una ECU (Electronic Control Unit). Permite ajustar el tiempo de inyección en microsegundos, asegurando que la mezcla aire-gasolina

siempre sea la ideal para las condiciones de carga impuestas, permitiendo así las modificaciones de periféricos que se detallarán en este trabajo [11].

2.2 Partes principales de un motor

En el presente apartado se realiza un análisis técnico detallado de los elementos que integran el motor objeto de estudio. El desglose se ha estructurado siguiendo un orden lógico de montaje y funcionalidad, comenzando por el bloque motor y el tren alternativo (conjunto interno), continuando con la culata y el sistema de distribución, para finalizar con los sistemas periféricos esenciales para su operación, tales como los sistemas de carga, arranque, refrigeración y gestión de encendido.

Antes de proceder con la descripción pormenorizada de cada componente y las modificaciones efectuadas para optimizar su rendimiento, es imperativo comprender la disposición espacial y la interacción mecánica de todo el conjunto. Como se ilustra en la Figura 2-3, se presenta un diagrama de despiece (exploded view) que identifica la ubicación estratégica de cada una de las piezas que se analizarán en los subapartados posteriores, permitiendo visualizar la integración de los componentes.

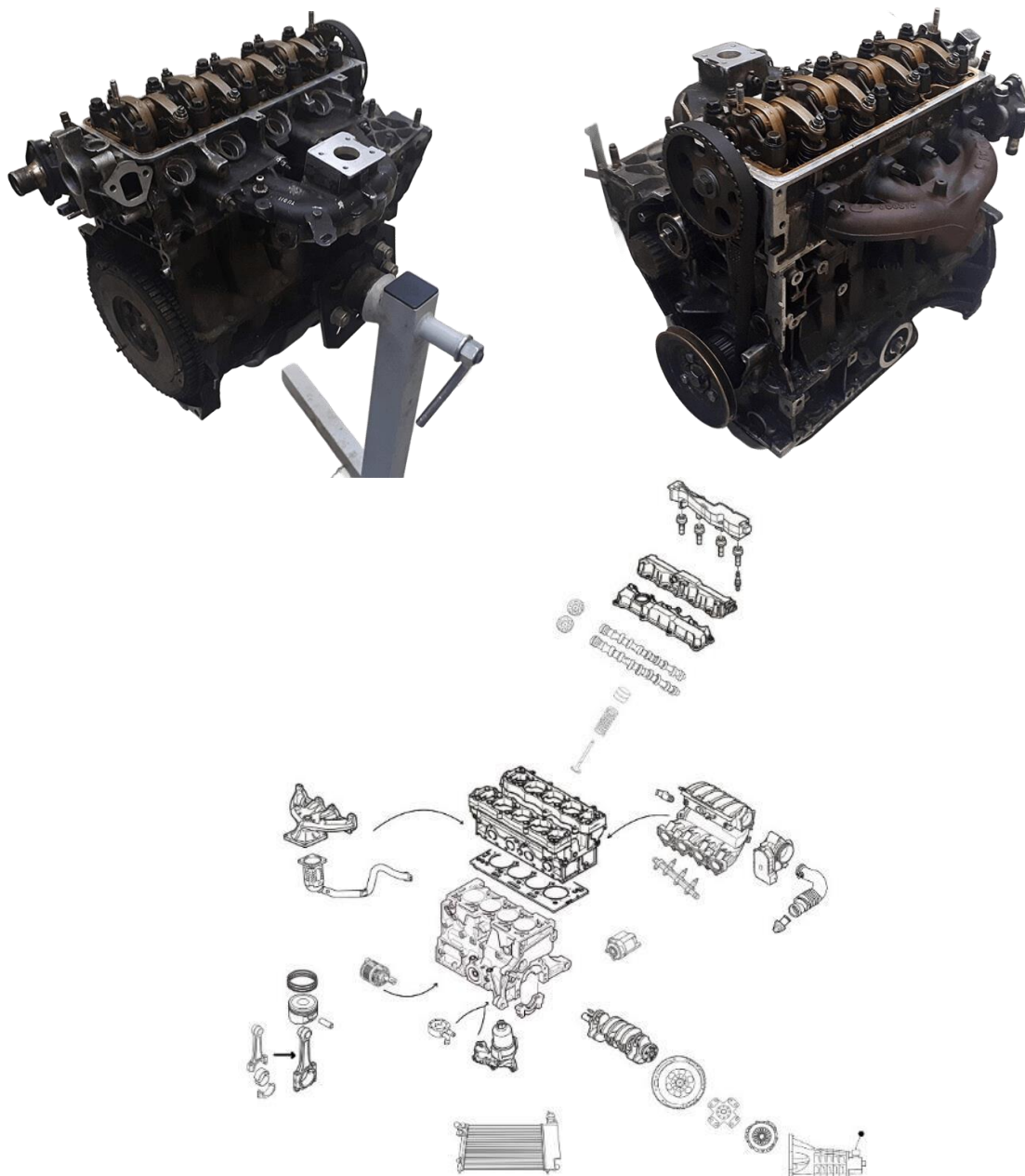


Figura 2-3. Motor TU9 y despiece motor (fuente: *wikimedia* y autoría propia)

2.2.1 Bloque motor y conjunto interno

El bloque motor y conjunto interno constituye el núcleo estructural y cinemático del propulsor, diseñado para transformar la energía térmica de la combustión en movimiento rotativo mediante el guiado y soporte de los componentes móviles.

- Bloque motor (1): Es la pieza estructural más importante del propulsor, fabricada generalmente en fundición de hierro o aleación de aluminio, que alberga los cilindros donde se desplazan los pistones. Su función es servir de soporte para el resto de los componentes (cigüeñal, culata y periféricos) y canalizar internamente el flujo del refrigerante y el aceite para el control térmico.
- Cigüeñal (2): Eje acodado que transforma el movimiento lineal alternativo de los pistones en un movimiento rotativo uniforme.
- Pistón (3): Es un componente móvil que actúa como una pared móvil de la cámara de combustión. Su función principal es transmitir la fuerza de los gases en expansión al cigüeñal a través de la biela.
- Biela (4): Es el elemento de unión entre el pistón (lineal) y el cigüeñal (rotativo). Se considera uno de los componentes más críticos debido a la naturaleza de los esfuerzos que soporta.
- Camisas (5): Son cilindros desmontables que se insertan en el bloque motor para formar las paredes de la cámara de combustión y guiar el movimiento del pistón. Su función principal es proporcionar una superficie de alta resistencia al desgaste, facilitando además la reparación del motor mediante su sustitución sin necesidad de mecanizar el bloque completo.
- Filtro de aceite (6): Elemento de porosidad controlada encargado de retener las partículas abrasivas y residuos de la combustión suspendidos en el lubricante, garantizando que el fluido que circula por el bloque esté libre de contaminantes que puedan provocar desgaste prematuro.
- Segmentos (7): Anillos elásticos situados en el pistón que garantizan la estanqueidad de la cámara y el rascado del aceite.
- Bulón (8): Eje de acero de alta resistencia que articula la unión entre la biela y el pistón; debe soportar enormes esfuerzos de cizalladura y permitir el pivotamiento del conjunto alternativo con la mínima fricción posible.
- Casquillos (9): Láminas bimetálicas o trimetálicas situadas en los apoyos de biela y bancada que, mediante una película de aceite a presión, evitan el contacto directo metal-metal, absorbiendo las cargas del ciclo de trabajo y protegiendo las superficies del cigüeñal.

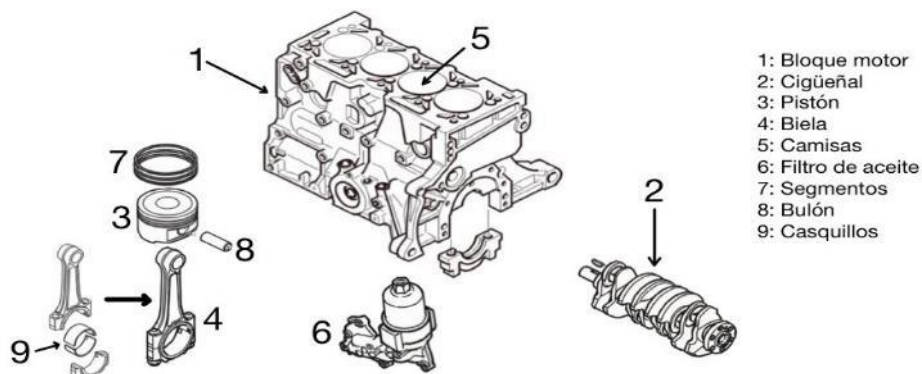


Figura 2-4. Bloque motor y conjunto interno (fuente: autoría propia)

2.2.2 Sistema de distribución y culata

El sistema de culata y distribución es el conjunto encargado de gestionar de forma estanca y sincronizada la apertura y cierre de las válvulas para controlar los ciclos de carga y descarga de gases.

- Culata (10): Pieza de aluminio que cierra los cilindros por la parte superior. Aloja las cámaras de combustión, las válvulas y los conductos de intercambio de gases.
- Junta de culata (11): Componente de estanqueidad situado entre el bloque y la culata, cuya función es sellar las cámaras de combustión para evitar fugas de presión, además de independizar los circuitos de lubricación y refrigeración que atraviesan ambas estructuras.
- Tapa de balancines (12): Cubierta superior que protege el tren de válvulas y evita fugas de aceite.
- Poleas de distribución (13): Las poleas transmiten el giro del cigüeñal a los árboles mediante una correa, mientras que el tensor garantiza la fase exacta entre ambos.
- Árboles de levas (14): Ejes con levas que comandan la apertura y cierre de las válvulas.
- Válvula (15): Elemento que permite la entrada de mezcla y salida de gases quemados.
- Taqué (empujador) (16): Intermediarios entre la leva y la válvula. Existen dos tipos, los hidráulicos y los mecánicos.
- Muelle (17): El muelle de válvula es un elemento elástico cuya función es mantener la válvula cerrada contra su asiento y, lo más importante, obligar a la válvula a seguir el perfil de la leva durante la fase de cierre.

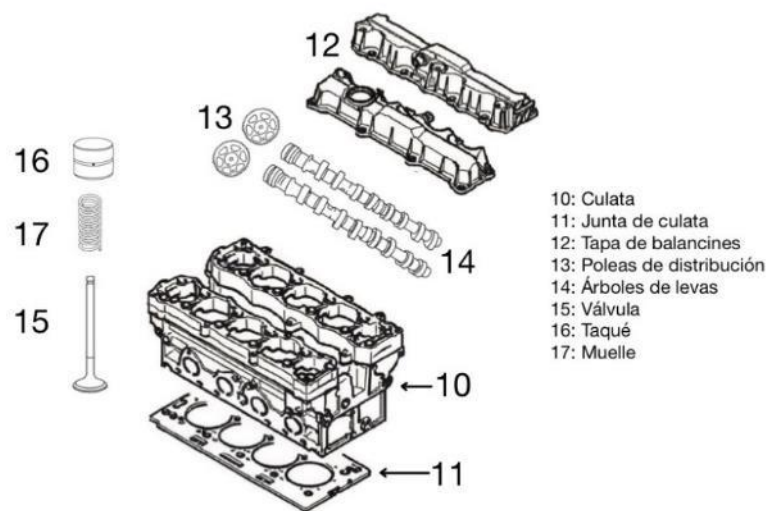


Figura 2-5. Sistema de distribución y culata (fuente: autoría propia)

2.2.3 Sistemas de admisión

El sistema de admisión es el conjunto encargado de captar, filtrar y conducir el aire atmosférico hacia los cilindros en las condiciones óptimas de velocidad y presión para la combustión.

- Colector de admisión (18): Canaliza el aire hacia cada cilindro. Su longitud y forma determinan la velocidad del flujo.

- Rampa de inyección e inyectores (19): Suministran el combustible a alta presión (procedente de una bomba de inyección) directamente tras la válvula de admisión.
- Cuerpo de mariposa (20): Regula la cantidad de aire admitido. En el NFU de serie es electrónico, lo que permite una gestión precisa del par motor.
- Filtro y conductos de aire (21): Aseguran la limpieza del aire y minimizan las pérdidas por restricción.
- Sensor MAP (Manifold Absolute Pressure) (22): Es un sensor piezoeléctrico encargado de medir la presión de aire existente dentro del colector de admisión. Esta medición es enviada a la centralita para que esta pueda calcular la masa de aire que entra en los cilindros en cada ciclo.

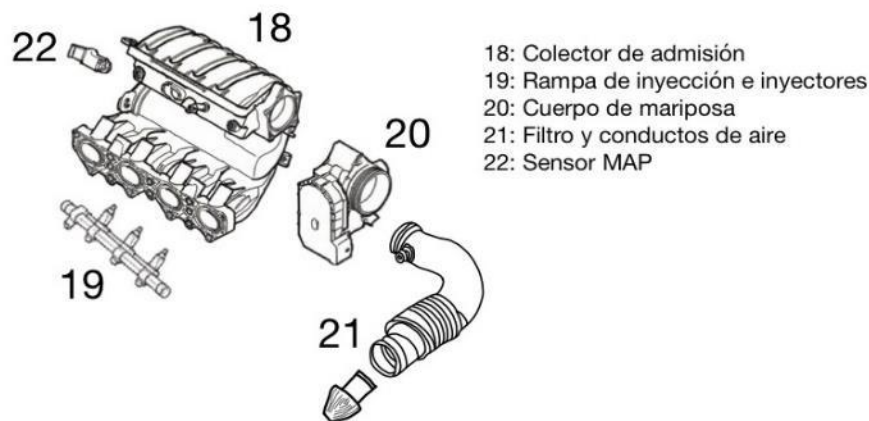


Figura 2-6. Sistemas de admisión (fuente: autoría propia)

2.2.4 Sistemas de escape

El sistema de escape es el conjunto diseñado para evacuar los gases de la combustión fuera del motor con la menor contrapresión (Anexo III: Glosario de términos) posible, aprovechando la inercia de los pulsos, que son ondas de presión que se crean cada vez que una válvula de escape se abre de golpe, para mejorar el vaciado de los cilindros.

- Colector de escape (23): Une las salidas de la culata en una sola línea, cuenta con una salida por cilindro. Su diseño es clave para la resonancia (Anexo III: Glosario de términos).
- Línea de escape (24): Sistema de conductos diseñado para la evacuación controlada de los gases de combustión hacia el exterior, cuya geometría y contrapresión (backpressure) condicionan directamente el barrido de los cilindros y la sintonía de ondas pulsantes para optimizar el rendimiento del motor.

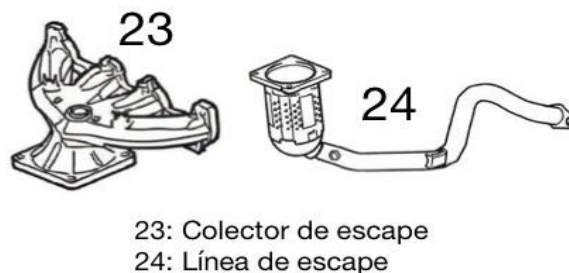


Figura 2-7. Sistemas de escape (fuente: autoría propia)

2.2.5 Periféricos

Este apartado engloba al conjunto de componentes periféricos y elementos de la cadena cinemática encargados de garantizar la operatividad autónoma del propulsor y la transferencia eficiente del par motor hacia el eje tractor. Incluye, por un lado, los grupos auxiliares esenciales para la gestión energética y el ciclo de puesta en marcha. Por otro lado, integra el sistema de transmisión y acoplamiento, cuya función es modular y desmultiplicar la energía mecánica generada para transformarla en fuerza motriz efectiva.

- Enfriador de aceite (25): Es un intercambiador de calor que se encarga de estabilizar la temperatura del lubricante del motor mediante intercambio térmico con el agua.
- Alternador (26): Es una máquina eléctrica rotativa que transforma la energía mecánica del cigüeñal en energía eléctrica mediante inducción electromagnética; su función es suministrar corriente a los sistemas del vehículo y mantener la carga de la batería.
- Motor de arranque (27): Es un motor eléctrico de corriente continua diseñado para vencer la resistencia interna y la compresión del propulsor, proporcionando el par inicial necesario para que el propulsor comience a funcionar de forma autónoma. Se acopla temporalmente a la corona del volante de inercia mediante un piñón retráctil impulsado por un solenoide.
- Centralita (ECU) (28): El hardware que procesa toda la información de los sensores y ejecuta las órdenes de inyección y encendido.
- Bobina y bujía (29): Es un transformador de inducción que eleva la baja tensión de la batería (12V) a los miles de voltios necesarios (más de 20.000V) para generar la chispa en la bujía. La bujía es el componente encargado de generar una chispa eléctrica de alta tensión en la cámara de combustión para iniciar la inflamación de la mezcla aire-combustible.
- Volante de inercia (30): Disco de gran masa anclado al extremo del cigüeñal que almacena energía cinética para suavizar las pulsaciones del motor y mantener el giro entre ciclos de trabajo.
- Disco de embrague (31): Elemento de fricción situado entre el volante de inercia y la maza de embrague, encargado de acoplar y desacoplar de forma progresiva el movimiento del motor hacia la caja de cambios.
- Maza de embrague (32): Mecanismo de muelle de diafragma que ejerce una fuerte presión axial sobre el disco de embrague contra el volante de inercia para garantizar que no haya pérdidas por deslizamiento.
- Caja de cambios (33): Es el sistema de transmisión encargado de gestionar el par motor y la velocidad de giro mediante diferentes relaciones de engranajes, permitiendo adaptar la fuerza generada por el motor a las necesidades de carga y velocidad del vehículo.
- Radiador (34): Es un intercambiador de calor de flujo cruzado diseñado para disipar en la atmósfera el calor absorbido por el líquido refrigerante tras su paso por el bloque y la culata.

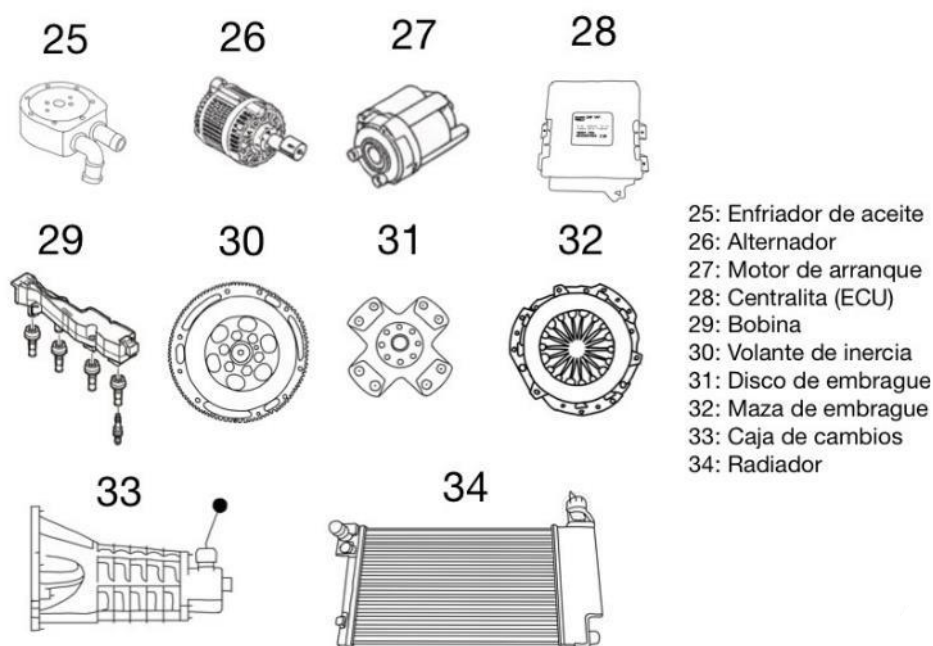


Figura 2-8. Periféricos (fuente: autoría propia)

2.3 Evolución tecnológica de los motores de encendido provocado

Este apartado detalla la trayectoria técnica y científica de los motores de encendido provocado (MEP), analizando como la transición del empirismo mecánico a la simulación termofluidodinámica ha permitido alcanzar niveles de potencia específica y eficiencia térmica que se consideraban teóricamente inalcanzables en los albores de la motorización.

2.3.1 Culata y cinemática de válvulas

Históricamente, la arquitectura de los MEP ha evolucionado para maximizar el área de flujo y minimizar las restricciones aerodinámicas en los conductos [12]. La cinemática de válvulas es la parte de la ingeniería del motor que estudia el movimiento de los componentes del tren de distribución (levas, taqués, muelles y válvulas) en función del tiempo y del ángulo de giro del cigüeñal [4].

De las válvulas laterales (Side-Valve) al DOHC: Los motores primitivos utilizaban configuraciones de válvulas laterales, limitadas por cámaras de combustión ineficientes y bajas de relaciones de compresión. La transición hacia sistemas OHV (Overhead Valves) y, posteriormente, al DOHC (Double Overhead Camshaft), permitió inclinar las válvulas, optimizando la permeabilidad de los conductos y facilitando la ubicación central de la bujía para reducir el recorrido de la llama¹ [4].

Distribución desmodrómica: En la búsqueda de regímenes de giro elevados, se desarrollaron sistemas desmodrómicos (como en los motores Ducati), es un mecanismo de accionamiento de las válvulas que prescinde de los muelles para cerrarlas, existe una segunda leva y un segundo balancín encargados de "tirar" de la válvula para cerrarla de forma mecánica y precisa. Esto se creó para eliminar el fenómeno de flotado de válvulas² asociado a los muelles convencionales, permitiendo perfiles de alzada (Anexo III: Glosario de términos) más agresivos sin comprometer la integridad mecánica [4].

¹ Recorrido de la llama: es la distancia lineal y el proceso de propagación que sigue el frente de fuego desde que salta la chispa en los electrodos de la bujía hasta que la mezcla de aire y combustible se quema por completo.

² Flotado de válvulas: Es un fenómeno crítico que ocurre cuando las válvulas de un motor no logran cerrarse a tiempo o no siguen el perfil diseñado de la leva debido a que la inercia del tren de válvulas supera la fuerza de los muelles.

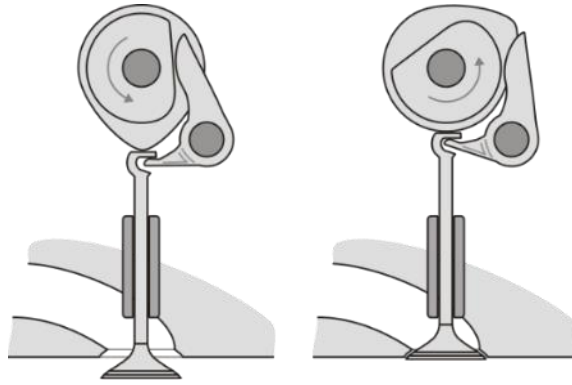


Figura 2-9. Funcionamiento de la distribución desmodrómica (fuente: *wikimedia*)

Configuración de multi-válvulas: La implementación de culatas de cuatro y cinco válvulas ha sido fundamental para incrementar el área de cortina (curtain área) que se refiere al área cilíndrica virtual que se forma entre la cara de la válvula y el asiento cuando la válvula está abierta, mejorando drásticamente el llenado del cilindro a altas revoluciones y permitiendo diseño de cámara tipo pent-roof, donde la culata no es plana ni semiesférica, sino que tiene dos superficies inclinadas que se encuentran en un vértice central, imitando la forma del tejado de una casa con altos efectos de squish (Anexo III: Glosario de términos) y tumble (Anexo III: Glosario de términos) [4] [5] [9].

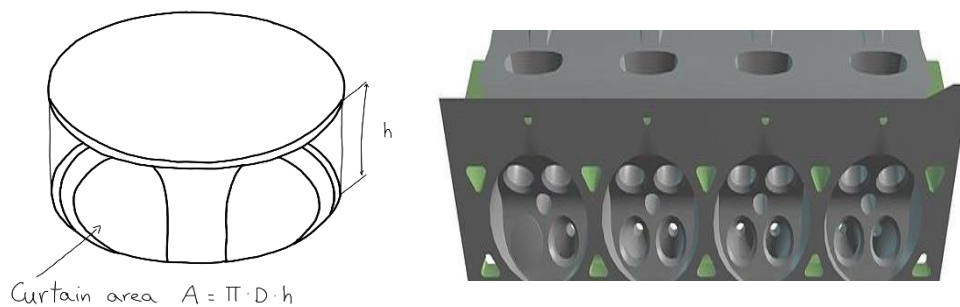


Figura 2-10. Curtain area y culata tipo pent-roof (fuente: autoría propia y *wikimedia*)

2.3.2 Termodinámica de los ciclos de trabajo reales

La comprensión del MEP ha pasado de la idealización del ciclo Otto de aire estándar a la modelización de procesos politrópicos no isentrópicos.

Eficiencia térmica indicada: La optimización moderna se centra en elevar la relación de compresión geométrica (CR), que en motores de alta prestación con combustibles como el etanol puede alcanzar valores de hasta 15:1, incrementando la eficiencia del ciclo mediante una mayor expansión de los gases quemados [1] [4].

Combustión desfasada (phased combustion): A diferencia del modelo de Otto que presupone una adición de calor a volumen constante, el diseño actual utiliza funciones para modelar la fracción de masa quemada, considerando el retraso de ignición y la duración real de la combustión para predecir la presión media efectiva indicada (IMEP) con precisión [4].

Gestión de pérdidas parasitarias: La evolución tecnológica ha permitido desglosar la presión media efectiva al freno (BMEP) restando de la IMEP las pérdidas por bombeo (PMEP) y fricción mecánica (FMEP), optimizando componentes como los cojinetes hidrodinámicos (Anexo III: Glosario de términos) y segmentos de pistón para maximizar la eficiencia mecánica [4].

2.3.3 Dinámica de gases no estacionaria

El rendimiento de los Motores de Encendido Provocado (MEP) modernos no está gobernado por un flujo de aire constante y uniforme, sino por la manipulación estratégica de la dinámica de gases no

estacionaria, específicamente mediante la gestión de las ondas de presión de amplitud finita que se propagan por los sistemas de admisión y escape.

Efectos de sintonía (Ramming): La evolución del diseño de los colectores ha permitido aprovechar la inercia de la columna de aire y las ondas de reflexión. Un diseño optimizado de la longitud del conducto de admisión sincroniza la llegada de la onda de compresión con el cierre de la válvula de admisión, logrando una eficiencia volumétrica cercana a la unidad en motores atmosféricos [4].

Evolución del escape: Desde los tubos directos hasta los sistemas de dos etapas y megáfonos sintonizados, la tecnología ha buscado crear una fuerte depresión durante el cruce de válvulas (overlap) para evacuar los gases residuales y asistir la inducción de carga fresca [4] [12].

Coeficientes de descarga: El uso de bancos de flujo y CFD (Computational Fluid Dynamics) como herramientas de medición de la capacidad de aire que puede circular a través de un conducto ha permitido mapear³ coeficientes de descarga reales que consideran la vena contracta (Anexo III: Glosario de términos) y las turbulencias en el asiento de la válvula, superando las estimaciones isentrópicas tradicionales [4].

2.3.4 Avances en sistemas de alimentación y control

La migración de la carburación mecánica a la inyección electrónica (EFI) ha permitido una gestión del motor basada en la precisión algorítmica, sustituyendo la respuesta pasiva al flujo de aire por un control activo mediante una ECU.

Inyección electrónica de combustible (EFI): La eliminación de los efectos venturis restrictivos de los carburadores ha reducido las pérdidas por bombeo y ha permitido un control estequiométrico preciso [11].

Inyección directa de gasolina (GDI): Esta tecnología representa la frontera actual, permitiendo la combustión estratificada y el enfriamiento de la carga mediante la vaporización del combustible dentro de la cámara, lo que mitiga la detonación (knock) (Anexo III: Glosario de términos) y permite relaciones de compresión más elevadas [11].

Distribución variable (VVT): Implementada en los sistemas VVT modernos (como el VVT-i DE Toyota), consiste en un actuador hidráulico o eléctrico situado en la polea del árbol de levas. El actuador puede girar el árbol de levas unos grados respecto a la polea que lo mueve. Esto permite adelantar o retrasar el momento en que abren las válvulas de admisión y escape sin cambiar la forma de la leva, optimizando el intercambio de gases tanto en cargas parciales como totales y reduciendo las emisiones de *NoX* mediante la recirculación interna de gases de escape (EGR) [13] [14].

2.3.5 Evolución de materiales

Para soportar el incremento en las presiones medias y los regímenes de rotación (que se han triplicado o cuadruplicado en las últimas décadas), la ingeniería de motores ha recurrido a avances metalúrgicos y procesos de fabricación drásticamente mejorados. El objetivo primordial es garantizar la fiabilidad mecánica bajo condiciones de fatiga extrema y altas cargas inerciales.

Pistones y bielas: El paso de materiales fundidos a aleaciones de aluminio forjado y el uso de materiales como el titanio para las bielas y válvulas ha reducido la masa recíproca, minimizando las cargas inerciales y permitiendo velocidades medias de pistón superiores a los 25 m/s en aplicaciones de competición [3].

³ Mapear: Es el proceso de programar y ajustar los valores de las tablas que componen la unidad de control de motor (ECU) para optimizar el rendimiento tras realizar cambios físicos.

Cigüeñales: El diseño ha evolucionado hacia configuraciones de cinco apoyos en motores de cuatro cilindros para maximizar la rigidez torsional, utilizando aceros aleados tratados mediante nitruración para aumentar la resistencia a la fatiga [3].

Tratamientos superficiales: La implementación de recubrimientos de cromo, níquel y fósforo, así como el uso de camisas húmedas de alta resistencia, ha mejorado la gestión térmica y reducido el desgaste por fricción [3].

2.3.6 Simulación numérica: la nueva era del diseño

La afirmación de que el MEP es "hijo de la computación" refleja la realidad de la ingeniería moderna, donde el diseño ha pasado del empirismo a la simulación matemática sistemática [4]. Los modelos computacionales permiten monitorizar procesos que son imposibles de medir físicamente con la misma resolución temporal, como las variaciones de temperatura y presión grado a grado del cigüeñal.

A continuación, se detalla cómo el software mencionado y los fenómenos integrados permiten esta optimización:

- Herramientas de simulación: 1D y 3D (CFD)

La ingeniería actual utiliza un enfoque de varias escalas para predecir el comportamiento del motor:

Simulación unidimensional (1D): Herramientas como AVL BOOST y AMESIM se utilizan para modelar el sistema completo. Estos modelos analizan el flujo de gases no estacionarios y los efectos termodinámicos en todas las longitudes de los conductos y cilindros. La gran ventaja es su velocidad operativa: un análisis 1D toma microsegundos en un ordenador de sobremesa, permitiendo iterar cientos de configuraciones geométricas rápidamente [4].

Dinámica de fluidos computacional (CFD-3D): Estos tipos de software permiten una visión microscópica del flujo de gases dentro de la cámara y los conductos. Mientras que el 1D da una visión global, el CFD visualiza vectores de velocidad, zonas de recirculación y la interacción del flujo con las válvulas [4].

- Integración de fenómenos críticos

Para que una simulación sea una herramienta de diseño válida, debe integrar con precisión los siguientes factores:

Acústica de ondas: El rendimiento depende de rastrear las ondas de presión desde la válvula hasta la entrada o salida del colector. El software resuelve ecuaciones para predecir cómo estas ondas se reflejan y se superponen para mejorar el llenado del cilindro (efecto ramming) [4].

Turbulencia de squish: Los modelos CFD permiten el cálculo preciso de las características de la velocidad de squish (el movimiento del aire al final de la compresión), lo cual es vital para predecir la rapidez de la combustión y la homogeneización de la mezcla [4].

- Predicción frente a prototipado físico

La capacidad de "imaginar lo inimaginable" en la pantalla de una computadora permite al diseñador observar variaciones temporales de flujo y calor antes de fabricar una sola pieza. Esto es especialmente crítico en componentes costosos como colectores de escape enfriados por agua o sistemas de distribución compleja, donde la experimentación física sería prohibitivamente lenta y cara [4].

- Rendimiento y normativas de emisiones

La diferencia entre las predicciones reglamentarias y las emisiones en el mundo real se está cerrando gracias a estos mapas de motor precisos simulados en ciclos de conducción reales (como el WLTC) [10]. El uso de estas herramientas es el único camino viable para cumplir con las estrictas normativas ambientales actuales, permitiendo optimizar variables como el tiempo de inyección y el avance del encendido para reducir contaminantes como NO_x , CO y partículas (PM) sin sacrificar excesiva potencia.

2.4 Motores PSA (Peugeot Société Anonyme)

2.4.1 Contexto histórico y posicionamiento de PSA

A finales de los años 80 y durante toda la década de los 90, el grupo PSA (Peugeot-Citroën) se consolidó como el referente mundial en el desarrollo de motores de pequeña y mediana cilindrada para vehículos de los segmentos A, B y C. La familia de motores TU (cuyo acrónimo se desconoce), introducida en 1986 para sustituir a los veteranos motores X (“Douvrin”), nació con una premisa clara: eficiencia bajo peso y una capacidad de evolución extraordinaria [15].

La serie TU fue concebida bajo una arquitectura de cuatro cilindros en línea, con un ángulo de inclinación estándar y una estructura diseñada para ser fabricada tanto en bloque de aleación de aluminio (con camisas húmedas intercambiables) como en fundición de hierro (con camisas secas).

Todos comparten una distribución movida por correa dentada, una cámara de combustión inicialmente de tipo “bañera” en las versiones de ocho válvulas que evolucionó a hemisférica en los motores de dieciséis válvulas, y una carrera de pistón optimizada para favorecer el par motor en aplicaciones urbanas y el rendimiento en aplicaciones deportivas.

En el momento de la aparición del motor NFU, PSA se encontraba en una fase de transición tecnológica. Mientras que los motores de los 90 buscaban la potencia bruta y la respuesta inmediata (era dorada de los GTI), los principios de la década de 2000 exigían el cumplimiento de normativas de emisiones más estrictas (Euro3 y Euro4), lo que obligó a evolucionar la gestión electrónica y la termodinámica de las culatas.

2.4.2 Motores de la familia TU

- TU9 (954cm³): Fue la versión de menos cilindrada que equipaba pistones de diámetro 70mm y carrera de 62mm. Su bloque era de aluminio y la culata contaba con 8 válvulas. Su objetivo era la simplicidad mecánica y el bajo consumo [16].
- TU1 (1124cm³): Fue el motor más común en los modelos base de PSA durante dos décadas. Dentro se concibieron tres variantes el TU1 (carburación), el TU1M (inyección monopunto) y el TU1JP (inyección multipunto). Durante las dos décadas mantuvo el diámetro de 70mm, pero aumentó su carrera a 73mm lo que proporcionó una curva de par mucho más plana, ideal para su uso urbano. Fue el banco de pruebas para las primeras culatas con taqués mecánicos de ajuste por tornillo, una solución sencilla pero eficaz para el mantenimiento [16].
- TU3 (1360cm³): Probablemente el motor más versátil de la historia de PSA que, gracias a su equilibrio entre peso y prestaciones lo hizo omnipresente. Entre sus variantes se encuentra el TU3S que equipaba un carburador de doble cuerpo Solex que le permitía alcanzar los 85CV. Posteriormente, se evolucionó a inyección multipunto en las versiones KFX/KFW. También contaba con una variante deportiva TU3J2/L3 que fue el corazón de los Peugeot 106 Rallye que proporcionaba 100CV, utilizaba bloque de aluminio con camisas húmedas, lo que permitía una refrigeración superior en condiciones de competición [16].
- TU5 (1587cm³): Este es el bloque sobre el que trabajaremos en el TFG. El TU5 aumentó el diámetro a 78.5mm y la carrera a 82mm. Fue el salto definitivo hacia las altas prestaciones. Se agrupan en dos variantes, los de ocho válvulas (SOHC) y las dieciséis válvulas (DOHC) [17] [18] [19].

2.4.2.1 Variantes de 8 válvulas

Variantes de 8 válvulas del TU5 (SOHC):

- TU5JP (NFZ): Bloque de fundición (en la mayoría de las versiones) y culata de 8 válvulas. Priorizaba la resiliencia mecánica. Sus 90CV eran muy robustos gracias a una velocidad media del pistón contenida.
- TU5JP/L4 (NFT): Se trata de una evolución del anterior motor, el NFZ, este llegaba a equipar 98CV gracias a unas mejoras que realizaron en el proceso de la combustión, pero manteniendo la culata de 8 válvulas.
- TU5J2 (NFW): De características similares a los anteriores, utilizaba una gestión mediante una centralita Magneti Marelli muy avanzada para la época, logrando 103CV con una culata de 8 válvulas altamente optimizada en sus conductos de la culata.

2.4.2.2 Variantes de 16 válvulas

Variantes de 16 válvulas del TU5 (DOHC). Aquí es donde PSA alcanzó su máximo esplendor en ingeniería de motores pequeños:

- TU5J4 (NFX): Los franceses lo conciben como el motor “pata negra” de PSA. Bloque de fundición que, junto con unos conductos de admisión de gran sección, árboles de levas con cruce deportivo de fábrica es el referente en cuanto a rendimiento volumétrico puro se refiere.
- TU5JP4 (NFU): PSA buscó mejorar la curva de par y reducir las emisiones. Introdujo válvulas más grandes (mejorando el potencial de flujo), taqués hidráulicos que mejoran el mantenimiento y reducen el ruido mecánico, aunque limita el ligeramente el techo de giro comparado con los mecánicos del NFX.

2.5 Tecnologías de optimización de rendimiento

La optimización integral de un motor de encendido provocado requiere un enfoque sistémico que trascienda la mera sustitución de componentes aislados. La decisión de estructurar este análisis en ocho apartados diferenciados responde a la necesidad de abordar cada factor crítico que interviene en la eficiencia volumétrica, térmica y mecánica del conjunto. Esta división permite analizar, en primer lugar, la arquitectura del bloque y culata como la base física del proyecto; posteriormente, se estudia la dinámica de fluidos a través de los sistemas de admisión y extracción de gases, cuyo equilibrio es vital para el llenado del cilindro. Asimismo, se evalúa la reducción de inercias en masas rotativas y la adecuación de la transmisión, factores que dictan cómo se traslada la potencia al asfalto. Finalmente, la gestión electrónica actúa como el nexo integrador que coordina todas las mejoras, mientras que el sistema de refrigeración garantiza la integridad y fiabilidad mecánica ante las nuevas exigencias térmicas del motor potenciado.

2.5.1 Bloque motor y conjunto interno

2.5.1.1 Pistones forjados de alta compresión

El pistón original, comúnmente fabricado mediante fundición de aluminio, presenta una estructura molecular porosa que limita su resistencia a la fatiga térmica y mecánica.

Ingeniería del forjado: A diferencia de la fundición, el proceso de forjado prensa el material en estado semisólido, alineando el grano del metal y eliminando micro-vacuolas. Esto permite diseñar pistones con paredes más delgadas, pero más resistentes, reduciendo la masa alternativa [3].

Modificación de la relación de compresión (r): Mediante el diseño de la cabeza del pistón (domo), se busca reducir el volumen de la cámara de combustión para elevar la relación de compresión. Una r

más alta incrementa el rendimiento térmico, aunque exige un control estricto del avance de encendido para evitar la detonación [12].

Recubrimientos cerámicos: Los pistones de alto rendimiento incorporan recubrimientos de bisulfuro de molibdeno (MoS_2) en la falda (parte inferior) para reducir el coeficiente de fricción con la camisa, y barreras térmicas cerámicas en la cabeza para proteger el material del calor directo de la combustión [3].



Figura 2-11. Pistón forjado (fuente: autoría propia)

2.5.1.2 Bielas de acero aleado con perfil en “H” o “I”

La biela es el componente sometido a los esfuerzos más complejos: compresión durante la expansión y tracción extrema por inercia en el PMS.

Geometría de la sección: se sustituyen las bielas de origen por unidades de acero aleado. Las bielas con perfil en "H" ofrecen una rigidez superior contra el pandeo lateral, mientras que las de perfil en "I" suelen ser más ligeras para motores de muy altas revoluciones.

Tornillería de grado aeroespacial: El punto más crítico de la biela son sus tornillos de cabeza. El uso de tornillos de alta resistencia (como los de la aleación ARP2000) es imperativo. Estos tornillos poseen una resistencia a la tracción de hasta 1520MPa, evitando que la cabeza de biela se deforme y "ovalice" a muy altas revoluciones [3].

Equilibrado dinámico: Cada conjunto biela-pistón debe ser pesado y equilibrado con una tolerancia de décimas de gramo. Esto minimiza las fuerzas de inercia de segundo orden, reduciendo las vibraciones que podrían fracturar el cigüeñal [8].

2.5.1.3 Camisas reforzadas

El incremento de potencia puede comprometer la estanqueidad y la circularidad de los cilindros.

Encamisado de alta resistencia: En preparaciones extremas, se instalan camisas de acero aleado o hierro dúctil mediante procesos de interferencia térmica. Estas camisas ofrecen una dureza superficial superior, permitiendo un sellado de los segmentos mucho más eficaz bajo altas presiones [2].

Bruñido de precisión (Honing): El acabado superficial de la camisa debe presentar un rayado cruzado específico para retener la película de aceite, reduciendo el desgaste y mejorando la disipación de calor hacia el bloque [19].

Refuerzo de bancada (Main Girdle): Para evitar que el cigüeñal flexione bajo cargas extremas, se pueden instalar placas de refuerzo que unen todos los sombreretes (Anexo III: Glosario de términos) de bancada, solidarizándolos con la estructura del bloque para mantener una alineación perfecta de los apoyos [2] [12].

2.5.1.4 Análisis de tolerancias

Cuando incrementamos el régimen de giro de un motor de serie hasta las 8.000 RPM, las fuerzas inerciales y las cargas térmicas se disparan de forma no lineal. Por ello, la gestión de las tolerancias mecánicas se vuelve crítica para la supervivencia del motor.

El dilema de la holgura: Una holgura demasiado estrecha aumenta la fricción y la temperatura del aceite, pudiendo causar el gripado. Una holgura demasiado amplia provoca una caída de la presión de aceite.

Uso de casquillos trimetálicos: Para preparaciones de alto rendimiento, es imperativo sustituir los casquillos de biela y bancada de aluminio/estaño por casquillos trimetálicos (acero, bronce y una capa de rodadura de plomo/indio). Estos soportan una mayor presión específica y tienen una capacidad superior de "incrustabilidad" para pequeñas partículas, protegiendo el cigüeñal [12].

Al usar pistones forjados de alta compresión, las dilataciones térmicas son mayores que en los pistones de fundición originales.

El "Gap" de los segmentos: Es vital ajustar la holgura entre puntas de los segmentos (ring gap). Si el hueco es insuficiente, al dilatarse por el calor de la combustión, las puntas pueden tocarse, bloqueando el pistón y destruyendo el cilindro [3].

2.5.1.5 Equilibrio dinámico del cigüeñal

El cigüeñal es un componente robusto, pero su diseño de serie contempla márgenes de tolerancia amplios. En una preparación de alto rendimiento, el cigüeñal debe someterse a un equilibrado dinámico conjunto con el volante de inercia.

Eliminación de vibraciones armónicas: A altas RPM, incluso una desviación de pocos gramos puede generar fuerzas centrífugas que destruyan los casquillos de bancada o provoquen la rotura por fatiga del material.

Cuchillado de contrapesos (Knife-edging): Una modificación avanzada que consiste en perfilar los contrapesos del cigüeñal en forma de cuña. Esto reduce en gran manera la resistencia aerodinámica dentro del cárter (pérdidas por chapoteo de aceite) y disminuye ligeramente la masa rotativa total [3].

La optimización del bloque motor y del conjunto alternativo no busca solo la potencia, sino la fiabilidad mecánica. Al reducir las masas alternativas (pistones y bielas más ligeros) y aumentar la resistencia de los materiales (forjado y aceros aleados), desplazamos el límite de rotura del motor por encima del régimen de potencia máxima.

2.5.2 Sistema de distribución y culata

La distribución es el "cerebro" mecánico del motor. Mientras que el bloque y el tren alternativo determinan la resistencia, el sistema de distribución define la personalidad del motor: su rango de par, su techo de giro y eficiencia volumétrica. Para los motores el paso a un sistema de alto rendimiento implica la transición de una configuración diseñada para el confort y las emisiones a una optimizada para la dinámica de gases no estacionaria.

2.5.2.1 Dinámica de la leva

En un motor de serie, los árboles de levas buscan un compromiso entre un ralentí estable y una respuesta lineal. Al introducir árboles de más cruce de válvulas o perfiles deportivos, buscamos alterar la ley de apertura de las válvulas para aprovechar la inercia de los gases.

El perfil de la leva: No solo importa la alzada máxima, sino la velocidad de apertura y cierre. Un árbol de levas de competición tiene rampas de aceleración más agresivas que permiten que la válvula alcance su área de cortina máxima en menos grados de cigüeñal [1].

La duración y el cruce de válvulas (Overlap): El cruce es el intervalo (medido en grados de cigüeñal) durante el cual las válvulas de admisión y escape permanecen abiertas simultáneamente en el entorno del Punto Muerto Superior (PMS) [6].

Efecto en alto rendimiento: A altas RPM, el gas de escape que sale a gran velocidad crea una depresión en la cámara. Si la válvula de admisión ya está abierta (cruce), esta succión ayuda a vencer la

inercia del aire fresco de admisión, iniciando el llenado incluso antes de que el pistón comience a bajar. Se conoce como efecto de barrido o scavenging (Anexo III: Glosario de términos) [6].



Figura 2-12. Árboles de levas (fuente: autoría propia)

2.5.2.2 Poleas regulables (*Vernier Pulleys*)

La instalación de árboles de levas de alto rendimiento suele ser insuficiente si no se dispone de la capacidad de sincronizar el momento exacto en que ocurren los eventos de apertura y cierre respecto a la posición del pistón. Las poleas de serie de los motores suelen ser fijas, esto implica que la relación angular entre el cigüeñal y el árbol de levas es inamovible y solo permiten el calado de fábrica.

Las poleas regulables permiten desplazar el diagrama de distribución sin variar la duración total del árbol. Esto nos permite ajustar de forma independiente los cuatro eventos críticos:

- AAA (Avance Apertura Admisión): Adelantar la apertura de admisión mejora el llenado a altas revoluciones gracias al cruce, pero puede inestabilizar el ralentí debido al reflujo de gases de escape hacia el colector de admisión [1].
- RCA (Retraso Cierre Admisión): Es el evento más crítico para la potencia máxima. Debido a la inercia del aire, este sigue entrando en el cilindro incluso cuando el pistón ya ha empezado a subir en la fase de compresión. Un RCA mayor permite aprovechar esta inercia a altas RPM para meter más masa de aire [1].
- AAE (Avance Apertura Escape): Determina el blowdown, que se refiere al breve intervalo de tiempo que transcurre desde que se abre la válvula hasta que el pistón alcanza el PMI. Abrir antes permite que la presión interna del cilindro ayude a evacuar los gases rápidamente, reduciendo el trabajo de bombeo que el pistón debe realizar para "empujar" los gases hacia afuera [6].
- RCE (Retraso Cierre Escape): Trabaja en conjunto con el AAA para definir el cruce total.

2.5.2.3 Modificación del calado

Mediante las poleas regulables, podemos realizar dos tipos de ajustes básicos sobre el árbol de levas:

- Adelantar el árbol (Advance): Abrir y cerrar todo más pronto. Esto suele desplazar la curva de par hacia regímenes más bajos, mejorando la respuesta en la zona de medias revoluciones. Sin embargo, un exceso de adelanto puede provocar que el pistón golpee la válvula en el PMS si el margen de seguridad es reducido [1].

- Retrasar el árbol (Retard): Abrir y cerrar todo más tarde. Esto es lo que se busca para ganar potencia habitualmente en la zona alta del cuentavueltas. Al retrasar el cierre de admisión (RCA), el motor respira mejor a 7.000 u 8.000 RPM, aunque perdamos par motor por debajo de las 3.500 RPM [1].

En un motor DOHC, la gran ventaja es que podemos separar o acercar los centros de lóbulo (Lobe Separation Angle). Si "cerramos" el ángulo, aumentamos el cruce y favorecemos la potencia máxima; si lo "abrimos", suavizamos la entrega de potencia y mejoramos la estabilidad mecánica [12].

2.5.2.4 Muelles de válvula y taqués

Un sistema de distribución de alto rendimiento pone a prueba la integridad física de los componentes. Al aumentar el régimen de giro de las 6.000 RPM de origen hasta las 7.500-8.000 RPM, surgen problemas cinemáticos:

- Flotado de válvulas: A altas revoluciones, la inercia de la válvula es tan grande que el muelle de serie no es capaz de cerrarla a tiempo para seguir el perfil de la leva. Esto puede causar un contacto catastrófico entre el pistón y la válvula. Por ello, es imperativo instalar muelles de válvula reforzados con mayor constante elástica.
- Taqués hidráulicos y mecánicos: Los motores comúnmente montan taqués hidráulicos de serie, que son excelentes para el mantenimiento, pero tienen un límite físico [17]. Por encima de las 8.000 RPM, el aceite en su interior puede "espumar" o no vaciarse a tiempo, provocando que la válvula no cierre del todo generando una pérdida de compresión o absorbiendo parte de la alzada de la leva. Para preparaciones extremas, se recurre a la conversión a taqués mecánicos, que garantizan una transmisión directa y exacta del movimiento de la leva [12].

2.5.2.5 Dinámica de gases en la culata

El movimiento del aire dentro de los conductos de la culata no es un flujo constante, sino pulsante. Cada vez que la válvula de admisión se abre, se genera una onda de depresión que debe ser compensada por la inercia del fluido.

Porteo y pulido de conductos (Head Porting): El porteo no consiste simplemente en "agrandar" los agujeros. En un motor atmosférico, un aumento excesivo del diámetro puede reducir la velocidad del fluido, perjudicando el llenado a bajas y medias revoluciones [2].

Mecanizado de conductos: El objetivo es eliminar las rebabas de fundición además de las irregularidades geométricas. Se busca tener una transición suave de los gases desde el colector hasta el asiento de válvula [2].

Acabado superficial (esmerilado y pulido): Existe un mito común sobre el pulido a espejo. En la admisión, una superficie ligeramente rugosa (acabado con grano 80-120) ayuda a crear una "capa límite" turbulenta que evita que el combustible se condense en las paredes y mejora la homogeneidad de la mezcla. El pulido a espejo se reserva exclusivamente para los conductos de escape, donde interesa evacuar el gas lo más rápido posible sin importar la mezcla [12].

2.5.2.6 Optimización del asiento de válvula

El punto de mayor restricción en todo el motor es el área de la cortina de la válvula. Cuando el aire pasa por el estrechamiento de la válvula, se produce un fenómeno conocido como vena contracta, donde la sección efectiva del flujo es menor que la sección física del conducto.

Asientos de tres ángulos: Mediante el mecanizado de los asientos a ángulos de 30°, 45° y 60° como en la Figura 2-13, se suaviza el giro del aire al entrar en la cámara de combustión, reduciendo la turbulencia parásita y aumentando el coeficiente de descarga [12].



Figura 2-13. Válvula modificada y válvula normal (fuente: autoría propia)

Recorte de guías de válvula: En preparaciones de alto nivel, se rebajan las guías de válvula que asoman en el conducto para eliminar obstáculos aerodinámicos, siempre cuidando de no comprometer la estabilidad térmica de la válvula [3].

La combinación de árboles de levas de alto rendimiento y poleas regulables permite al motor superar las restricciones de su diseño original. Mientras que los árboles proporcionan la capacidad teórica de mover más aire (gracias a más alza y duración), las poleas permiten sintonizar esa capacidad con las resonancias de los colectores de admisión y escape, logrando una eficiencia volumétrica cercana al 100% en puntos específicos de la curva de potencia.

2.5.3 Sistemas de admisión

La preparación de la culata y el sistema de admisión representa la intervención más efectiva para desplazar la curva de potencia hacia regímenes de giro elevados. El objetivo es transformar el sistema de admisión de serie diseñado bajo criterios de atenuación acústica y economía de combustible en un sistema de alta conductancia que minimice las pérdidas por bombeo y maximice la eficiencia volumétrica.

2.5.3.1 Mariposa y cuerpo de admisión

Gran parte de los motores actuales y antiguos utilizan una mariposa electrónica y un colector de plástico que, aunque ligero, presenta restricciones volumétricas para un motor que pretenda girar a 7.500 RPM.

Incremento del diámetro de la mariposa: Sustituir la mariposa original por una de mayor diámetro (por ejemplo, adaptando la de otros motores o versiones de competición) permite reducir la caída de presión en el pleno de admisión [8].

Efecto Venturi: Una mariposa mayor reduce la resistencia al paso del aire en plena carga, permitiendo que la presión en el colector sea lo más cercana a la presión atmosférica.

Sustitución del colector de admisión: La transición de un colector de plástico a uno de aluminio elimina las restricciones de diseño impuestas por la fabricación en serie, permitiendo conductos más cortos, rectos y térmicamente estables. El aluminio facilita la optimización del flujo mediante el pulido y ensanchado (porting). Con respecto a los ITBs (Individual Throttle Bodies), al tener una mariposa por cilindro, se elimina el pleno común y las interferencias entre pulsos de admisión de distintos cilindros. Esto mejora drásticamente la respuesta transitoria y permite sintonizar la longitud del trompeta de admisión (ram pipe) para que la onda de choque entre justo antes del cierre de la válvula [3].

2.5.3.2 Campana de admisión

La temperatura del aire es inversamente proporcional a su densidad. Por cada 3°C que logramos bajar la temperatura del aire de entrada, la densidad aumenta aproximadamente un 1%, lo que se traduce directamente en potencia.

Campana de admisión (Airbox): La famosa campana o tuberías de admisión buscan captar el aire directamente del frontal del vehículo, antes de que pase por el radiador [8].

Presurización dinámica: A altas velocidades, la forma de la campana genera una pequeña sobrepresión en la entrada del filtro, compensando parcialmente las pérdidas por fricción de los conductos.

Aislamiento térmico: Es vital que la campana esté fabricada en materiales compuestos (fibra de vidrio o carbono) para evitar el heat soak (absorción de calor) del vano motor [8].

2.5.3.3 Filtro de aire de alto flujo

El filtro de aire es el primer obstáculo del sistema. Un filtro de papel convencional ofrece una gran resistencia debido a su densa trama de fibras.

Filtros de algodón o espuma: Utilizan materiales más permeables impregnados en aceites especiales que atrapan partículas sin frenar el aire. Esto reduce la pérdida de carga inicial [8].

Volumen del pleno y resonancia de Helmholtz: El aire dentro del sistema de admisión se comporta como una masa elástica. Al dimensionar correctamente el volumen de la caja del filtro y los conductos, se puede lograr que la frecuencia natural del aire coincida con el régimen de potencia máxima del motor, "empujando" el aire hacia adentro con más fuerza.

El efecto tumble y la homogeneidad de la mezcla: Un buen flujo no es solo "mucho aire", sino "aire bien movido". El tumble asegura que, a pesar de tener una mariposa de mayor tamaño y conductos más grandes, el combustible se mezcle íntimamente con el aire, evitando fallos de combustión por mezclas pobres localizadas en la cámara [11].

En resumen, la optimización de la dinámica de fluidos de un motor debe ser un enfoque sistémico. No sirve de nada instalar una campana de admisión de competición si la culata tiene restricciones, ni sirve de nada portear la culata si la mariposa limita el paso de aire. La clave del éxito reside en equilibrar la sección de paso de todo el sistema para que la velocidad del aire se mantenga alta y la presión lo más estable posible, permitiendo que el motor aproveche cada miligramo de oxígeno disponible para la combustión.

2.5.4 Sistemas de escape

En un motor de alto rendimiento, el sistema de escape no debe visualizarse como un conjunto de tuberías para evacuar gases, sino como un aparato de sintonía acústica. Su función principal es convertir la energía residual de la combustión en una fuerza de succión que asista activamente a la renovación de la carga en el cilindro.

Cada vez que una válvula de escape se abre, se libera una onda de presión de alta intensidad (pulso de blowdown). Esta onda viaja a través del colector a una velocidad superior a la del sonido (debido a las altas temperaturas) [4].

Ondas de compresión y expansión: Cuando el pulso de presión llega a un punto de discontinuidad (una unión de tubos o el final del colector), una parte de la energía se refleja y vuelve hacia la válvula en forma de onda de expansión (presión negativa) [4].

El éxito de un colector optimizado reside en que esa onda de presión negativa llegue a la válvula de escape justo durante el periodo de solape o cruce de válvulas (overlap). Al crear un vacío en la válvula de escape en ese instante, se succionan los gases quemados remanentes y se "tira" de la mezcla fresca

de admisión hacia el cilindro, logrando una eficiencia volumétrica cercana al 100% en configuraciones atmosféricas [4].

2.5.4.1 Geometría de colectores de una etapa y de dos etapas

- Diseño de una etapa (ej. 4-1): En este diseño, los cuatro tubos primarios convergen en un único colector. Las ondas tienen un recorrido corto y directo. Es ideal para motores que operan en un rango de RPM muy estrecho y elevado (por encima de 7.000 RPM). La desventaja que presenta es que fuera de su "zona de sintonía", las pulsaciones de un cilindro pueden interferir negativamente con el vaciado del cilindro adyacente, provocando una caída drástica del par motor en zonas de medias revoluciones [4].
- Diseño de dos etapas (ej. 4-2-1): Es el diseño más sofisticado para motores de media cilindrada. Los cilindros se emparejan (generalmente 1-4 y 2-3) según el orden de encendido (1-3-4-2). La ventaja es que, al unir los cilindros en dos etapas, se generan dos eventos de reflexión de ondas distintos. Esto crea una "banda de potencia" mucho más ancha, mejorando el par motor en la zona media del cuentavueltas sin sacrificar excesiva potencia en altas revoluciones [3].

Para que la resonancia sea efectiva, el colector debe calcularse bajo tres variables fundamentales:

- Longitud de los primarios (L): Determina el tiempo que tarda la onda en ir y volver. Una tubería más larga sintoniza a bajas RPM; una más corta a altas RPM. La fórmula teórica simplificada $L = 12 \cdot N \cdot v (180 + \theta)$ donde v es la velocidad del sonido en el gas, θ el avance de apertura de escape y N las RPM.
- Diámetro de tubería: Un diámetro pequeño aumenta la velocidad del gas debido al efecto Venturi, lo que mejora el barrido en bajas revoluciones. Sin embargo, si es demasiado estrecho, crea una contrapresión (backpressure) que frena el motor en altas revoluciones [2].
- Igualdad de longitudes (Equal Length): Si los tubos no miden lo mismo, cada cilindro tendrá una sintonía diferente. Esto provoca que el motor sea imposible de carburar o programar con precisión, ya que cada cilindro "respira" de manera distinta [12].

2.5.4.2 Línea de escape

Tras el colector, la línea de escape debe mantener la inercia del gas.

Contrapresión (Backpressure): Un error común es pensar que "un motor necesita contrapresión". En realidad, lo que necesita es velocidad de gas. Una línea demasiado grande hace que los gases se enfríen y pierdan velocidad, destruyendo el efecto de succión.

Materiales: El uso de acero inoxidable T304 no es solo por estética. Su menor rugosidad interna y su capacidad para mantener el calor (energía entálpica) ayudan a que la onda de choque sea más nítida y potente [3].

Con el fenómeno del Scavenging y el cruce de válvulas es como se relaciona el escape con la distribución que tratamos anteriormente. Si instalamos árboles de levas con mucho cruce de válvulas, pero mantenemos el colector de fundición de serie, el motor fallará. El colector de serie no genera la succión necesaria durante el cruce; al contrario, genera contrapresión que empuja gases quemados de vuelta a la admisión [2].

El colector de escape optimizado transforma ese solape en una ventaja, usando el escape para "aspirar" la mezcla hacia el cilindro antes de que el pistón baje.

La optimización de la renovación de la carga es un triángulo equilátero formado por la admisión, la distribución y el escape. Si uno de estos lados es débil, el rendimiento global se desploma. El paso de una configuración de serie a una sintonizada mediante dinámica de ondas permite que un motor diseñado

para la ciudad se convierta en una planta motriz capaz de competir en niveles de potencia específica (CV/Litro) cercanos a los de motores de categorías superiores [1].

2.5.5 Masas rotativas y alternativas

La eficiencia de un motor no solo se mide por la energía química que transforma en presión, sino por la eficiencia con la que gestiona la energía cinética de sus propios componentes internos. En el motor, la reducción de masas rotativas y alternativas es la clave para transformar un motor elástico de calle en un motor de respuesta instantánea y capacidad de giro elevada.

- Masas alternativas: incluyen los pistones, bulones, segmentos y la parte superior de la biela. Estos componentes deben detenerse y acelerarse en sentido contrario dos veces por cada revolución (en el PMS y PMI). El esfuerzo mecánico sobre los tornillos de biela crece de forma exponencial con las RPM, siguiendo la fórmula de la fuerza de inercia: $F_i = m \cdot r \cdot \omega^2 \cdot (\cos\theta + \lambda\cos2\theta)$ donde m es la masa, r el radio del cigüeñal y ω la velocidad angular. Reducir esta masa es vital para la fiabilidad a altas revoluciones [8].
- Masas rotativas: Compuestas por el cigüeñal, el volante motor, el conjunto de embrague y los engranajes de la transmisión. Estas masas no cambian de sentido, pero almacenan energía cinética rotacional ($E_k = \frac{I \cdot \omega^2}{2}$) [8].

2.5.5.1 Volante motor

El volante motor de serie de los motores está diseñado con una masa elevada para actuar como un acumulador de energía, suavizando las pulsaciones del par motor y facilitando el arranque desde parado. Sin embargo, para un uso prestacional, esta inercia es un lastre.

Aligeramiento del volante: Mediante el uso de volantes de acero forjado o aluminio de alta resistencia, se busca reducir el Momento de Inercia (I) [8].

Impacto en la aceleración: Un volante más ligero permite que el motor gane RPM mucho más rápido en marchas cortas (1ª y 2ª), donde la aceleración angular del motor es máxima. Aunque no "crea" caballos de potencia en un banco estático, reduce la potencia absorbida durante la aceleración, lo que se traduce en una mayor potencia efectiva en las ruedas.

Efecto en el frenado motor: Al reducir la energía almacenada, el motor también cae de revoluciones más rápido al levantar el pie del acelerador, permitiendo que las reducciones de marcha sean más precisas y eficaces [4].

2.5.5.2 Optimización de masas no suspendidas

Aunque el motor es el corazón, la potencia debe transmitirse a través de la suspensión y las ruedas. Las masas no suspendidas (llantas, neumáticos, frenos, bujes) afectan directamente a la capacidad del neumático para mantener contacto con el suelo [8].

Llantas de aleación ligera: Reducir el peso en la periferia de la rueda tiene un impacto doble: mejora la calidad de filtración de la suspensión (menor inercia vertical) y reduce la inercia rotativa total del vehículo, mejorando tanto la aceleración como la frenada.

Sistemas de frenado: La instalación de pinzas de aluminio y discos con núcleo de aluminio permite reducir varios kilogramos por cada eje, algo crítico en vehículos de tracción delantera donde el peso está muy centrado en la parte delantera [8].

2.5.5.3 Polea de accesorios

Los motores de serie suelen montar una polea "damper" que consiste en dos masas metálicas unidas por un anillo de goma. Su función es absorber las vibraciones torsionales con el objetivo de aumentar el

confort. El problema es que, a altas RPM, la goma puede fallar por calor y fatiga, provocando el desprendimiento de la polea o desincronizando las marcas de calado.

Sustitución por polea de aluminio sólida: Las poleas de aluminio mecanizado (billet) son mucho más ligeras (reducción de masa rotativa) y eliminan el riesgo de rotura. No obstante, esto obliga a que el equilibrado dinámico del cigüeñal sea perfecto, ya que perdemos el elemento de amortiguación original [12].

En conclusión, la reducción de masas rotativas y alternativas en el motor es una estrategia de "ganancia gratuita" en términos de agilidad. Cada gramo eliminado del tren alternativo reduce las tensiones internas y permite estirar el rango de utilización del motor, mientras que el aligeramiento de la transmisión asegura que la respuesta del acelerador sea telegráfica. Esta preparación es el complemento indispensable a la optimización de la culata, asegurando que el motor no solo respire mejor, sino que se mueva con mucha menos resistencia interna [12].

2.5.6 Sistemas de transmisión

La optimización de la planta motriz debe ir acompañada de un rediseño de la cadena cinemática. El aumento del régimen de giro y la presión media efectiva (BMEP) exige componentes que puedan gestionar picos de par superiores sin deslizamientos térmicos ni roturas estructurales [8].

2.5.6.1 Embrague cerámico

El embrague de serie, basado en compuestos orgánicos, está diseñado para generar una progresividad y el confort. Sin embargo, su coeficiente de fricción (μ) sufre una caída drástica al superar los 250°C, fenómeno conocido como fading (patinamiento) del embrague.

Composición cerámica (Metal-Cerámica): Los discos de embrague de competición utilizan pastillas de materiales sintetizados (cobre, hierro, grafito y cerámica). Estos materiales mantienen un coeficiente μ constante hasta temperaturas cercanas a los 600°C [8].

Diseño de palas (Puck style): A diferencia del disco circular completo, los discos de 3, 4 o 6 palas aumentan la presión específica sobre la superficie de fricción. Esto garantiza una unión solidaria inmediata, eliminando el patinamiento en cambios de marcha rápidos a altas RPM.

Maza de embrague reforzada: No basta con el material del disco; la prensa o maza debe ejercer una carga de cierre superior (medida en Newtons). Un diafragma reforzado asegura que la fuerza de sujeción sea suficiente para vencer el par motor incrementado, aunque esto aumente el esfuerzo necesario en el pedal del conductor [8].

2.5.6.2 Optimización de la relación de transmisión

Un motor atmosférico modificado entrega su potencia en la zona alta del cuentavueeltas. Las relaciones de transmisión de origen suelen ser largas para favorecer el consumo, lo que provoca que, al cambiar de marcha, las RPM caigan fuera de la zona de par óptimo.

Relación de grupo final (Final Drive): Sustituir el grupo piñón-corona por uno más corto (mayor relación numérica, ej. de un 3.9 a un 4.4) multiplica el par en rueda en todas las marchas. Esto compensa la falta de par motor en bajas revoluciones propia de los árboles de levas con mucho cruce [2].

Relaciones cerradas (Close Ratio): El objetivo es que el salto entre marchas (ej. de 2ª a 3ª) sea mínimo (aprox. 1000-1500 RPM). Esto mantiene al motor en su zona de máxima eficiencia volumétrica durante toda la aceleración.

2.5.6.3 Diferenciales autoblocantes

En un coche de tracción delantera potente, la rueda interior en una curva tiende a perder carga y patinar, desperdiciando la potencia. Para mitigar el problema se pueden montar diferenciales.

Diferenciales de discos (LSD de láminas): Utilizan paquetes de discos de fricción precargados. Cuando una rueda pierde tracción, el diferencial bloquea ambos semiejes, repartiendo el par de forma mecánica. Es el sistema más efectivo en competición, permitiendo una aceleración más adelantada al salir de la curva [8].

Diferenciales Torsen (Engranajes helicoidales): Basados en la fricción interna de los engranajes. Son más progresivos y requieren menos mantenimiento que los de discos, siendo ideales para un uso mixto pista/calle.

2.5.6.4 Palieres reforzados

El punto más crítico de la transmisión tras instalar un autoblocante y unos neumáticos de mayor agarre (slicks) son los palieres.

Fatiga por torsión: Al eliminar el patinamiento de las ruedas y del embrague, toda la energía de choque en las salidas recae sobre las juntas homocinéticas y las barras de los palieres [12].

Materiales: Los palieres reforzados utilizan aleaciones de acero al cromo-molibdeno con tratamientos térmicos específicos que permiten un ligero grado de torsión elástica sin llegar a la rotura plástica. Además, las jaulas de las bolas en las juntas homocinéticas se sobredimensionan para evitar el estallido bajo ángulos de giro cerrados [8].

La transmisión es el sistema que gestiona el flujo de energía. En un motor optimizado, los materiales de fricción convencionales fallan por sobrecalentamiento y las relaciones de serie desaprovechan la nueva curva de potencia. La integración de materiales cerámicos en el embrague y una gestión mecánica del reparto de par mediante diferenciales autoblocantes son requisitos para que las modificaciones térmicas del motor resulten en un vehículo dinámicamente superior.

2.5.7 Gestión electrónica del motor

La Unidad de Control del Motor (ECU) es la encargada de coordinar la masa de aire admitida con el gasto másico de combustible y el momento exacto del encendido. En una optimización de rendimiento, la electrónica debe evolucionar de un control basado en el confort y las emisiones hacia una estrategia de máximo rendimiento térmico y seguridad mecánica [11].

2.5.7.1 Desafío de la ECU

La centralita trabaja bajo un modelo de gestión de par. Esto significa que, en motores con mariposa electrónica, el pedal del acelerador no mueve la mariposa directamente, sino que envía una "solicitud de par" a la ECU.

El conflicto con las modificaciones: Al instalar árboles de levas de mayor cruce, la señal de vacío en el colector de admisión se vuelve inestable al ralentí. La ECU original interpreta esto como un fallo y trata de corregirlo cerrando la mariposa o variando el avance, provocando un funcionamiento errático [11].

Reprogramación vs. ECU programable: Para un uso moderado, la reprogramación de la ECU original permite remapear los valores de inyección y encendido. Sin embargo, para competición pura (uso de ITBs o árboles extremos), se suele recurrir a una ECU tipo Standalone (como MaxxECU o Link), que permite un control total en tiempo real (basadas en posición de mariposa y RPM) [11] [8].

2.5.7.2 Optimización del avance de encendido

El avance de encendido es uno de los parámetros que más influye en el par motor. Al haber modificado la culata y, posiblemente, aumentado la relación de compresión efectiva, el frente de llama viaja de forma distinta.

Búsqueda del MBT (Maximum Brake Torque): El objetivo es que la presión máxima de la combustión ocurra aproximadamente entre los 12° y 15° después del Punto Muerto Superior (ATDC) [10].

Sensibilidad a la detonación (Knock): Al aumentar la eficiencia volumétrica, la presión interna en la cámara es mayor. Debemos monitorizar el sensor de picado para evitar la predetonación, especialmente si el motor trabaja con combustibles comerciales. Una gestión electrónica de calidad permite retrasar el encendido cilindro por cilindro ante la aparición de picado [8].

2.5.7.3 Estrategias de inyección

Enriquecimiento en plena carga (WOT): Para obtener el máximo rendimiento y refrigerar internamente la cámara de combustión, se busca una mezcla más rica, cercana a $\lambda = 0.85$ (aprox. 12.5:1 a 13:1). Este exceso de combustible ayuda a reducir la temperatura de los gases de escape (EGT), protegiendo las válvulas de escape y el colector [1].

Escalado de inyectores: Si la optimización de la culata y la admisión aumenta el flujo de aire por encima del 20%, los inyectores de serie (aprox. 150cc/min) pueden alcanzar su ciclo de trabajo máximo (Duty Cycle). Es recomendable sustituirlos por unos de mayor caudal para mantener el tiempo de inyección por debajo del 85% a régimen de potencia máxima [8].

2.5.7.4 Control de la mariposa electrónica

Linealización del pedal: Mediante la edición de los mapas, podemos hacer que la apertura de la mariposa sea 1:1 respecto al pedal. Esto elimina la sensación de filtrado y permite al piloto dosificar el par de forma mucho más precisa en conducción deportiva [11].

Anulación de limitadores de par: La ECU original reduce la apertura de mariposa en ciertas condiciones para proteger la transmisión o reducir emisiones. Estos limitadores se eliminan para permitir el 100% de carga en todo el rango de RPM [4].

2.5.7.5 Sensores críticos

Para que la ECU tome decisiones correctas, la sensorización debe ser impecable:

- Sensor IAT (Intake Air Temperature): Al haber instalado una campana de admisión, es vital que la ECU sepa exactamente a qué temperatura entra el aire para compensar la densidad y evitar el picado si el aire se calienta en exceso.
- Sensor MAP y TPS: En motores con árboles de levas muy agresivos, el vacío en el colector es pobre. Se suele cambiar la estrategia de carga a Alpha-N (basada únicamente en el ángulo de la mariposa y las RPM), ignorando la presión del colector que sería errática [5].

2.5.7.6 Bujías: grado térmico y materiales

La bujía es el "termómetro" de la cámara de combustión. En el motor original, las bujías están diseñadas para durar muchos kilómetros y funcionar en arranques en frío.

Grado térmico: Al aumentar la potencia, la temperatura en la cámara sube. Es imperativo pasar a una bujía más fría (con un aislante más corto para evacuar calor rápidamente hacia la culata). Una bujía demasiado caliente puede provocar preignición, destruyendo el pistón en segundos [1].

Materiales (Iridio y Platino): Estos metales preciosos permiten electrodos centrales mucho más finos (aprox. 0.6 mm). Un electrodo fino requiere menos voltaje para saltar la chispa y reduce el efecto de "apagado" de la llama inicial, mejorando en gran medida combustión en mezclas enriquecidas [8].

Galga (Gap): En motores de alta compresión, se suele reducir la separación de los electrodos (a unos 0.6 - 0.7 mm) para asegurar que la chispa pueda saltar incluso bajo presiones de cámara muy elevadas donde el aire se vuelve un aislante más fuerte [12].

2.5.7.7 Bobina de encendido

Bobinas independientes (COP - Coil On Plug): Una mejora habitual es adaptar bobinas independientes de mayor potencia (como las de motores más modernos). Estas bobinas ofrecen un mayor tiempo de carga (dwell time) y un voltaje de salida superior, que logran garantizar que la energía de la chispa sea constante hasta las 8.500 RPM [8].

Tiempo de carga (Dwell Control): Mediante la gestión electrónica (ECU), se debe ajustar el tiempo de carga de la bobina. Un dwell demasiado corto debilita la chispa; uno demasiado largo sobrecalienta la bobina y puede quemarla [11].

La gestión electrónica es el elemento integrador de todas las modificaciones físicas descritas anteriormente. Un motor con la mejor culata, los mejores árboles y el mejor escape no pasará de ser un conjunto de piezas costosas si la ECU no sabe cómo alimentar y encender esa nueva masa de aire.

El sistema eléctrico pasa de ser un sistema de soporte pasivo a un componente activo del rendimiento. Unas bujías con el grado térmico adecuado, una bobina de alta energía y un cableado simplificado y robusto aseguran que cada ciclo de trabajo ocurra con una precisión de microsegundos.

2.5.8 Sistema de refrigeración de alta eficiencia

2.5.8.1 Radiadores de aluminio de alta capacidad

El radiador original suele combinar un núcleo de aluminio con tanques laterales de plástico. Para una optimización del rendimiento, se opta por radiadores cuyo material sea 100% de aluminio con soldadura TIG [8].

Conductividad y estructura: El aluminio integral ofrece una mayor velocidad en la transferencia de calor. Además, los núcleos de competición suelen ser de "doble o triple paso" (mayor espesor), lo que aumenta la superficie de contacto del refrigerante con las aletas de disipación.

Resistencia mecánica: Los tanques de aluminio eliminan el punto de fallo común original: la unión entre el plástico y el metal, que tiende a fugar bajo las altas presiones de un sistema de refrigeración trabajando al límite.

2.5.8.2 Manguitos de silicona reforzada

Los manguitos de caucho originales se degradan con el tiempo, volviéndose blandos y propensos a colapsar o estallar bajo altas temperaturas.

Material: La silicona reforzada con capas de poliéster o aramida ofrece una resistencia térmica superior (hasta 200°C) y soporta presiones de trabajo mucho más altas.

Dinámica de flujo: El interior de los manguitos de silicona es más liso que el del caucho, lo que reduce las pérdidas de carga por fricción del refrigerante, optimizando el caudal que la bomba de agua puede mover a altas RPM.

2.5.8.3 Flujo de aire

Ventiladores de perfil bajo (Slim Fans): Estos ventiladores (tipo SPAL) mueven un volumen de aire significativamente mayor que los de serie. Al ser más compactos, permiten ganar espacio en el vano motor para la campana de admisión o colectores de escape de mayor tamaño [8].

Termocontactos de grado bajo: Para mejoras de rendimiento en flujo de aire, se instalan, termocontactos que activan los ventiladores a temperaturas ligeramente inferiores (ej. 82°C en lugar de 90°C), manteniendo un margen de seguridad térmica más amplio antes de alcanzar la zona crítica.

- Optimización de fluidos y control térmico

Termostatos de apertura temprana: Se instalan termostatos que abren a 71°C u 82°C. Esto permite que el ciclo de refrigeración comience antes, evitando que la culata alcance temperaturas que puedan degradar la junta o los retenes de válvula.

Aditivos humectantes (Water Wetter): Estos productos reducen la tensión superficial del agua, eliminando las microburbujas de vapor que se forman en las zonas más calientes de la culata. Esto mejora la transferencia de calor de metal a líquido de forma drástica [3].

Bombas de agua de alto flujo: En preparaciones extremas, se puede sustituir la bomba de agua mecánica por una bomba eléctrica controlada por la ECU. Esto elimina la carga parásita sobre el cigüeñal y permite seguir refrigerando el motor incluso cuando este se apaga, evitando choques térmicos [8].

Enfriador de aceite: El enfriador de aceite por intercambio agua-aceite consiste en un cuerpo compacto de láminas de acero inoxidable o aluminio que se instala entre el bloque motor y el filtro de aceite (mediante una placa sándwich específica o una base de filtro modificada). El refrigerante del motor circula por una serie de canales internos, mientras que el aceite circula por canales adyacentes. El calor se transfiere por conducción a través de las paredes metálicas de las placas.



Figura 2-14. Enfriador de aceite de Audi (fuente: *wikimedia*)

Un sistema de refrigeración de alta eficiencia es el seguro de vida de un motor potenciado. Cada modificación realizada en la culata o la electrónica genera un exceso térmico que debe ser gestionado. Mediante el uso de radiadores de aluminio sobredimensionados, manguitos de silicona y una gestión de flujo de aire optimizada, aseguramos que el motor mantenga su rendimiento constante desde la primera hasta la última vuelta, protegiendo la inversión mecánica realizada en el resto del proyecto.

3 DESARROLLO DEL TFG

El objeto de estudio de este trabajo es el motor NFU, perteneciente a la familia de motores TU5JP4 del grupo PSA. Se trata de un motor de ciclo Otto de cuatro cilindros en línea, dispuesto de forma transversal en el vano delantero del vehículo. Este propulsor presenta una cilindrada total de 1.587 cm³, lograda mediante una arquitectura de "carrera larga" con un diámetro de 78,5 mm y una carrera de 82 mm, lo que favorece el llenado de los cilindros y la entrega de par en regímenes medios [16].

El motor opera con una relación de compresión (RC) de 11,0:1, un valor notablemente superior a los motores de carburación, lo que permite una mayor eficiencia térmica. En su configuración de serie, el propulsor entrega una potencia máxima de 80 kW (109 CV) a 5.800 RPM y un par motor máximo de 147 Nm a 4.000 RPM.

Gracias a esta configuración mecánica, el vehículo alcanza una aceleración de 0 a 100 km/h en aproximadamente 9,7s (dependiendo del modelo de chasis y la relación de transmisión final), demostrando una curva de potencia mucho más elástica y eficiente que las generaciones anteriores [18].



Figura 3-1. Motor NFU (fuente: autoría propia)

Los pistones del NFU presentan una cabeza con un diseño específico para optimizar la turbulencia en la cámara de combustión (efecto tumble). La relación de compresión de serie (aproximadamente 11:1) es un punto de partida excelente para una preparación atmosférica, permitiendo jugar con el avance de encendido sin alcanzar prematuramente el límite de detonación. El cigüeñal del NFU es de acero forjado con 8 contrapesos, equilibrado estática y dinámicamente. Las bielas son de tipo “fracturadas”, lo que garantiza un asiento perfecto de los casquillos y reduce la posibilidad de deformación a altas revoluciones [17] [19].

En cuanto al tren de distribución, el sistema DOHC movido por correa dentada acciona sus 16 válvulas. La limitación del NFU de serie no está en el diámetro de sus válvulas, sino en el perfil de sus árboles de levas, diseñados para mantener un ralentí estable y bajas emisiones [17] [19].

Coletores más restrictivos que desde el punto de vista del rendimiento, es uno de los componentes más deficientes. Se trata de un diseño 4-1 de fundición de hierro, con catalizador integrado inmediatamente después de la salida de la culata [17] [19].

El NFU introdujo la mariposa electrónica, un avance en la gestión de la carga, pero un desafío para la respuesta instantánea del acelerador. Se trata de una mariposa de 52mm programada para una apertura progresiva. Supone un desafío ya que el sensor del pedal envía una señal de voltaje a la ECU, la cual procesa esa señal y consulta sus mapas de limitación de par (para evitar tirones o proteger la transmisión) y, por último, envía una señal al motor eléctrico de la mariposa para que abra. Este proceso introduce milisegundos de retraso que se traducen en una falta de conexión directa entre el pie del piloto y la respuesta del motor. También hay que destacar que, la mariposa no abre necesariamente al 100% de forma inmediata, aunque tú pises a fondo ya que para suavizar la conducción y reducir las emisiones de NO_x , la ECU abre la mariposa de forma progresiva [17] [19].

3.1 Metodología

La ejecución práctica de este trabajo de fin de grado se ha estructurado como un proyecto de ingeniería aplicada, desarrollado íntegramente en un entorno de trabajo privado. El objetivo metodológico no fue la simple sustitución de componentes, sino la implementación de un ciclo de mejora continua basado en el diagnóstico metrológico, la detección de ineficiencias y la validación técnica.

La capacidad de ejecución en un taller propio ha permitido una supervisión exhaustiva de cada ajuste, aplicando conocimientos avanzados del sector del motorsport para garantizar que cada intervención cumpliera con estándares de alta competición.

El punto de partida de la fase práctica consistió en un análisis crítico de la unidad NFU original. La metodología no se limitó al desmontaje, sino a una evaluación técnica de los flujos de trabajo del motor de serie. Mediante el uso de instrumentación de precisión (micrómetros, comparadores y calibres), se procedió a verificar las tolerancias internas y a identificar los puntos donde la fabricación en serie de PSA priorizaba la economía de costes sobre el rendimiento absoluto.

Este diagnóstico inicial permitió establecer una jerarquía de necesidades: ¿dónde estaba perdiendo energía el motor? La detección de pérdidas por inercias excesivas, restricciones en la respiración del motor y limitaciones térmicas fue lo que dictó el camino a seguir en la selección de nuevas soluciones mecánicas.

Una vez identificadas las áreas de mejora, la metodología se centró en el ajuste de precisión. Al trabajar de forma autónoma, se ha podido dedicar el tiempo necesario a tareas que en un entorno comercial suelen omitirse por falta de rentabilidad horaria.

Se aplicaron técnicas de calado dinámico para la distribución, donde la medición de ángulos y alzadas se convirtió en el eje central del montaje. Este enfoque permitió que el motor no solo funcionara, sino que estuviera "sintonizado" para maximizar la eficiencia volumétrica. Cada componente integrado

fue verificado para asegurar que su interacción con el resto de sistemas fuera armónica, evitando incompatibilidades mecánicas que pudieran comprometer la fiabilidad a largo plazo.

Trabajar en un garaje privado ha exigido una gran capacidad de adaptación mecánica. Ante la imposibilidad de recurrir a soporte industrial externo inmediato, se aplicaron soluciones creativas y rigurosas para la integración de periféricos. Esto incluyó el rediseño de soportes, la gestión de espacios en el vano motor para mejorar el intercambio térmico y la optimización de los sistemas de fluidos.

La metodología de montaje siguió un orden lógico de "limpieza y seguridad", donde cada unión roscada fue sometida a pares de apriete específicos y marcada con pintura de trazabilidad. Este rigor operativo es el que permite que un proyecto desarrollado de forma independiente alcance los niveles de rendimiento y seguridad exigidos en una ingeniería de motores.

Finalmente, la metodología integró la fase física con la digital. El ensamblaje mecánico se realizó siempre con la vista puesta en la posterior calibración electrónica. Se preparó el hardware para que los sensores ofrecieran lecturas limpias y precisas, facilitando así la labor de reprogramación de mapas. Esta visión integral (hardware-software) es la que garantiza que las modificaciones realizadas se traduzcan en una entrega de par y potencia superior, transformando un motor de calle en un propulsor de alto rendimiento.

Este proceso de ejecución se detalla pormenorizadamente a continuación, tal como se desarrolla en las fases:

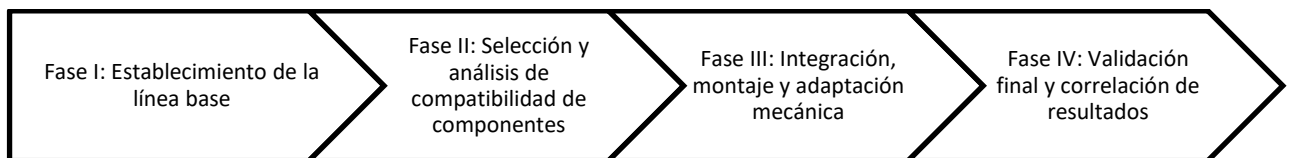


Figura 3-2. Fases del desarrollo del proyecto (fuente: autoría propia)

3.1.1 Fase I: Establecimiento de la línea base

El punto de partida de la metodología fue la obtención de una referencia empírica y contrastable del rendimiento del motor en su estado estrictamente original. Este paso es crítico en cualquier proyecto de ingeniería de motores, ya que permite validar que la unidad motriz es una base apta para la potenciación, descartando fallos ocultos que podrían amplificarse tras las modificaciones.

El vehículo se sometió a una sesión de lanzadas en un banco de potencia dinamométrico de rodillos inerciales (Sección 3.2.3). Para asegurar la repetibilidad y veracidad de los datos, se siguió un protocolo estricto:

- Acondicionamiento térmico: Se rodó el vehículo hasta alcanzar las temperaturas de servicio nominales (90°C de refrigerante y mínimo 80°C de aceite), garantizando que las tolerancias internas y la viscosidad del lubricante fueran las óptimas para el ensayo.
- Parámetros de ventilación: Se empleó un ventilador centrífugo industrial de gran caudal para simular el flujo de aire dinámico y evitar el fenómeno de heat soak (acumulación de calor en el vano motor) que falsearía los resultados a la baja.

Los resultados de la línea base arrojaron una potencia máxima de 108 CV, una cifra extraordinariamente cercana a los 109 CV (80 kW) nominales declarados por PSA. Este hallazgo es fundamental para la metodología ya que confirma que el motor, pese a su antigüedad cronológica, mantiene una estanqueidad de cámara y una salud de válvulas impecable. El bajo kilometraje (inferior a los 50.000 km) ha sido determinante para evitar el desgaste de los segmentos, manteniendo una presión media efectiva (PME) constante en todos los cilindros.

3.1.2 Fase II: Selección y análisis de compatibilidad de componentes

En la fase de ingeniería de selección el objetivo fue alcanzar una configuración que resolviera las carencias de par y potencia detectadas en las experiencias previas en competición (Sección 1.2), manteniendo una alta fiabilidad. Para ello, se optó por una estrategia de modularidad técnica, que es un principio de ingeniería en el que un motor se divide en unidades más pequeñas o "módulos" que pueden intercambiarse o sustituirse de manera independiente, en este contexto aprovechando que el grupo PSA utiliza arquitecturas compartidas en sus familias de motores de 8 y 16 válvulas de la serie TU (Secciones 2.4.2.1 y 2.4.2.2).

3.1.2.1 Estrategia de modularidad PSA (Recambios OEM)

En lugar de recurrir exclusivamente a piezas de competición de alto coste, se optó por una filosofía de "cross-model sourcing", que consiste en utilizar componentes diseñados originalmente para un modelo específico en otros modelos diferentes, ya sean de la misma marca o de marcas distintas dentro de un mismo grupo industrial. Se analizaron las fichas técnicas de diversos modelos de la marca (Citroën AX, Peugeot 106 GTI, 206 GTI, etc.) para identificar componentes originales que ofrecieran una mejora prestacional directa:

- Tren de distribución y culata: Se seleccionaron los árboles de levas y poleas de distribución del motor NFX, cuya alzada y diagrama de tiempos son más agresivos que los del NFU original.
- Gestión de flujo y admisión: Se integraron el colector de admisión, la mariposa y los colectores de escape de variantes superiores de PSA, buscando optimizar la dinámica de fluidos sin comprometer la fiabilidad estructural.
- Transmisión y frenado: Se instaló una caja de cambios con relaciones más cerradas y una bomba de freno de mayor caudal, ambas procedentes de otros modelos del grupo, para mejorar la respuesta del vehículo ante las nuevas exigencias de potencia.

Nota técnica: Estas piezas fueron adquiridas tanto en el mercado de recambios nuevos como en el mercado de ocasión.

3.1.2.2 Integración de componentes de alto rendimiento (Aftermarket)

Para aquellos sistemas donde las piezas originales de PSA representaban un límite físico para el rendimiento, se seleccionaron componentes específicos de la industria auxiliar, enfocados en tres pilares: reducción de inercias, gestión térmica y seguridad.

Optimización de masas rotativas: Para mejorar la respuesta transitoria del motor, se adquirió un volante motor aligerado y una polea de cigüeñal mecanizada en CNC. Estos elementos reducen drásticamente la energía necesaria para acelerar el tren alternativo.

Gestión térmica avanzada: Se seleccionó un radiador de aluminio de 52 mm y un kit de manguitos de silicona reforzada, garantizando que el sistema sea capaz de disipar el calor generado en condiciones de uso intensivo.

Refuerzo del tren motriz y frenado: Ante el incremento de par motor, se instalaron palieres reforzados. En el apartado de seguridad, se optó por latiguillos metálicos, pastillas de freno de alto coeficiente de fricción y líquido de frenos de alto punto de ebullición.

3.1.3 Fase III: Integración, montaje y adaptación mecánica

Esta fase comprende la ejecución física del proyecto en el taller, transformando la selección teórica de componentes en una unidad funcional. La metodología de trabajo no se limitó a un ensamblaje convencional, sino que se estructuró como un proceso de integración técnica donde se debieron resolver las incompatibilidades naturales entre componentes de distintas generaciones de la familia TU. Este proceso se llevó a cabo de forma íntegra en una unidad de taller privada. A pesar de realizarse en un

entorno de trabajo autónomo, la metodología de ensamblaje se ha alineado con los principios de gestión de calidad de la norma ISO 9001, asegurando la trazabilidad de cada componente y la validación de cada proceso de apriete mediante instrumentación calibrada.

3.1.4 Fase IV: Validación final y correlación de resultados

La metodología adoptada para la cuantificación de las mejoras prestacionales se ha estructurado bajo un diseño experimental de "antes y después" (Baseline vs. Final Stage). Esta decisión técnica se fundamenta en los siguientes puntos

En el diseño de experimentos ideal, se procedería a la instalación y ensayo individual de cada componente para aislar su ganancia neta. Sin embargo, en el contexto de este proyecto, dicha metodología se descartó por los siguientes motivos técnicos y logísticos:

- Interdependencia mecánica: Componentes como los árboles de levas y las poleas regulables actúan como una unidad funcional. Realizar lanzadas individuales de estas piezas carecería de sentido físico, ya que su rendimiento máximo es sinérgico.
- Variabilidad atmosférica: El rendimiento de un motor de combustión interna es altamente sensible a la temperatura ambiente, humedad relativa y presión barométrica. Realizar múltiples sesiones en días distintos introduciría un error sistemático difícil de corregir, invalidando la comparación precisa entre piezas.
- Viabilidad económica y operativa: El proceso de montaje y desmontaje recurrente de componentes internos (que implica sustitución de juntas, calados de distribución y consumibles) supondría una carga operativa y un coste financiero desproporcionado para el marco de este trabajo.

Por consiguiente, se optó por un protocolo de validación de conjunto final. Tras la línea base, se procedió a la implementación integral de todas las mejoras mecánicas y periféricas descritas, culminando con una serie de lanzadas finales. Este enfoque permite evaluar el rendimiento global del sistema optimizado, reflejando la ganancia real de potencia y par que el usuario experimenta en condiciones de uso efectivo.

3.2 Instrumentación y equipos de medida

Para garantizar que las modificaciones mecánicas se mantenían dentro de las tolerancias de ingeniería y para validar los resultados finales, se ha empleado la siguiente instrumentación de precisión:

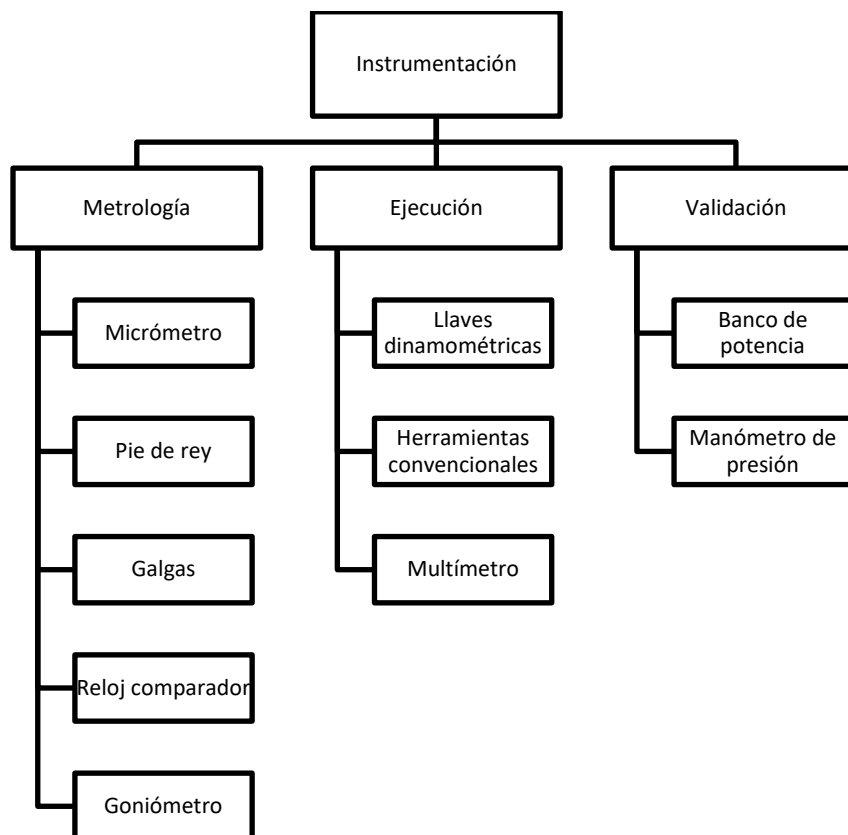


Figura 3-3. Clasificación instrumentos de medida según función técnica (fuente: autoría propia)

3.2.1 Instrumentos de metrología

- Micrómetro de exteriores y de interiores (alexómetro)

Función en el proyecto: Verificación del desgaste de los cilindros, medición de los apoyos del cigüeñal y comprobación de los diámetros de los pistones.

Funcionamiento: Basado en el tornillo micrométrico, permite medir dimensiones con una precisión de milésimas de milímetro (micras). El alexómetro, específicamente, se introduce en el cilindro para detectar ovalaciones o conicidades mediante un reloj comparador acoplado que traduce el desplazamiento radial en una lectura visual.

- Pie de rey

Función en el proyecto: Medición de diámetros de poleas, longitudes de tornillería, profundidades de conductos y dimensiones generales de los periféricos.

Funcionamiento: Instrumento versátil que utiliza una escala principal y un nonio para medir dimensiones externas, internas y profundidades con una precisión de 0,01mm.

- Galgas de espesores

Función en el proyecto: Verificación del juego de montaje entre componentes y comprobación de la holgura de los electrodos de las bujías para optimizar el salto de chispa.

Funcionamiento: Consiste en un juego de láminas de acero calibradas con espesores que varían en incrementos de centésimas de milímetro. Es un instrumento de medición por comparación directa que

permite determinar espacios libres donde no es posible introducir un calibre. En el motor NFU, se utilizaron para asegurar que las tolerancias de montaje de los nuevos componentes de la distribución se mantenían dentro de los márgenes operativos de seguridad.



Figura 3-4. Galgas de espesores (fuente: *wikimedia*)

- Reloj comparador

Función en el proyecto: Esencial para el calado de la distribución y la comprobación del "alabeo" o descentramiento de piezas rotativas (como el volante motor o la polea CNC).

Funcionamiento: Dispositivo que mide desplazamientos lineales extremadamente pequeños mediante un palpador conectado a un tren de engranajes que amplifica el movimiento en una esfera graduada. Se utilizó junto al punto muerto superior (PMS) real para determinar el cruce de válvulas exacto.

- Goniómetro

Función en el proyecto: Determinación de los ángulos de apertura y cierre de válvulas en el cigüeñal y aplicación de pares de apriete angulares en los tornillos de culata.

Funcionamiento: Un disco circular graduado en 360° que se fija al cigüeñal. Permite correlacionar la posición lineal del pistón con la posición angular del motor, algo indispensable para ajustar árboles de levas de altas prestaciones.

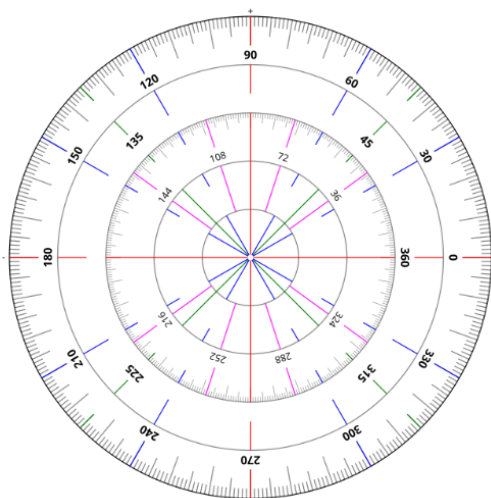


Figura 3-5. Goniómetro (fuente: *wikimedia*)

3.2.2 Instrumentos de la fase de ejecución

- Llaves dinamométricas

Función en el proyecto: Aplicación de los pares de apriete especificados por PSA y por los fabricantes de componentes de alta competición.

Funcionamiento: Herramienta de apriete que incorpora un mecanismo que permite aplicar una tensión exacta a la tornillería. Evita la deformación plástica de los tornillos y asegura una presión uniforme en juntas críticas como la de culata.



Figura 3-6. Llave dinamométrica (fuente: *wikimedia*)

- Herramienta convencional

Más allá de la instrumentación metrológica, la ejecución física del proyecto requirió el uso intensivo de herramienta de taller convencional y maquinaria electroportátil para operaciones de desmontaje, adaptación y ensamblaje. Se emplearon juegos de llaves fijas, combinadas y carracas de diversas medidas para el manejo de la tornillería general, así como puntas específicas Allen y Torx, imprescindibles en la arquitectura de los motores PSA para el acceso a componentes de la culata y periféricos.

Para las fases de adaptación mecánica, se utilizaron herramientas de corte y desbaste como la amoladora angular (radial) con discos de corte fino, el taladro para la creación de nuevos puntos de anclaje y el Rotalix (multiherramienta rotativa) para el acabado de precisión en superficies de difícil acceso. Durante el montaje del tren de transmisión, fue indispensable el uso de un centrador de embrague para garantizar la alineación axial del conjunto, así como pistolas neumáticas de impacto para asegurar el desprendimiento de elementos con altos pares de fijación. Finalmente, la estanqueidad y el acabado profesional de la unidad se lograron mediante el uso y la aplicación técnica de pastas de juntas de alta temperatura, asegurando un sellado hermético en cárter y tapas, vital para la fiabilidad del propulsor bajo las nuevas exigencias de rendimiento.

- Multímetro digital

Función en el proyecto: Diagnóstico y validación del sistema eléctrico, comprobación de la continuidad del cableado de la nueva bobina y verificación de los voltajes de señal de los sensores (TPS y MAP) antes de la reprogramación.

Funcionamiento: Instrumento electrónico que combina varias funciones de medición en una sola unidad (voltaje, resistencia e intensidad). Se utilizó fundamentalmente para asegurar que la integración de la ECU monoconector recibía los valores de resistencia adecuados de los sensores del motor, evitando así lecturas erróneas que pudieran derivar en un funcionamiento deficiente durante la fase de ajuste de mapas.

3.2.3 Instrumentos de validación

- Banco de potencia de rodillos inerciales

Función en el proyecto: Medición de las curvas de par motor y potencia efectiva, así como la monitorización de la mezcla aire-combustible en tiempo real durante las lanzadas.

Funcionamiento: El vehículo se posiciona con el eje motriz sobre unos rodillos con una inercia conocida. Al acelerar, el software del banco calcula la fuerza ejercida basándose en la aceleración angular de los rodillos. Mediante sensores inductivos que miden las RPM del motor, el sistema desglosa la potencia y el par, aplicando factores de corrección atmosférica (DIN 70020) para normalizar los resultados. Este método es el más representativo para este proyecto, ya que permite visualizar mediante una gráfica de dos ejes la correlación entre la potencia (CV) y el par motor (Nm) respecto al régimen de giro (RPM).

Norma de aplicación: En ingeniería de automoción, la potencia medida por un dinamómetro de rodillos no puede considerarse un valor absoluto sin antes ser sometida a un proceso de normalización. Dado que la densidad del aire y por ende la concentración de oxígeno disponible para la combustión fluctúa según la temperatura ambiente y la presión atmosférica, los resultados brutos obtenidos en el banco de potencia deben corregirse mediante factores de compensación. Para este proyecto, se ha seleccionado la Norma DIN 70020 como estándar de referencia.

La elección de la norma DIN 70020 responde a una decisión técnica basada en la representatividad y la tradición en el sector del motorsport europeo. Esta norma establece unas condiciones de referencia de 20 °C (293 K) y una presión atmosférica de 1013,25 hPa. Durante las sesiones de pruebas en banco para el motor NFU, las condiciones ambientales del taller se aproximaron notablemente a estos valores, lo que minimiza el coeficiente de corrección aplicado y garantiza que los datos presentados sean lo más fieles posible a la realidad mecánica del propulsor sin dependencias excesivas de algoritmos externos.

La fórmula de corrección DIN es:

$$k_d = \left(\frac{1013}{P} \right) \times \left(\frac{T + 273}{293} \right)^{0,5}$$

Donde P es la presión atmosférica real el día de la prueba y T es la temperatura en el taller (°C).

Es importante señalar que se evaluó la posibilidad de aplicar otros estándares internacionales, como la ISO 1585. Esta última es la norma que el Grupo PSA utiliza para las homologaciones de serie de sus vehículos, pero presenta una mayor exigencia al fijar la temperatura de referencia en los 25 °C. El uso de la norma ISO habría arrojado cifras ligeramente más conservadoras (entre un 1% y un 2% inferiores), debido a que asume un aire menos denso por el incremento de temperatura.



Figura 3-7. Banco de potencia de rodillos inerciales (fuente: *dynostar*)

- Manómetros de presión

Función en el proyecto: Comprobación de la presión de rampa de inyección y verificación de fugas en el sistema de admisión y vacío.

Funcionamiento: Transductores mecánicos que miden la diferencia de presión entre el fluido interno y la presión atmosférica, garantizando que el hardware de alimentación está entregando el caudal necesario.

3.3 Toma de datos

Antes de proceder a la fase de potenciación y ensamblaje final, es imperativo realizar una auditoría dimensional de los componentes internos del motor NFU. Este proceso, conocido en la alta competición como Blueprinting, tiene como objetivo verificar que cada elemento se encuentra dentro de las tolerancias de servicio del fabricante y, sobre todo, evaluar el estado de fatiga tras su vida útil previa. Un motor optimizado para alto rendimiento exige una precisión micrométrica; cualquier desviación en los huelgos de aceite o en la geometría de los cilindros comprometería no solo la potencia final, sino la fiabilidad del conjunto a regímenes elevados.

Para llevar a cabo esta toma de datos, se ha empleado el instrumental de precisión introducido en los capítulos anteriores. El uso combinado del micrómetro para diámetros exteriores, el alexómetro para la verificación de camisas y el pie de rey para dimensiones generales, permite obtener una radiografía exacta del estado mecánico. En los siguientes subapartados se detalla la metodología de medición y los hallazgos obtenidos en cada grupo cinemático.

3.3.1 Bloque motor y pistones

En este bloque se analiza la estanqueidad y el rozamiento. Se detallará la medición del diámetro y altura de los cilindros mediante alexómetro para detectar posibles ovalamientos o conicidades, así como la verificación del diámetro de los pistones con micrómetro para asegurar el huelgo de falda adecuado.

Para la verificación del bloque motor, se ha empleado un alexómetro de precisión (resolución 0,01 mm) previamente calibrado con un micrómetro de exteriores, permitiendo determinar con exactitud el diámetro, la conicidad y el posible ovalamiento de cada cilindro frente a las cotas nominales del fabricante.

Medidas	Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3	Cilindro 4
Nominal	78,5 [+0; +0,018]	78,5 [+0; +0,018]	78,5 [+0; +0,018]	78,5 [+0; +0,018]
Realizada	78,503	78,505	78,504	78,508
Tolerancias	+0,015	+0,013	+0,014	+0,010
	-0,003	-0,005	-0,004	-0,008

Tabla 3-1. Medición del diámetro de los cilindros (fuente: autoría propia)

Medidas	Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3	Cilindro 4
Nominal	265,23 [$\pm 0,1$]	265,23 [$\pm 0,1$]	265,23 [$\pm 0,1$]	265,23 [$\pm 0,1$]
Realizada	265,26	265,25	265,25	265,26
Tolerancias	+0,07	+0,08	+0,08	+0,07
	-0,13	-0,12	-0,12	-0,13

Tabla 3-2. Medición de la altura de los cilindros (fuente: autoría propia)

Medidas	Pistón 1	Pistón 2	Pistón 3	Pistón 4
Nominal	78,455 [+0; +0,015]	78,455 [+0; +0,015]	78,455 [+0; +0,015]	78,455 [+0; +0,015]
Realizada	78,459	78,46	78,462	78,46
Tolerancias	+0,011	+0,01	+0,008	+0,01
	-0,004	-0,005	-0,007	-0,005

Tabla 3-3. Medición del diámetro de los pistones (fuente: autoría propia)

Tras el análisis dimensional del bloque motor, se observa en las tablas comparativas que tanto la conicidad como el ovalamiento de los cuatro cilindros son prácticamente inexistentes, manteniéndose el diámetro de los pistones muy cercano a su cota nominal. Al verificar que todos los valores se encuentran dentro de las tolerancias recomendadas por PSA, se valida el conjunto para su uso en altas prestaciones, descartando la necesidad de rectificado o sustitución de elementos del grupo térmico.

3.3.2 Cigüeñal y bielas

Se documenta el estado de los componentes que soportan las mayores cargas inerciales. Se incluye la medición de la altura del cuerpo de biela, así como los diámetros de su cabeza y pie, cruciales para el correcto alojamiento de los cojinetes. Asimismo, se analiza el cigüeñal mediante la medición de los diámetros y espesores de las muñequillas (elemento de anclaje de la biela con el cigüeñal), garantizando que la película de aceite trabaje en condiciones hidrodinámicas óptimas.

Haciendo uso de un micrómetro de exteriores, se ha procedido a la medición sistemática de los diámetros y espesores de las muñequillas del cigüeñal (eje cilíndrico sobre el cual se monta la cabeza de la biela), verificando que no existan desgastes asimétricos que comprometan el equilibrado dinámico del conjunto a altas revoluciones.

La inspección dimensional de las bielas se ha realizado mediante un pie de rey y un micrómetro de interiores, herramientas con las que se han auditado la altura del cuerpo y los diámetros de cabeza y pie de biela, asegurando que las tolerancias de alojamiento de los cojinetes permitan una lubricación hidrodinámica estable.

Medidas	Muñequilla biela 1	Muñequilla biela 2	Muñequilla biela 3	Muñequilla biela 4
Nominal	45 [-0,025; -0,009]	45 [-0,025; -0,009]	45 [-0,025; -0,009]	45 [-0,025; -0,009]
Realizada	44,987	44,988	44,988	44,986
Tolerancias	+0,004	+0,003	+0,003	+0,005
	-0,012	-0,013	-0,013	-0,011

Tabla 3-4. Medición del diámetro de las muñequillas de biela (fuente: autoría propia)

Medidas	Muñequilla biela 1	Muñequilla biela 2	Muñequilla biela 3	Muñequilla biela 4
Nominal	23,6 [+0; +0,052]	23,6 [+0; +0,052]	23,6 [+0; +0,052]	23,6 [+0; +0,052]
Realizada	23,620	23,622	23,623	23,620
Tolerancias	+0,032 -0,020	+0,030 -0,022	+0,029 -0,023	+0,032 -0,020

Tabla 3-5. Medición del espesor de las muñequillas de biela (fuente: autoría propia)

Medidas	Biela 1	Biela 2	Biela 3	Biela 4
Nominal	133,5 [$\pm 0,07$]	133,5 [$\pm 0,07$]	133,5 [$\pm 0,07$]	133,5 [$\pm 0,07$]
Realizada	133,48	133,51	133,49	133,48
Tolerancias	+0,09 -0,05	+0,06 -0,08	+0,08 -0,06	+0,09 -0,05

Tabla 3-6. Medición de la altura del cuerpo de biela (fuente: autoría propia)

Medidas	Biela 1	Biela 2	Biela 3	Biela 4
Nominal	48,655 [+0; +0,016]	48,655 [+0; +0,016]	48,655 [+0; +0,016]	48,655 [+0; +0,016]
Realizada	48,660	48,659	48,660	48,661
Tolerancias	+0,11 -0,05	+0,12 -0,04	+0,11 -0,05	+0,10 -0,06

Tabla 3-7. Medición del diámetro de la cabeza de biela (fuente: autoría propia)

Medidas	Biela 1	Biela 2	Biela 3	Biela 4
Nominal	19,463 [+0; +0,017]	19,463 [+0; +0,017]	19,463 [+0; +0,017]	19,463 [+0; +0,017]
Realizada	19,465	19,466	19,469	19,466
Tolerancias	+0,015 -0,002	+0,014 -0,003	+0,011 -0,006	+0,014 -0,003

Tabla 3-8. Medición del diámetro del pie de biela (fuente: autoría propia)

La inspección del cigüeñal revela un estado de conservación excepcional, con muñequillas de biela que presentan superficies especulares y diámetros constantes. Las tablas de metrología certifican que el espesor de los apoyos cumple estrictamente con las especificaciones técnicas originales, asegurando una película de aceite estable a 7.500 RPM. Debido a esta conformidad técnica, se mantiene el cigüeñal original para la fase de ensamblaje final.

Los resultados obtenidos en la medición de las bielas confirman una simetría perfecta en las alturas de cuerpo y una concentricidad óptima en los alojamientos de cabeza y pie. Como se puede contrastar en los datos recogidos, el huelgo medido es ideal para el montaje.

3.3.3 Válvulas

Por último, se verifica el estado de la culata centrándose en el diámetro del vástago de todas las válvulas. Esta medida es crítica para asegurar que no existan huelgos excesivos en las guías que puedan provocar consumo de aceite o, en el peor de los casos, una rotura por fatiga vibratoria.

La integridad del sistema de distribución se ha validado midiendo el diámetro del vástago de cada una de las 16 válvulas con un micrómetro de alta precisión, garantizando que el huelgo entre vástago y guía se mantenga dentro de los límites de servicio para evitar oscilaciones parásitas a 7.500 RPM.

Medidas cilindro 1	Válvula admisión 1	Válvula admisión 2	Válvula escape 1	Válvula escape 2
Nominal	6,97 [-0;015; +0]	6,97 [-0;015; +0]	6,97 [-0;015; +0]	6,97 [-0;015; +0]
Realizada	6,966	6,965	6,965	6,967
Tolerancias	+0,004	+0,005	+0,005	+0,003
	-0,011	-0,010	-0,010	-0,012

Tabla 3-9. Medición del diámetro del vástago de las válvulas (fuente: autoría propia)

Medidas cilindro 2	Válvula admisión 1	Válvula admisión 2	Válvula escape 1	Válvula escape 2
Nominal	6,97 [-0;015; +0]	6,97 [-0;015; +0]	6,97 [-0;015; +0]	6,97 [-0;015; +0]
Realizada	6,965	6,965	6,966	6,964
Tolerancias	+0,005	+0,005	+0,004	+0,004
	-0,010	-0,010	-0,011	-0,011

Tabla 3-10. Medición del diámetro del vástago de las válvulas (fuente: autoría propia)

Medidas cilindro 3	Válvula admisión 1	Válvula admisión 2	Válvula escape 1	Válvula escape 2
Nominal	6,97 [-0;015; +0]	6,97 [-0;015; +0]	6,97 [-0;015; +0]	6,97 [-0;015; +0]
Realizada	6,966	6,967	6,965	6,966
Tolerancias	+0,004	+0,003	+0,005	+0,004
	-0,011	-0,012	-0,010	-0,011

Tabla 3-11. Medición del diámetro del vástago de las válvulas (fuente: autoría propia)

Medidas cilindro 4	Válvula admisión 1	Válvula admisión 2	Válvula escape 1	Válvula escape 2
Nominal	6,97 [-0;015; +0]	6,97 [-0;015; +0]	6,97 [-0;015; +0]	6,97 [-0;015; +0]
Realizada	6,967	6,965	6,964	6,964
Tolerancias	+0,003	+0,005	+0,006	+0,006
	-0,012	-0,010	-0,009	-0,009

Tabla 3-12. Medición del diámetro del vástago de las válvulas (fuente: autoría propia)

La toma de datos de las 16 válvulas muestra un desgaste por fricción mínimo en los vástagos, situándose todas las medidas en el rango superior de las tolerancias de servicio. Esta estabilidad dimensional garantiza un guiado preciso y una estanqueidad óptima en la cámara de combustión. Al no presentar deformaciones ni reducciones de sección fuera de margen, se valida el reaprovechamiento del tren de válvulas original, centrando los esfuerzos de la culata únicamente en la optimización de los conductos.

3.4 Actuaciones

3.4.1 Bloque motor y conjunto interno

En el presente proyecto, se ha optado por mantener la integridad cinemática y estructural del conjunto inferior del motor (bottom end), conservando sin alteraciones los pistones, camisas, cigüeñal y bielas originales. Esta decisión técnica se fundamenta en la probada toma de datos del bloque motor de la familia TU5 de PSA, cuya arquitectura sobredimensionada ha mostrado una elevada resistencia mecánica y una excelente tolerancia a la fatiga. Al partir de una base con tal solvencia estructural, se asegura que el incremento de las sollicitaciones térmicas y mecánicas derivado de la potenciación no comprometa la fiabilidad operativa del propulsor a largo plazo.

El enfoque de la optimización se ha desplazado, por tanto, hacia la mejora del rendimiento volumétrico mediante modificaciones en los sistemas periféricos y en los componentes internos de la distribución, modificando así el diagrama de distribución. El objetivo primordial es demostrar que es posible obtener una ganancia sustancial de rendimiento a través de la optimización de los ciclos de admisión y escape, así como del ajuste de los tiempos de apertura de válvulas. Estas intervenciones no solo presentan una relación coste-efectividad superior, sino que resultan más accesibles y sencillas de implementar en entornos de preparación estándar, evitando el elevado coste y la complejidad técnica que supondría el mecanizado interno o el equilibrado de componentes rotativos.

En el proceso de optimización del motor NFU, uno de los factores críticos que se ha tenido que reevaluar es la capacidad del lubricante para mantener la integridad de los componentes internos. Originalmente, este propulsor está diseñado para operar con aceites de viscosidad moderada (como el 10w40 o 5w40), orientados a la reducción de fricciones internas y al ahorro de combustible en condiciones de uso civil. Sin embargo, las modificaciones realizadas en este proyecto pueden alterar el compromiso de lubricación original, obligando a la transición hacia un aceite de mayor viscosidad: el SAE 15w50.

La zona de contacto entre los segmentos del pistón y las camisas del cilindro es, probablemente, el entorno más hostil del motor. Tras la instalación de la admisión de mayor caudal y el remapeo de la ECU, se han generado las siguientes condiciones:

- Aumento de la carga de combustión: Al entrar más mezcla y generarse una explosión más potente, la presión que empuja los segmentos contra las paredes del cilindro es mayor. Un aceite de baja viscosidad (como el de serie) podría sufrir una ruptura de la película lubricante, provocando un contacto metal-metal prematuro.
- Dilatación térmica de los pistones: Al trabajar en regímenes más altos y con mezclas optimizadas para potencia, los pistones alcanzan temperaturas superiores. El uso del SAE 15w50 garantiza que, incluso bajo este calor extremo, el aceite mantenga un espesor de capa suficiente para refrigerar la falda del pistón y evitar el gripado.
- Prevención del "Blow-by" y sellado de compresión: Los segmentos dependen de la viscosidad del aceite para sellar microscópicamente la cámara de combustión. Con un aceite más denso en caliente, se mejora el sellado de la compresión, evitando que los gases quemados pasen al cárter y que el aceite suba a la cámara, algo vital cuando se busca el máximo rendimiento volumétrico.

Con el incremento del límite de revoluciones y la mayor alzada de los árboles de levas como se apreciará posteriormente, los componentes del tren alternativo se mueven a velocidades lineales muy superiores. Esto genera un fenómeno conocido como cizallamiento, donde las moléculas del aceite son literalmente "cortadas" por la presión y la velocidad.

El paso al aceite 15w50 responde a la necesidad de un índice HTHS (High Temperature High Shear) superior. Mientras que un aceite de serie se vuelve demasiado fluido (casi como agua) al superar los 100°C, el 15w50 mantiene una estructura molecular más robusta. Esto asegura que los casquillos de biela y bancada permanezcan siempre flotando en una cuña de aceite, eliminando el riesgo de fatiga de materiales ante las nuevas exigencias de par motor.

Esta decisión no es aislada. El uso de un aceite más viscoso genera una mayor resistencia interna, lo que teóricamente podría aumentar la temperatura del lubricante. Sin embargo, gracias a la instalación del enfriador de aceite externo y la supresión del termostato (que mantiene el bloque en un flujo constante), hemos conseguido el equilibrio perfecto: un aceite con "cuerpo" suficiente para proteger los pistones y segmentos, pero con un sistema de refrigeración capaz de evacuar el exceso de calor generado por esa misma viscosidad.

Parámetro técnico	SAE10w40	SAE 15w50	Impacto en el motor
Viscosidad cinemática a 100°C	14.0 mm ² /s	18.5 - 20.0 mm ² /s	Mayor espesor de película en caliente
Índice HTHS (Alta Temp. / Alto Cizallamiento)	3.5 mPa · s	> 4.5 mPa · s	Protección superior en casquillos a altas RPM
Punto de Inflamación	220°C	> 235°C	Menor evaporación y degradación térmica

Tabla 3-13. Comparación de lubricantes (fuente: autoría propia)

3.4.2 Sistema de distribución y culata

3.4.2.1 Árboles de levas

El motor NFU (TU5JP4) integra una arquitectura de distribución DOHC (Double Overhead Camshaft) diseñada para maximizar la eficiencia de carga en un rango amplio de revoluciones. A diferencia de las configuraciones monoárbol, este sistema emplea dos árboles de levas independientes fabricados en acero de alta resistencia, que actúan directamente sobre 16 válvulas mediante taqués hidráulicos. Esta disposición es crítica en la optimización del rendimiento, ya que permite una geometría de cámara de combustión en pent-roof (techo de pendiente doble), situando la bujía en el centro geométrico para minimizar la distancia del frente de llama.

La sustitución de los árboles de levas originales del NFU por los procedentes del motor NFX requirió un protocolo de montaje riguroso para garantizar la sincronización mecánica y la integridad de los componentes. El proceso comenzó con la búsqueda del Punto Muerto Superior (PMS) del cilindro número 1, procediendo al bloqueo del cigüeñal mediante un útil de calado específico insertado entre el bloque motor y el volante motor.

Dada la similitud geométrica entre ambos árboles de levas, se realizó un análisis técnico para evitar errores en la fase de admisión y escape. Mediante la consulta de los manuales de taller de PSA, se identificaron las marcas de fundición situadas en la zona central de los ejes. Se determinó que la identificación alfanumérica se sitúa en laterales opuestos según la función del árbol, permitiendo así su correcta ubicación en la culata.

Durante la fase de preparación, se realizaron las siguientes intervenciones críticas:

- Sustitución de retenes: Debido a la pérdida de elasticidad y la cristalización de los elastómeros originales, se instalaron retenes de aceite nuevos para garantizar la estanqueidad del sistema y evitar fugas hacia la correa de distribución.
- Compatibilidad de tornillería: Se detectó que la tornillería de unión entre los árboles de levas y las poleas difería entre los motores NFU y NFX. Se procedió a la medición de la métrica y el paso de rosca para asegurar un acoplamiento mecánico seguro y capaz de soportar el par de apriete especificado.

Una vez instalados y lubricados los árboles con sus respectivas tapas de apoyo, se realizó una prueba de giro manual para verificar la ausencia de interferencias mecánicas. Durante esta inspección, se observó una tolerancia extremadamente reducida en la zona intermedia de la culata.

Aunque no existía un contacto directo en frío, se decidió realizar un mecanizado preventivo mediante una herramienta rotativa de precisión (Rotalix). El objetivo de este rebaje fue asegurar un margen de seguridad suficiente ante la dilatación térmica de los materiales. En condiciones de funcionamiento a temperatura óptima (80°C - 100°C), los metales se expanden, y sin este margen, el riesgo de rozamiento y gripado de los árboles aumentaría exponencialmente. Tras el rectificado manual, se verificó nuevamente la cinemática del sistema, confirmando un giro libre de resistencias.

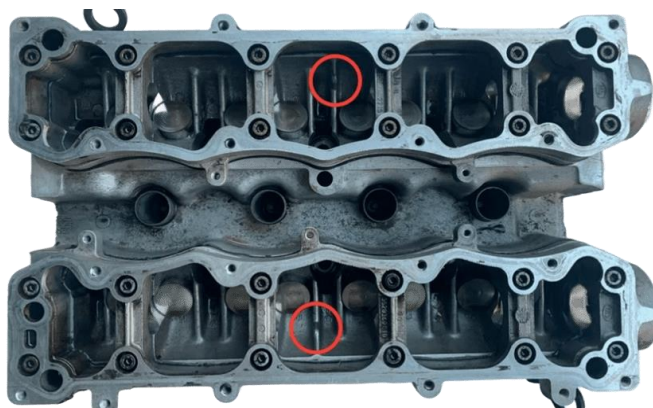


Figura 3-8. Zonas de mecanizado preventivo (fuente: autoría propia)

La configuración de serie del propulsor NFU se rige por una geometría de levas diseñada para priorizar la estabilidad de la marcha mínima (ralentí) y la eficiencia termodinámica⁴ en regímenes medios. Los árboles de levas originales presentan un diagrama de distribución con cotas de reglaje más conservadoras, caracterizadas por un ángulo de solape reducido y menores cotas de alzado de válvula. Los valores nominales correspondientes al Avance de la Apertura de Admisión (AAA), Retraso del Cierre de Admisión (RCA), Avance de la Apertura de Escape (AAE) y Retraso del Cierre de Escape (RCE), que definen el comportamiento de flujo del motor en su estado de fábrica, se detallan de forma pormenorizada en la Tabla 3-14 y se ilustran en el diagrama circular de la Figura 3-10.



Figura 3-9. Árboles de levas del motor NFU (fuente: autoría propia)

⁴ Eficiencia termodinámica: es la capacidad del motor para transformar la energía térmica (el calor generado por la explosión de la mezcla aire-combustible) en trabajo mecánico.

Ángulos	Motor: NFU
Avance Apertura Admisión (AAA)	7°
Retraso Cierre Admisión (RCA)	56°
Avance Apertura Escape (AAE)	53°
Retraso Cierre Escape (RCE)	4°
Cruce de válvulas (AAA+RCE)	7° + 4° = 11°

Tabla 3-14. Diagrama de distribución de los árboles del motor NFU (fuente: autoría propia)

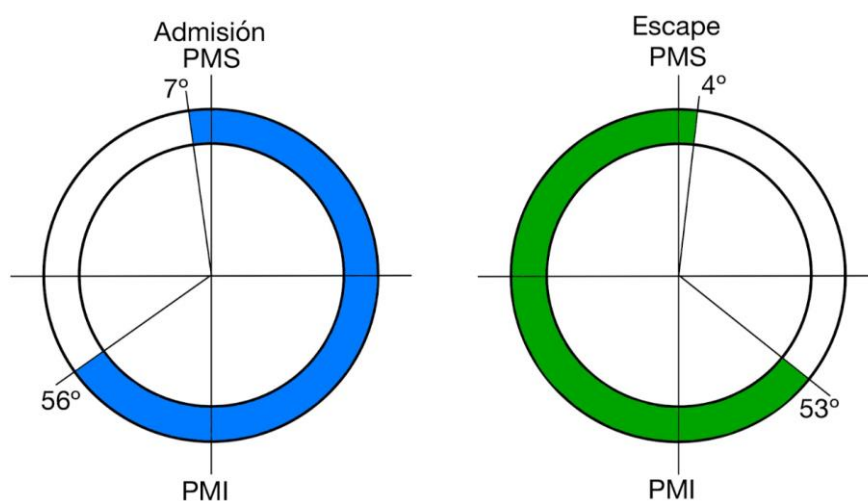


Figura 3-10. Diagrama circular de admisión y escape del motor NFU (fuente: autoría propia)

Complementariamente, la implementación de los árboles de levas de alto rendimiento (perfil NFX) conlleva una alteración sustancial del diagrama de distribución original. Esta modificación se traduce en una redefinición de las cotas de reglaje, incrementando específicamente el solape o cruce de válvulas (overlap) para favorecer el efecto de barrido de los gases quemados y mejorar el llenado cilíndrico por inercia en regímenes elevados. Los valores angulares relativos al Avance de la Apertura de Admisión (AAA), Retraso del Cierre de Admisión (RCA), Avance de la Apertura de Escape (AAE) y Retraso del Cierre de Escape (RCE), que determinan la nueva puesta en fase del ciclo termodinámico, se detallan analíticamente en la Tabla 3-15 y se representan gráficamente mediante el diagrama circular de la Figura 3-12.



Figura 3-11. Árboles de levas del motor NFX (fuente: autoría propia)

Ángulos	Motor: NFX
Avance Apertura Admisión (AAA)	14°
Retraso Cierre Admisión (RCA)	59°
Avance Apertura Escape (AAE)	60°
Retraso Cierre Escape (RCE)	14°
Cruce de válvulas (AAA+RCE)	14° + 14° = 28°

Tabla 3-15. Diagrama de distribución de los árboles del motor NFX (fuente: autoría propia)

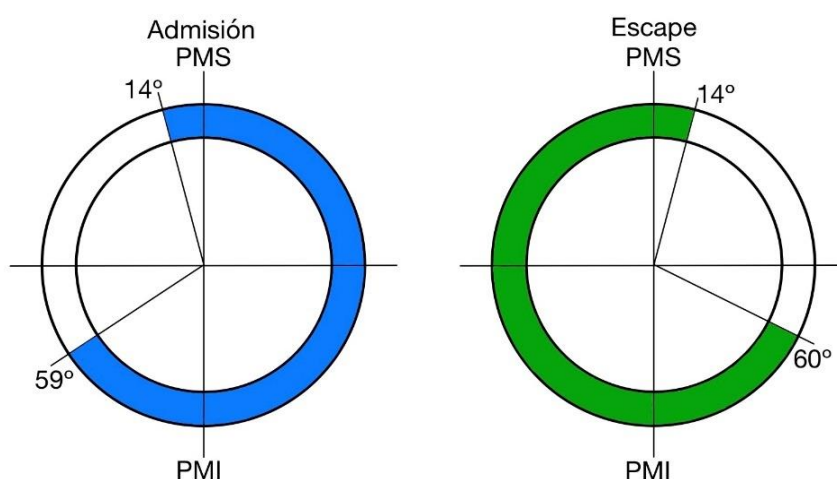


Figura 3-12. Diagrama circular de admisión y escape del motor NFX (fuente: autoría propia)

El motor NFU presenta un diagrama de distribución conservador, diseñado para un equilibrio entre par motor en bajas revoluciones y cumplimiento de normativas de emisiones. Los valores característicos son:

- AAA (7°) y RCE (4°): Generan un cruce de válvulas (solape) de apenas 11°. Este valor reducido limita las pérdidas de carga fresca por el escape a bajas RPM, asegurando un ralentí estable y una curva de par muy lineal, pero restringe la capacidad de barrido (scavenging) cuando aumenta la velocidad del flujo.
- RCA (56°): Un retraso al cierre de admisión moderado que busca aprovechar la inercia del gas sin penalizar excesivamente la relación de compresión efectiva al inicio de la carrera de compresión.

Al implementar los árboles de levas del motor NFX, el diagrama de distribución experimenta una transformación radical hacia la respiración de alta frecuencia:

- Incremento del solape (28°): Se observa un aumento del 154% en el cruce de válvulas (pasando de 11° a 28°). Este incremento es el principal responsable de la mejora en el rendimiento a altas RPM. Al abrir la admisión 14° antes del PMS y cerrar el escape 14° después del mismo, se establece una ventana temporal mucho mayor para que la depresión de las ondas de escape succione la mezcla fresca hacia el interior de la cámara, mejorando drásticamente el llenado volumétrico.
- Aperturas anticipadas y cierres prolongados: Con un RCA de 59° (3° adicionales respecto al NFU) y un AAE de 60° (7° adicionales), el motor permite una mayor evacuación de gases

quemados y aprovecha mejor la energía cinética del aire entrante en la zona alta del cuentavueltas.

Esta modificación en los ángulos de fase desplaza el punto de sintonía del motor. Mientras que el NFU original prioriza la eficiencia en cargas parciales, la nueva configuración busca convertir el bloque en un propulsor mucho más elástico y potente en la zona superior de la curva. Sin embargo, este aumento de 17° en el solape requiere una gestión electrónica precisa, ya que la velocidad de flujo a bajas RPM disminuirá, lo que podría reducir ligeramente el par en el rango inferior a cambio de una ganancia sustancial en la zona de potencia máxima.

3.4.2.2 Poleas de árboles de levas

El motor NFU, en su configuración de fábrica, emplea poleas de distribución de tipo fijo. Estos componentes están diseñados basándose en un chavetado rígido que vincula la posición del árbol de levas con el piñón de mando.

La sustitución de estas por poleas regulables (o poleas vernier), las cuales permiten un ajuste micrométrico e independiente, aporta las siguientes ventajas estratégicas para el proyecto:

- Ajuste del diagrama de fase real: Permite posicionar el árbol de levas con una precisión de fracciones de grado. Esto es esencial para asegurar el cruce de válvulas.
- Sintonía de la banda potencia: Es un proceso crítico, ya que el valor óptimo de los ángulos de avance y de retraso depende directamente de las condiciones de operación del motor, principalmente de su régimen de giro. Cuando se busca que un motor eleve su régimen de giro de forma sustancial, es imperativo variar el diagrama de distribución para evitar que la PME decaiga prematuramente debido a un llenado deficiente de los cilindros. En este sentido, un retraso en el cierre de la admisión (RCA) más pronunciado permite aprovechar la inercia de la columna de gases para introducir más mezcla a altas revoluciones, optimizando así la respiración del motor en la zona superior de la curva de potencia. Por otro lado, al elevar el cruce de válvulas (la suma del AAA y el RCE), se favorece el llenado de los cilindros a alto régimen mediante el aprovechamiento de la dinámica de fluidos, aunque esto suele conllevar una reducción del par y la estabilidad en regímenes bajos. Por ello, el calado avanzado o retrasado de los árboles de levas de admisión y escape permite desplazar la curva de par motor a lo largo del rango de revoluciones para adaptar el comportamiento del vehículo a los requerimientos específicos de la competición o el uso deportivo.



Figura 3-13. Poleas NFU y NFX (fuente: autoría propia)

Una vez instalados los árboles de levas del motor NFX, se procedió al montaje de las poleas regulables. Este proceso es fundamental para asegurar que el diagrama de distribución real coincida con el diseño teórico y para permitir ajustes finos en el comportamiento del propulsor.

Para la instalación de las poleas, se mantuvo bloqueada la corona dentada de la polea (la parte externa que engrana con la correa) mediante sus pernos de regulación situados en las correderas centrales. Tras fijar el núcleo de las poleas a los extremos de los árboles de levas aplicando el par de apriete nominal especificado por el fabricante, se inició el proceso de calado.

La correa de distribución empleada presenta tres marcas de referencia longitudinales. El procedimiento de sincronización consistió en hacer coincidir estas marcas de forma unívoca:

- Marca de cigüeñal: Sincronización con el piñón conductor en el extremo del cigüeñal (bloqueado previamente en el PMS).
- Marcas de árboles de levas: Alineación con las marcas de referencia grabadas en la periferia de las poleas de admisión y escape respectivamente.

El uso de las poleas regulables aportó una ventaja operativa durante el tensado de la correa. Al mantener los tornillos de las correderas ligeramente flojos, la corona dentada puede pivotar libremente sobre el núcleo. Esto permite que la tensión aplicada por el rodillo tensor se distribuya de forma uniforme en todos los tramos de la correa, evitando asimetrías en los esfuerzos sobre los apoyos de los árboles de levas. Además, Este sistema permite una mejor precisión del calado en comparación con las poleas fijas originales, ya que posibilita ajustes micrométricos para compensar las tolerancias de fabricación o el estiramiento de la correa.

Una vez verificada la tensión correcta mediante el rodillo tensor, se procedió al apriete final de los pernos de regulación de las poleas. Como medida de seguridad y control de calidad propia de la ingeniería de competición, se realizó un marcado visual (testigo de apriete) en todos los componentes y tornillería de la distribución. Este procedimiento permite realizar inspecciones oculares rápidas en revisiones posteriores para detectar cualquier signo de desprendimiento, vibración o aflojamiento por fatiga térmica, garantizando así la fiabilidad del sistema a largo plazo.

Finalmente, es imperativo realizar giros manuales del motor (típicamente entre 2 y 10 vueltas) para confirmar que el calado sigue siendo posible y que no existe interferencia física entre válvulas y pistones antes del arranque definitivo.



Figura 3-14. Distribución montada y marcada (fuente: autoría propia)

3.4.3 Sistemas de admisión

Uno de los hitos más complejos de este proyecto ha sido el cambio del sistema de admisión. Originalmente, el motor NFU equipa un cuerpo de mariposa de gestión electrónica (drive-by-wire), cuya programación y diámetro limitan la respuesta inmediata del motor. Para mitigar esta restricción, se ha optado por la adaptación del sistema de admisión procedente del motor NFX, que emplea un control de la mariposa de admisión mediante cable mecánico.

La principal ventaja de esta conversión radica en la sección de paso: el cuerpo de mariposa del NFX cuenta con un diámetro de 60 mm frente a los 52mm de los que dispone de origen el cuerpo de admisión del NFU, lo que reduce drásticamente las pérdidas de carga en la admisión y permite un flujo de aire mucho menos restrictivo hacia los cilindros.



Figura 3-15. Cuerpo de admisión y mariposa de NFX (fuente: autoría propia)

Sin embargo, la instalación de este colector sobre la culata del NFU no es una operación directa de "quitar y poner". Fue necesario realizar un nuevo esquema de fijación mediante el mecanizado de nuevos orificios de anclaje en la culata (Figura 3-16), manteniendo y reutilizando parte de la tornillería existente para asegurar la estanqueidad del conjunto. Durante el proceso de taladrado y roscado de estos nuevos alojamientos, se produjo una incidencia crítica: la rotura de un macho de roscar en el interior de la culata. La extracción del resto de la herramienta requirió el uso de útiles específicos de precisión y técnicas de desescombro metálico para evitar daños irreparables en la superficie de la culata o en las cámaras de combustión.



Figura 3-16. Adaptación del cuerpo de admisión (fuente: autoría propia)

Una vez finalizado el montaje físico, durante las primeras pruebas de arranque, el motor presentó un régimen de ralentí excesivamente elevado y errático. Tras un diagnóstico mediante la búsqueda de tomas de aire parásitas, se identificaron varios vacíos de admisión en el cuerpo del NFX que no eran compatibles con la gestión electrónica de nuestro bloque. La entrada de aire no medido provocaba una mezcla pobre y una aceleración descontrolada. La solución consistió en el sellado hermético de estos conductos innecesarios, garantizando que todo el aire aspirado pasara exclusivamente por el cuerpo de la mariposa.

La estabilidad del motor en baja carga presentó desafíos adicionales:

- Válvula de ralentí (IACV): La unidad instalada originalmente presentaba un fallo interno que impedía la regulación del flujo de aire. Tras su sustitución por una unidad nueva, se procedió al ajuste fino manual mediante el tornillo de regulación de bypass situado en el cuerpo de mariposa, logrando estabilizar el régimen de ralentí nominal.



Figura 3-17. Válvula de ralentí defectuosa (fuente: autoría propia)

- Sensor MAP (Manifold Absolute Pressure): Se detectaron anomalías en la lectura de carga motor, lo que derivaba en errores de cálculo de la mezcla aire-combustible por parte de la ECU. Tras verificar que el sensor estaba defectuoso, se procedió a su sustitución, permitiendo una lectura precisa del vacío en el colector y, por ende, una correcta dosificación del combustible.

En definitiva, el sistema de admisión representó el mayor desafío de adaptación del proyecto. La transición de un sistema electrónico a uno mecánico no solo exigió habilidades de mecanizado y ajuste manual, sino una profunda comprensión de la gestión de sensores y actuadores para integrar componentes de diferentes generaciones en un mismo ecosistema propulsor.

Para complementar el incremento de sección de la mariposa de 60 mm, se ha rediseñado por completo el tramo de aspiración, eliminando la caja de filtro restrictiva de origen. El nuevo sistema se basa en una campana de admisión dinámica tipo "Brozi", cuya geometría ha sido diseñada en fibra de vidrio para optimizar la captación de flujo desde la zona frontal del vehículo (Figura 3-18).

La ventaja técnica fundamental de esta campana es su ubicación estratégica en la parte delantera del vano motor, conectando directamente con la apertura frontal del capó. Este diseño permite la captura de aire exterior (aire fresco), cuya densidad es significativamente mayor que la del aire caliente confinado en el vano motor. Según las leyes de la termodinámica, una reducción en la temperatura del aire de admisión permite introducir una mayor masa de oxígeno en el mismo volumen de cilindrada, lo que se traduce directamente en un incremento de la eficiencia de la combustión y, por ende, de la potencia efectiva.

Dentro de la campana se ha integrado un elemento filtrante de alto rendimiento de la marca Green Filters (Figura 3-18). A diferencia de los filtros de papel convencionales, este componente utiliza un tejido de algodón multicapa impregnado en aceites específicos que permite reducir las pérdidas por fricción del fluido. Esta modificación garantiza un incremento en el flujo de aire de aproximadamente un 10-15%, manteniendo una capacidad de filtrado óptima para proteger la integridad de los cilindros frente a partículas sólidas.



Figura 3-18. Campana de admisión tipo Brozi y filtro de aire Green (fuente: autoría propia)

La conexión entre la campana de admisión y el cuerpo de mariposa se ha realizado mediante manguitos de silicona reforzada. La elección de este material sobre el termoplástico estándar de serie responde a dos criterios de ingeniería:

- Aislamiento térmico: La silicona posee una menor conductividad térmica, actuando como una barrera que minimiza la transferencia de calor desde el vano motor hacia la columna de aire interna, manteniendo la carga lo más fría posible hasta su entrada en el colector.
- Sellado hermético: Gracias a su flexibilidad y capacidad de ajuste bajo presión con abrazaderas de alta resistencia, se garantiza una unión totalmente estanca. Esto es crítico para evitar las tomas de aire parásitas mencionadas anteriormente, las cuales desvirtuarían las lecturas del sensor MAP y empobrecerían la mezcla estequiométrica.

3.4.4 Sistemas de escape

Una vez optimizado el llenado volumétrico del cilindro, es imperativo mejorar la fase de escape para garantizar una evacuación rápida y completa de los gases residuales. En el motor NFU de serie, el sistema de escape está diseñado bajo criterios de economía de fabricación y reducción de emisiones, utilizando un colector de fundición con configuración 4-1.

La adopción de unos colectores con arquitectura 4-2-1 aporta una ventaja técnica superior frente al diseño 4-1 original (Sección 2.5.4.1). En un sistema 4-1, los cuatro conductos convergen en un único punto, lo que puede generar interferencias entre los pulsos de escape de diferentes cilindros a bajas y medias revoluciones.

La configuración 4-2-1 une primero los cilindros por parejas, permitiendo que el pulso de alta presión de un cilindro cree una zona de baja presión que ayuda a "succionar" los gases del siguiente cilindro. Este fenómeno, conocido como interferencia constructiva, mejora sustancialmente el par motor en el rango medio del cuentavueeltas, proporcionando una curva de potencia mucho más elástica.



Figura 3-19. Colectores de escape 4-2-1 (fuente: autoría propia)

Se ha implementado una línea de escape fabricada íntegramente en acero inoxidable, material que ofrece una superficie interna más lisa (menor rugosidad) y una mejor gestión de la temperatura de los gases. Se ha aumentado el diámetro nominal de la línea de los 50mm de serie a 55mm.

Ventaja termodinámica: El incremento del área de la sección transversal reduce la contrapresión (backpressure) en el sistema. Una menor contrapresión significa que el pistón encuentra menos resistencia durante su carrera de escape, reduciendo las pérdidas por bombeo y permitiendo que el motor gire con mayor libertad en la zona alta de revoluciones.

Velocidad de gases: El diámetro de 55 mm se ha seleccionado como el equilibrio óptimo para el motor 1.6, lo suficientemente grande para no restringir el flujo entre las 6.000 y 7.500 RPM, pero lo suficientemente contenido para mantener una velocidad de gas adecuada que favorezca la inercia del flujo.

La línea se ha diseñado con una configuración "de-cat" (sin catalizador) y con un trazado prácticamente recto. Al eliminar el sustrato cerámico del catalizador, que actúa como una gran restricción al paso de los gases, se eliminan las turbulencias y el "tapón" térmico que este genera. Para cumplir con unos niveles mínimos de confort acústico y normativas de ruido, la línea finaliza en un único silencioso de absorción de alto flujo.

Como parte de la reconfiguración integral del sistema de evacuación y la gestión electrónica, se ha procedido a la anulación de la sonda lambda. En los motores de serie, este sensor tiene la función de medir la concentración de oxígeno residual en los gases de escape para que la ECU pueda ajustar la mezcla aire-combustible en torno al punto estequiométrico ($\lambda = 1$). Si bien esto es ideal para reducir emisiones y consumos en condiciones de cruce, supone una limitación importante en un motor de alto rendimiento.

Al haber suprimido el catalizador, una sonda lambda activa detectaría valores fuera de rango, provocando que la ECU entrara en "modo de emergencia" o limp mode, reduciendo drásticamente las prestaciones. Su eliminación física y electrónica evita errores de diagnóstico y permite que el flujo de gases sea totalmente libre de obstrucciones sensoriales en el colector.



Figura 3-20. Línea de escape acero inoxidable (fuente: autoría propia)

3.4.5 Masas rotativas y alternativas

3.4.5.1 Volante motor

Volante motor: Se ha sustituido el componente de fundición de serie (5,78 kg) por una unidad aligerada de alto rendimiento de 2,97 kg. Esta reducción del 48,6% en la masa rotativa permite una subida de revoluciones mucho más agresiva. La instalación fue de tipo plug and play⁵, aunque requirió un procedimiento técnico riguroso: bloqueo del cigüeñal, aplicación de sellador de roscas y un apriete controlado mediante llave dinamométrica según el par específico del fabricante para evitar fallos por fatiga en la tornillería.

⁵ Plug and play: Describe a aquellos componentes de alto rendimiento diseñados con las mismas cotas de anclaje, tolerancias y conexiones que la pieza original del fabricante. Su principal ventaja es que permiten una instalación directa y funcional sin requerir mecanizados, adaptaciones estructurales o modificaciones.



Figura 3-21. Volante de inercia aligerado (fuente: autoría propia)

3.4.5.2 Polea del cigüeñal

Polea de cigüeñal: Se ha reemplazado la polea de accesorios original (148 mm y 1,23 kg) por una polea mecanizada en CNC de duraluminio, con un diámetro reducido a 100 mm y un peso de apenas 160 gramos (Figura 3-22).

El diseño de esta nueva polea se basa en soluciones aplicadas históricamente por los ingenieros de PSA Motorsport en motores de alta evolución (unidades de hasta 225 CV). La estrategia consiste en una modificación calculada de la relación de transmisión entre el cigüeñal y los periféricos:

- Gestión de la carga eléctrica: Al reducir el diámetro de la polea del cigüeñal a 100 mm, se altera la velocidad periférica de la correa. Esto permite que, con las mismas revoluciones del motor, el alternador trabaje en un rango de giro optimizado, garantizando un flujo de corriente constante y estable. Esta sobrealimentación eléctrica es indispensable en vehículos de competición para asegurar el correcto funcionamiento de la gestión electrónica, bombas de combustible de alto caudal y sistemas de encendido de alta intensidad, evitando fallos de arranque o caídas de tensión en regímenes críticos.
- Dimensionamiento geométrico: Aunque en los diseños históricos de competición no se documentó un diámetro estandarizado, para este proyecto se determinó la cota de 100 mm tras un análisis del buje de ataque del cigüeñal. Esta medida permite la máxima reducción de diámetro posible manteniendo un margen de seguridad estructural respecto al anclaje central de la polea.

Para la fabricación se seleccionó duraluminio, una aleación de aluminio de alta resistencia que incorpora cobre, manganeso y magnesio. El duraluminio es un material de referencia en la industria aeroespacial y de competición debido a que combina una ligereza extrema con una capacidad de soportar esfuerzos de fatiga y vibraciones armónicas muy superiores a las aleaciones de aluminio convencionales.

La instalación mecánica se simplificó gracias a que el mecanizado CNC respetó la geometría de centrado y el patrón de pernos original. Sin embargo, la reducción del diámetro de la polea conductora obligó a recalcular la longitud de la correa de accesorios (correa Poly-V). Para ello, se aplicaron los conocimientos de la asignatura de Diseño de Máquinas, empleando la formulación para transmisiones por correa abierta:

$$L \approx 2C + \frac{\pi}{2}(D + d) + \frac{(D - d)^2}{4C}$$

Donde L es la longitud de la correa, C la distancia entre centros, y D/d los diámetros de las poleas involucradas.

Este cálculo teórico permitió determinar la longitud nominal de la nueva correa. La pequeña desviación o error humano derivado de la medición manual de la distancia entre centros fue compensada mediante el tensor excéntrico del alternador. Este mecanismo de ajuste móvil permitió aplicar la tensión de montaje adecuada, asegurando que la correa trabaje dentro de su zona de deformación elástica sin riesgo de deslizamiento ni sobrecarga en los apoyos.



Figura 3-22. Polea de accesorios original y modificada (fuente: autoría propia)

3.4.5.3 Conjunto rueda

Aunque el enfoque principal de este proyecto es la potenciación del motor NFU, la gestión de la potencia final requiere una optimización de las masas que el motor debe acelerar. En este sentido, se ha procedido a la sustitución del conjunto de llantas original por una configuración de alto rendimiento.

Reducción de inercia rotacional: Se han sustituido las llantas de aleación de serie de 14" (con un peso aproximado de 12 kg/ud) por unas llantas Speedline de 15" con un peso de tan solo 7,2 kg. A pesar del incremento en el diámetro nominal, el ahorro neto de 4,8 kg por unidad (casi 20 kg en el total del conjunto rotativo) supone una reducción drástica del momento de inercia.

Dinámica de aceleración: Según la segunda ley de Newton para la rotación ($\tau = I \cdot \alpha$), una disminución en el momento de inercia (I) permite una mayor aceleración angular (α) para un mismo par motor (τ). Esto se traduce en que el motor alcanza regímenes de carga de forma más prestacional, ya que debe "desperdiciar" menos energía en vencer la inercia de las propias ruedas.



Figura 3-23. Llantas Speedline 15" (fuente: autoría propia)

3.4.5.4 Sistema de frenada

Dada la mayor capacidad de aceleración del vehículo, el sistema de frenado original resultaba insuficiente por fatiga térmica y falta de potencia de mordida.

En el eje delantero se ha realizado una conversión de alto rendimiento utilizando componentes de origen OEM del grupo PSA (Peugeot 406 Coupé V6):

- Discos: Se ha pasado de un diámetro de 247 mm (espesor 20 mm) a unos discos de 283 mm (espesor 22 mm). El mayor brazo de palanca y la mayor masa térmica permiten frenadas más cortas y una mejor disipación del calor.
- Pinzas: Se han instalado pinzas monobloque Brembo de 4 pistones, sustituyendo a las flotantes de un solo pistón. Esto garantiza una distribución de presión uniforme sobre la pastilla y un tacto de pedal mucho más firme y dosificable.



Figura 3-24. Pinza de freno Brembo 4 pistones (fuente: autoría propia)

- Compuesto de fricción: En ambos ejes se han montado pastillas Ferodo DS3000. Este compuesto de competición ofrece un coeficiente de fricción (μ) superior a 0,5, manteniendo su efectividad incluso a temperaturas elevadas donde las pastillas convencionales sufrirían fading.

Para alimentar las nuevas pinzas de 4 pistones, se ha optimizado la hidráulica del sistema:

- Bomba de freno: Se ha sustituido la bomba original de 19 mm por una de 23,8 mm (procedente también del 406 Coupé). Este incremento en el diámetro del émbolo es necesario para desplazar el mayor volumen de líquido requerido por los pistones de las pinzas Brembo, manteniendo un recorrido de pedal corto.



Figura 3-25. Bomba de freno de Peugeot 406 Coupé (fuente: autoría propia)

- Latiguillos metálicos: Los conductos de goma originales han sido reemplazados por latiguillos de acero trenzado. Al ser inextensibles, eliminan el efecto "esponjoso" del pedal bajo altas presiones, garantizando que toda la fuerza ejercida se transmita a las pinzas.
- Fluido de frenos: Para garantizar la integridad del sistema de frenado ante el incremento de las sollicitaciones térmicas, se ha empleado un fluido de altas prestaciones Motul RBF 700 certificado bajo la norma SAE J1703. Esto asegura un punto de ebullición elevado y una baja compresibilidad, evitando la formación de burbujas de vapor (vapor lock). El proceso de purgado se realizó en dos fases: una inicial tras el montaje y una segunda tras el rodaje de los componentes, asegurando la evacuación total de aire residual y un tacto de pedal óptimo.

3.4.6 Sistemas de transmisión

3.4.6.1 Embrague cerámico

La instalación del nuevo conjunto de embrague cerámico sobre el volante motor aligerado requirió una ejecución técnica precisa para garantizar la correcta alineación del tren de potencia. Dado que el disco de embrague debe estar perfectamente alineado con el rodamiento de apoyo del cigüeñal para permitir la entrada del eje primario de la caja de cambios, se recurrió al uso de un centrador de embragues.

Optimización del ajuste: Esta herramienta de precisión permitió fijar la posición del disco cerámico de 4 palas de forma concéntrica respecto al volante motor antes de proceder al montaje de la maza reforzada. El uso del centrador fue determinante para asegurar que el conjunto encajara de manera idónea, evitando deformaciones en el estriado del disco.

Protocolo de apriete: Aprovechando que el cigüeñal se encontraba inmovilizado mediante un útil de bloqueo para la instalación del volante motor, se procedió al apriete de la maza de embrague. Esta operación se realizó siguiendo un patrón en cruz y aplicando el par de apriete nominal de forma progresiva. Este procedimiento es crítico para garantizar que la maza ejerza una presión uniforme sobre el disco, evitando vibraciones parásitas o un desgaste prematuro de los forros cerámicos debido a una falta de planeidad en el montaje.

Ventajas técnicas: A diferencia de los discos orgánicos de serie, el compuesto cerámico mantiene un coeficiente de fricción estable bajo condiciones extremas de temperatura, eliminando el riesgo de patinamiento durante cambios de marcha rápidos o salidas desde parado. El diseño de 4 palas permite una mejor disipación térmica y un "mordiente" mucho más directo, proporcionando al conductor un tacto de pedal más comunicativo y preciso.

3.4.6.2 Caja de cambios

Para complementar la ganancia de potencia del motor NFU y aprovechar la reducción de inercias, se ha intervenido sobre la transmisión primaria. El vehículo equipa originalmente una caja de cambios de la familia MA5 (referencia 20CN26), cuya configuración de relaciones está orientada a un uso polivalente, penalizando la aceleración en favor de una velocidad de cruce con menor consumo.

Caja de cambios	N.º dientes
1ª velocidad	12/41
2ª velocidad	21/38
3ª velocidad	32/41
4ª velocidad	40/39
5ª velocidad	43/33
Marcha atrás	12/43
Grupo final	14/60

Tabla 3-16. Relación de engranajes de serie (fuente: autoría propia)

Con el objetivo de maximizar la aceleración y mantener el motor en su rango de potencia máxima tras cada cambio de marcha, se ha procedido a un re-gearing (cambio de relaciones). Se ha seleccionado la piñonera procedente de la referencia 20CD78, la cual presenta un escalonamiento de velocidades notablemente más corto. Y el grupo final se ha seleccionado de la referencia 20CD93, el cual presenta un grupo más corto frente a otras referencias.

Caja de cambios	N.º dientes
1ª velocidad	12/41
2ª velocidad	20/39
3ª velocidad	30/41
4ª velocidad	37/39
5ª velocidad	41/35
Marcha atrás	12/43
Grupo final	13/64

Tabla 3-17. Relación de engranajes modificada (fuente: autoría propia)

El proceso de adaptación se realizó siguiendo un protocolo de mantenimiento preventivo y precisión mecánica:

- Apertura y diagnóstico: Se procedió al desmontaje de las carcasas de la caja original para realizar una inspección de desgaste, sustituyendo aquellos elementos que presentaban fatiga superficial.
- Sincronización del selector: La introducción de la nueva relación de velocidades de la 20CD78 requirió un ajuste minucioso de las horquillas del selector. Cada horquilla debe posicionarse con exactitud en su respectivo desplazable para garantizar que el engranaje de las marchas sea fluido y evitar saltos de marcha bajo carga.
- Pruebas estáticas: En esta fase se realizaron pruebas de giro manual de todas las relaciones para verificar la ausencia de interferencias y asegurar que la lubricación inicial era efectiva.
- Sellado y lubricación: Tras confirmar el correcto funcionamiento cinemático, se procedió al cierre estanco de la transmisión. El cárter de la caja se rellenó con valvulina de alta calidad, cuya viscosidad y aditivos están formulados para proteger los flancos de los dientes de los engranajes ante el incremento de par motor y las mayores exigencias térmicas de la nueva preparación.

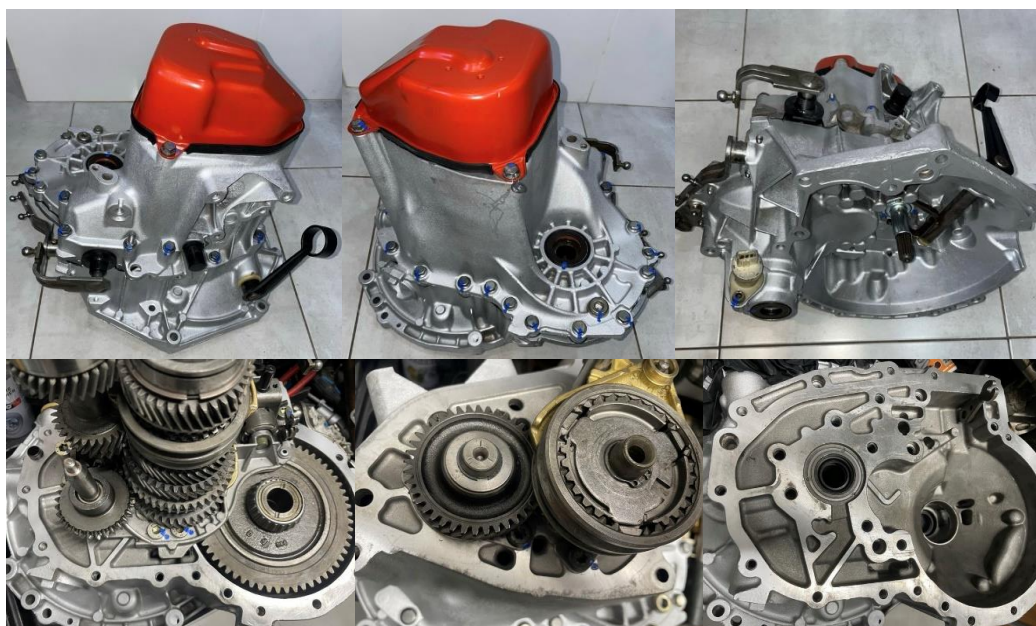


Figura 3-26. Ensamble caja de cambios MA5 (fuente: autoría propia)

3.4.6.3 *Palieres reforzados y elementos adyacentes*

Los palieres originales del NFU, dimensionados para un uso urbano y equipados con juntas de 3 bolas (trípodes), representaban un punto crítico de posible rotura por fatiga de materiales. En su lugar, se han instalado palieres fabricados a medida con las siguientes especificaciones:

- Robustez y arquitectura: El eje transversal presenta un mayor diámetro y ha sido sometido a un tratamiento térmico de endurecimiento. Las puntas homocinéticas se han evolucionado hacia un diseño de 6 bolas reforzadas, lo que permite una distribución de esfuerzos mucho más uniforme y una mayor tolerancia a los ángulos de trabajo pronunciados.
- Geometría de trabajo: Estos nuevos palieres presentan una longitud ligeramente superior a los de serie. Esta modificación geométrica busca que el esfuerzo de torsión se distribuya a lo largo de la barra transversal y no recaiga de forma axial directamente sobre la junta homocinética. Al desplazar el centro de carga, se minimiza el riesgo de cizalladura en los elementos internos de la punta del palier durante las fases de máxima aceleración o apoyo en curva.

Para integrar correctamente los nuevos palieres reforzados, se ha procedido a la actualización del conjunto de bujes y rodadura:

- Asiento cónico: Se han sustituido los bujes de rueda para garantizar un asiento cónico perfecto con el estriado y la punta del nuevo eje de transmisión. Esto asegura una unión solidaria sin holguras, eliminando vibraciones parásitas y ruidos por desalineación.
- Reducción de fricción parásita: Junto con los bujes, se han instalado rodamientos de alta precisión nuevos. Esto no solo garantiza la integridad del conjunto bajo las nuevas cargas laterales (debidas a la mejora de la frenada y los neumáticos), sino que permite un giro más libre y con menor resistencia, optimizando las pérdidas mecánicas por rozamiento en el tren delantero.



Figura 3-27. Palieres reforzados y bujes cónicos (fuente: autoría propia)

3.4.7 *Gestión electrónica de motor*

Para coordinar las modificaciones físicas realizadas en el motor NFU, ha sido indispensable intervenir sobre la gestión electrónica. Se ha optado por el uso de una centralita de un solo conector (1 pin/conector grande), la cual ha sido sometida a una reprogramación integral de sus mapas internos para ajustarse a las nuevas exigencias termodinámicas y volumétricas del propulsor. Este proceso de optimización electrónica fue delegado a Julián Maregil, especialista de la empresa Eco Power Maregil, quien llevó a cabo una reprogramación personalizada de los mapas internos atendiendo a los siguientes parámetros:

- Extensión del límite de giro: Debido al nuevo diagrama de distribución y a la reducción de masas rotativas, se ha incrementado el punto de corte de inyección (rev-limit), permitiendo que el motor aproveche la ganancia de potencia en el rango de altas RPM.
- Compensación de carga y flujo: Se han reescrito los mapas de inyección para compensar el aumento masivo de caudal de aire proveniente de la mariposa de 60 mm y la campana de admisión, asegurando una mezcla estequiométrica óptima en cargas parciales y una mezcla rica en plena carga para maximizar el par motor.
- Anulación de estrategias de serie: Se ha procedido a la eliminación por software de la gestión de la mariposa electrónica (Sección 3.4.3), adaptando la lógica de la ECU para trabajar exclusivamente con la señal del potenciómetro de la nueva mariposa por cable.



Figura 3-28. Centralita de 1 pin (fuente: autoría propia)

Uno de los trabajos más minuciosos fue la creación de una instalación eléctrica del motor simplificada. Este proceso no solo busca una estética limpia en el vano motor, sino eliminar puntos de posible fallo en el motor.

Diseño y dimensionamiento: El desarrollo del nuevo mazo de cables exigió un estudio previo de longitudes y rutas críticas para evitar interferencias electromagnéticas o daños por proximidad a fuentes de calor (escape). Cada cable fue medido y ruteado de forma específica para optimizar el espacio.

Adaptación de conectores y sensores: Se ha modificado el conector de la bobina para adaptar una procedente de otro propulsor, concretamente del motor NFX, buscando una mayor energía de chispa.

Eliminación de periféricos no críticos: Se han retirado de la instalación los conectores de la sonda lambda (Sección 3.4.4) y el del sensor de picado. En una preparación de alto rendimiento el sensor de picado (Knock Sensor) original puede interpretar las vibraciones mecánicas como una detonación real. Para evitar que la ECU retrase el avance de encendido de forma errática y perjudique el rendimiento, se ha decidido anular físicamente este sensor.



Figura 3-29. Instalación eléctrica simplificada (fuente: autoría propia)

Para garantizar la estabilidad del ciclo bajo las nuevas condiciones de alta carga y régimen de giro, se han instalado bujías de Iridium de la marca NGK. Estas bujías presentan un grado térmico más frío que las de serie, lo cual es fundamental en un motor potenciado para facilitar la transferencia de calor desde la cámara de combustión hacia la culata, previniendo así la autodetonaición o pre-ignición.

El uso de electrodos de iridio permite un diámetro de punta extremadamente fino, lo que reduce el voltaje requerido para el salto de la chispa y genera un arco eléctrico más potente y estable. Esta mejora en la energía de encendido asegura una mayor velocidad de propagación del frente de llama, optimizando la combustión de la mezcla incluso a altas revoluciones y bajo la mayor presión de llenado conseguida con la nueva admisión. El resultado es una respuesta al acelerador más nítida y una eficiencia térmica superior en todo el rango operativo.

Reconfiguración del módulo de encendido (Conversión a NFX): Como parte de la estrategia de simplificación del vano motor y optimización eléctrica, se ha optado por la instalación de la bobina de encendido procedente del motor NFX. Esta decisión metodológica responde a la migración hacia una arquitectura de cableado simplificada de un solo pin de señal. Dado que el conector de la bobina original del NFU presenta una interfaz física y un esquema de pines incompatible con esta nueva configuración, la adopción de la unidad NFX garantiza la continuidad eléctrica y la compatibilidad mecánica plug-and-play sobre la culata, manteniendo la estética de bloque compacto sin cables de alta tensión.



Figura 3-30. Bujías Iridium BKR5EIX y bobina de encendido NFX (fuente: autoría propia)

3.4.8 Sistema de refrigeración de alta eficiencia

Para garantizar la fiabilidad del propulsor bajo condiciones de máxima exigencia, se ha cambiado íntegramente el sistema de refrigeración, priorizando la capacidad de intercambio térmico y la simplificación de los circuitos de fluido.

Se ha sustituido el radiador original de plástico por una unidad de aluminio de doble núcleo con un espesor de 52mm. El aluminio, gracias a su superior coeficiente de transferencia térmica frente al latón o plástico, permite una evacuación de calor mucho más eficiente.

Adaptación mecánica: La instalación requirió el mecanizado de un nuevo orificio de anclaje en la viga transversal del chasis. Para mitigar la fatiga por vibración y evitar fugas por fisuras, se instalaron silentblocks de goma que desacoplan el radiador del chasis. Asimismo, se fabricaron soportes a medida para asegurar la fijación estructural del conjunto.

Simplificación y conducción de fluidos: Se eliminaron las líneas de calefacción para reducir el volumen muerto del sistema y los puntos críticos de rotura. Los conductos originales fueron reemplazados por manguitos de silicona reforzada, que presentan una mayor estabilidad dimensional ante la presión y una mejor resistencia al envejecimiento térmico. Como fluido, se empleó refrigerante de base orgánica al 50%, optimizado para elevar el punto de ebullición y ofrecer una mejor protección contra la cavitación y corrosión galvánica.

Gestión de flujo forzado y control térmico: Para asegurar la estabilidad térmica bajo cualquier condición de carga, se implementó un sistema de ventilación forzada compuesto por dos electroventiladores de alto rendimiento SPAL. Este conjunto es capaz de inducir un flujo de aire fresco

de aproximadamente $1.000 \text{ m}^3/\text{h}$ a través del núcleo del radiador, garantizando la disipación incluso en condiciones de flujo dinámico nulo (vehículo detenido). El sistema está gestionado de forma automatizada mediante un termocontacto que activa ambos ventiladores al alcanzar una temperatura umbral de 90°C , manteniendo el motor NFU siempre dentro de su rango de operación óptimo.



Figura 3-31. Radiador de aluminio junto con electroventiladores (fuente: autoría propia)

La instalación de un intercambiador de calor (enfriador de aceite) externo requirió una modificación específica en el bloque motor para anular el soporte del filtro original.

Solución de estanqueidad mediante ajuste interferente: Para sellar el orificio de retorno que comunicaba el bloque con el exterior, se diseñó y fabricó un casquillo cónico de precisión. El casquillo presenta un diámetro progresivo de 8 mm a 8,15 mm en una longitud de 15mm. Inspirado en el montaje de rodamientos por interferencia, se introdujo a presión junto con sellador anaeróbico, garantizando una estanqueidad total bajo presión de aceite.

Montaje del intercambiador: Para la fijación del nuevo sándwich o enfriador y el posterior filtro, se instaló un espárrago roscado integral en el bloque. La estanqueidad del sistema se logra mediante la presión axial que ejerce el filtro de aceite sobre el enfriador, asegurando un circuito cerrado y seguro hacia el radiador de aceite externo.

4 RESULTADOS / VALIDACIÓN / PRUEBA

Tras completar la fase de metrología, mecanizado y ensamblaje de la planta motriz, se procedió a la validación empírica del proyecto. Esta etapa representa el punto crítico del trabajo, donde las hipótesis teóricas sobre la dinámica de fluidos y la termodinámica aplicada se contrastan con datos medibles y reproducibles.

La validación se ha estructurado en seis apartados fundamentales:

- Análisis del motor: Validación de la ganancia neta de par y potencia mediante ensayos en banco, analizando la nueva curva de entrega tras la optimización termodinámica.
- Análisis de las relaciones de transmisión: Estudio de cómo el escalonamiento de la caja de cambios interactúa con la nueva banda de potencia, asegurando que el motor trabaje siempre en su zona óptima incluyendo también, el estudio de las nuevas velocidades teóricas.
- Análisis del sistema de refrigeración: Verificación de la capacidad de evacuación de calor del sistema ante el incremento de la presión media efectiva y el régimen de giro.
- Análisis de masas rotativas: Evaluación del impacto del aligeramiento del tren alternativo en la capacidad de aceleración y en la reducción de las pérdidas por inercia.
- Soluciones de fabricación: Auditoría de la viabilidad técnica y económica de las piezas adaptadas, confirmando que la manufactura artesanal y el mercado aftermarket son alternativas reales a la producción en serie.
- Fiabilidad mecánica: Comprobación de la integridad de los componentes tras someterlos a cargas de trabajo superiores a las de diseño original.

Es importante acotar que, si bien el presente proyecto realiza un estudio exhaustivo de la planta motriz y sus sistemas auxiliares, existen ciertos componentes periféricos cuya evaluación no se ha basado en instrumentación de laboratorio, sino en una validación funcional por uso. Debido a las limitaciones de recursos y tiempo propias de un proyecto de esta naturaleza, no ha sido viable someter a ensayos de fatiga destructiva o análisis de tensiones mediante galgas extensométricas a elementos de la cadena cinemática y el chasis. En este grupo se incluyen componentes críticos como el embrague cerámico, los palieres reforzados y el sistema de frenado sobredimensionado. Aunque su rendimiento se considera validado tras las pruebas dinámicas y no han mostrado signos de desfallecimiento ni degradación prematura, su análisis en este trabajo se limita a la correcta integración física y operativa con el nuevo mapa de potencia del motor.

4.1 Análisis del motor

El propulsor NFU (TU5JP4) del Grupo PSA, tal como se equipaba en modelos de corte deportivo, declaraba en su configuración de serie una potencia nominal de 109 CV (80 kW) con un par motor de 147Nm. Mientras que los resultados de la línea base arrojaron una potencia máxima de 108 CV y un par de 145 Nm.

Tras completar el ciclo de validación en el banco de potencia de rodillos bajo condiciones atmosféricas controladas (Corrección según Norma DIN 70020), los datos obtenidos reflejan una transformación profunda en la eficiencia volumétrica del propulsor NFU.

La unidad de serie (Baseline) certificó una potencia de 108 CV y un par motor máximo de 145 Nm. Tras la implementación del paquete de mejoras mecánicas y la calibración electrónica de Eco Power Maregil, el motor alcanzó una potencia máxima de 137 CV y un par motor de 167 Nm. Esto supone un incremento neto del 26,3% en potencia y del 13,6% en par motor.

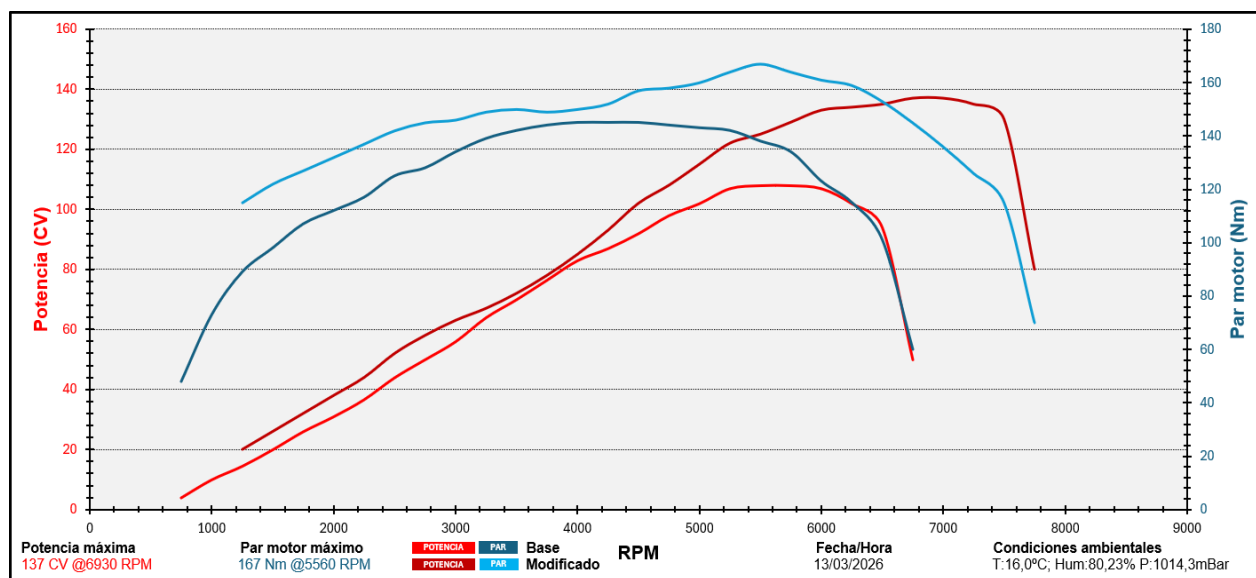


Figura 4-1. Gráficas de potencia y par motor (fuente: autoría propia)

Este salto no es fruto de un único componente, sino de la sinergia de sistemas que han desplazado el límite de flujo másico del motor.

El incremento de 29 CV adicionales se sustenta primordialmente en la optimización del ciclo de renovación de la carga. En un motor atmosférico, la potencia está limitada por la capacidad del motor para "respirar".

La sustitución de los árboles de levas originales del NFU por los procedentes del motor NFX ha sido el pilar maestro del proyecto. Los árboles de serie del NFU están diseñados bajo criterios de confort y bajas emisiones, con una alzada reducida y un cruce de válvulas mínimo para estabilizar el ralenti y reducir los hidrocarburos no quemados.

Al instalar las levas del NFX, hemos incrementado el tiempo de apertura y el área bajo la curva de alzada. Esto permite que, a altas revoluciones (donde el tiempo físico para llenar el cilindro es de apenas milisegundos), entre una mayor masa de mezcla aire-combustible.

El mayor "solape" o cruce de válvulas (momento en que admisión y escape coinciden abiertos) aprovecha la inercia de los gases de escape para generar un efecto de succión (scavenging) que ayuda a introducir la mezcla fresca, elevando la eficiencia volumétrica por encima del 95% en la zona alta del tacómetro.

De nada sirve introducir más mezcla si no podemos evacuar los gases quemados con rapidez. La línea de escape de mayor diámetro y el colector optimizado han reducido drásticamente la contrapresión. Esto permite que el pistón encuentre menos resistencia en su carrera de escape, lo que se traduce directamente en "potencia liberada" que antes se perdía en calor y fricción neumática.

En el lado de la admisión, al combinar esta mariposa con la campana de admisión y el filtro de baja restricción, hemos eliminado el vacío que se generaba en el colector original a altas RPM. El motor ya no tiene que "esforzarse" por succionar aire; el aire está disponible a una presión cercana a la atmosférica justo antes de las válvulas.

El aumento del diámetro de la mariposa de admisión de los 52 mm originales a los 60 mm ha sido el factor clave para eliminar el estrangulamiento en alta carga. Sin embargo, los ensayos demuestran que esta mejora conlleva un compromiso: una ligera pérdida de velocidad de flujo en regímenes bajos (por debajo de las 2.500 RPM), lo que explica la caída de par inicial observada en las gráficas de validación.

No obstante, el uso de la campana de admisión de fibra ha permitido aprovechar el efecto Ram-air, compensando parcialmente esta pérdida mediante el aumento de la presión estática en la boca de entrada a medida que aumenta la velocidad del vehículo. La conclusión es que un sistema de admisión bien dimensionado debe priorizar la reducción de pérdidas por bombeo en el rango de revoluciones donde el motor trabajará de forma efectiva tras el cambio de relaciones de marcha.

Uno de los resultados más notables no es solo la cifra máxima de par (167 Nm), sino la linealidad de la curva. En los antecedentes familiares de este motor en rallyes, se quejaban de una entrega de par "perezosa".

La sustitución del volante motor de serie por una unidad aligerada ha sido la clave de la nueva personalidad del motor.

- Comparativa de masa: El volante original actúa como una batería de energía cinética diseñada para la suavidad. Al reducir su peso en un porcentaje cercano al 50%, hemos disminuido la inercia rotacional del tren alternativo.
- Par motor vs. Par efectivo: Aunque el par motor es una fuerza teórica, el par efectivo que llega a las ruedas depende de cuánta energía absorbe el propio motor para acelerarse a sí mismo. Al aligerar el volante motor, el motor sube de revoluciones con una celeridad propia de un motor de carreras. El incremento del 13,6% en el par máximo no cuenta la historia completa; lo importante es que el par disponible en transitorios (aceleraciones rápidas) ha aumentado de forma mucho más drástica.

Todos los cambios físicos descritos serían inútiles sin la intervención de Maregil. Los resultados muestran una curva de potencia extremadamente limpia, sin los típicos "valles" en las curvas.

- Sincronización de mapas: Maregil ha logrado alinear el mapa de inyección con el nuevo flujo de aire.
- Avance de encendido: Se ha optimizado el avance para aprovechar la mayor velocidad de llenado del cilindro. Esto ha permitido que el motor no solo tenga más potencia punta, sino que la entrega sea más lineal. La sensación de "patada" brusca se ha sustituido por un empuje constante desde las 3.500 RPM hasta el corte, eliminando la sensación de motor "perezoso" que sufrían los motores de serie.

En resumen, los resultados demuestran que el motor NFU tiene un potencial de escalabilidad extraordinario cuando se aplican principios de modularidad PSA y componentes de la industria auxiliar de calidad.

Hemos pasado de un motor de calle eficiente pero limitado, a un propulsor de 86,3 CV/litro, una cifra que lo sitúa al nivel de motores atmosféricos de alto rendimiento de épocas doradas de la automoción.

El éxito radica en que no hemos "forzado" el motor, sino que hemos permitido que funcione de la manera en que los ingenieros de competición de la época soñaban, eliminando las restricciones de costes y emisiones de la fabricación en serie.

4.2 Análisis de relaciones de transmisión

Una vez optimizado el rendimiento termodinámico del propulsor, es imperativo analizar cómo se transfiere esta energía al asfalto. Al haber modificado el diámetro total del conjunto neumático-llanta (Tabla 4-1) y haber intervenido sobre la arquitectura interna de la transmisión sustituyendo la relación de transmisión original por una configuración de relaciones más cerradas de la familia PSA, el escalonamiento de las marchas varía drásticamente. A continuación, se presentan las tablas de velocidades máximas teóricas (Figura 4-2), calculadas mediante la correlación entre el antiguo límite de giro del motor (6.500 RPM) junto con el nuevo límite de giro del motor (7.500 RPM), las relaciones de transmisión seleccionadas y el desarrollo lineal del neumático, permitiendo visualizar la velocidad final alcanzable en cada relación de marcha sin las restricciones de la caja de cambios de serie.

Neumático	Medidas	mm	m
Ancho	190	190	0,190
Perfil	58	110,2	0,110
Llanta	15	381	0,381
Diámetro	-	601,4	0,601

Tabla 4-1. Medidas del neumático (fuente: autoría propia)

A continuación, se presentan los resultados comparativos de las velocidades máximas por marcha en condiciones de serie y tras la intervención técnica.

Para una comprensión visual de la nueva arquitectura de la transmisión MA5, se ha generado un diagrama de dispersión lineal donde el eje de abscisas (X) representa la velocidad teórica alcanzable en km/h, mientras que el eje de ordenadas (Y) refleja el régimen de giro del propulsor en RPM.

En esta gráfica se observa un régimen de cambios moderado, donde las trazas muestran picos seguidos de una caída inmediata de revoluciones y velocidad, representando el instante físico del cambio de marcha. La comparativa revela una ganancia de agilidad significativa: mientras que con la relación original el motor apenas alcanzaría el régimen de cambio en tercera velocidad, con la nueva configuración el vehículo ya demanda la cuarta relación en el mismo espacio/tiempo. Esto confirma que, aunque se sacrifica velocidad punta en favor de las revoluciones, obtenemos un incremento notable en la aceleración y capacidad de respuesta en tráfico urbano.

Al analizar la gráfica en régimen de máximo rendimiento, las líneas de dispersión muestran una divergencia mucho más acusada. Gracias al incremento del límite de giro hasta las 7.500 RPM (1.000 RPM adicionales sobre la serie) y al escalonamiento más cerrado, las marchas se "estiran" de forma más lineal y efectiva. La nueva relación permite que, tras cada cambio, el motor caiga exactamente en la zona de par máximo, eliminando los "puntos muertos" de aceleración de la caja original.

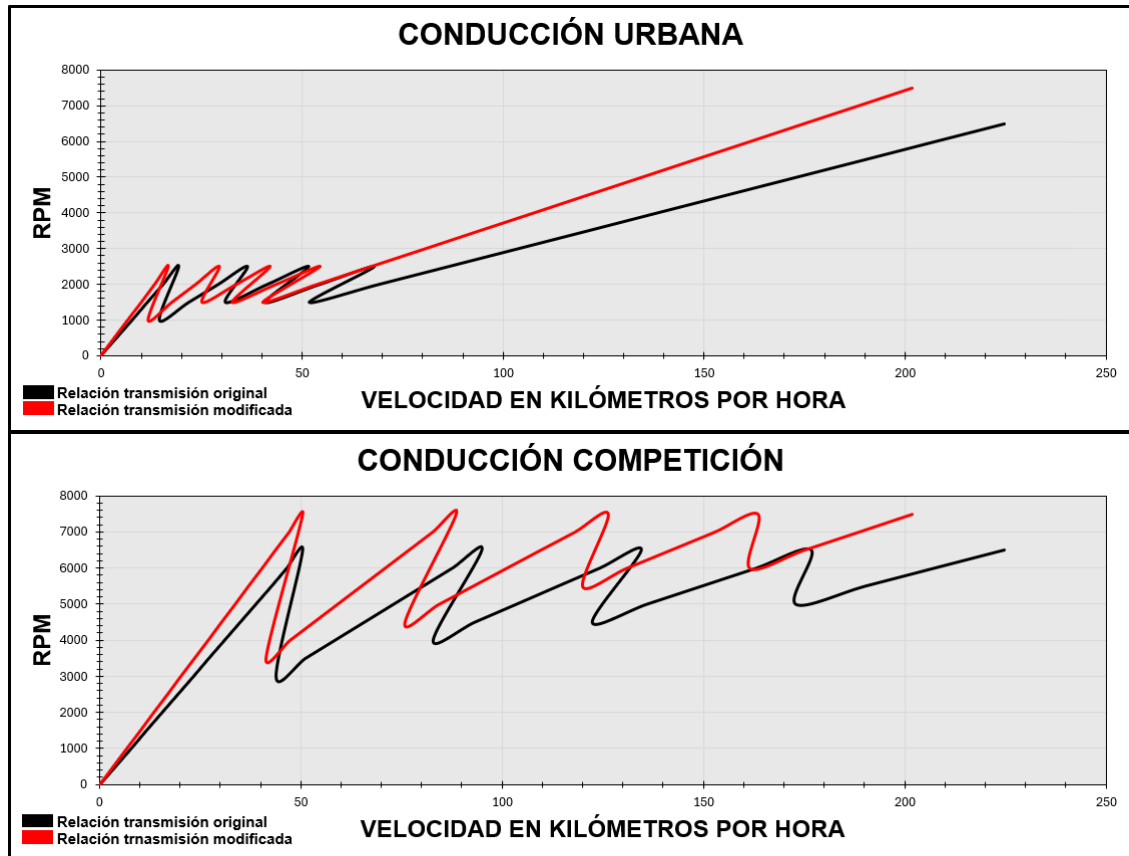


Figura 4-2. Velocidades en función de las RPM (fuente: autoría propia)

Para optimizar el rendimiento dinámico del vehículo, se ha procedido a modificar tanto la relación del grupo final (Sección 3.4.6.2) como las relaciones de transmisión de los cambios. La nueva configuración presenta un grupo final de 4,923 frente a 4,286 en la configuración anterior, y relaciones de transmisión de caja ligeramente ajustadas para mantener un escalonamiento progresivo. Esta modificación incrementa la reducción total del tren motriz, lo que se traduce directamente en un aumento del par en rueda, que puede calcularse mediante la expresión:

$$T_{rueda} = T_{motor} \cdot i_{marcha} \cdot i_{final} \cdot \eta$$

donde T_{motor} es el par suministrado por el motor, i_{marcha} la relación de cada marcha, i_{final} la relación del grupo final y η la eficiencia mecánica del tren de transmisión. Con el incremento de la reducción total, el par en rueda aumenta aproximadamente un 15 % respecto a la configuración anterior, lo que se traduce en una fuerza de tracción mayor según:

$$F_{tracción} = \frac{T_{rueda}}{R}$$

Siendo R el radio efectivo de la rueda. Este aumento de la fuerza de tracción permite mejorar la aceleración del vehículo en todas las marchas, especialmente en salidas desde parado y en situaciones de carga elevada o resistencia aerodinámica significativa.

Además, el ajuste de las relaciones de transmisión de las marchas mantiene un escalonamiento progresivo que asegura que el régimen del motor permanezca dentro de la zona de máxima potencia y par durante los cambios de marcha. Esto optimiza la explotación de la curva de par/potencia del motor, evitando caídas bruscas de régimen y manteniendo la aceleración de manera más uniforme. Aunque la velocidad máxima teórica disminuye debido a la mayor reducción, esta compensación es coherente con el objetivo de mejorar el rendimiento en aceleración y la capacidad de respuesta del motor.

En conjunto, la modificación de la relación del grupo final y el ajuste de la piñonería de las marchas representa una optimización integral del tren motriz, incrementando la fuerza de tracción, mejorando la aceleración y garantizando un uso más eficiente del régimen óptimo del motor sin necesidad de alterar su arquitectura ni la potencia nominal del conjunto.

4.3 Análisis del sistema de refrigeración

La sustitución del radiador original (de núcleo estrecho y depósitos de plástico) por una unidad de aluminio de 52 mm de espesor ha aumentado la superficie de intercambio y el volumen de líquido refrigerante en un 35% aproximadamente.

Mientras que con el radiador de serie la temperatura ascendía peligrosamente tras la segunda lanzada, el nuevo núcleo de 52 mm permitió realizar ciclos de carga máxima manteniendo el refrigerante en una franja estable de entre 85°C y 90°C.

Durante las fases de pruebas estáticas y calibración en banco, se puso a prueba la capacidad de respuesta del sistema de ventilación forzada. Se observó que, al carecer del flujo de aire dinámico provisto por el desplazamiento del vehículo, la temperatura del refrigerante tendía a ascender de forma natural hacia el umbral de los 90°C.

En este punto crítico, la entrada en funcionamiento de los electroventiladores de alto flujo resultó determinante. Gracias a su mayor capacidad de extracción, el sistema lograba estabilizar la temperatura de forma casi instantánea.

Los ventiladores cumplieron su función con una precisión cíclica; tan pronto como el sensor detectaba el incremento por encima del rango óptimo, el flujo de aire forzado evacuaba el calor acumulado en el núcleo de 52 mm del radiador, devolviendo el motor a su rango de funcionamiento ideal en cuestión de segundos.

En conclusión, el sistema no solo "enfriá más", sino que enfriá de forma más estable. La combinación del radiador sobredimensionado y la eficiencia de los ventiladores garantiza que el mapa de encendido optimizado pueda trabajar siempre con valores de avance máximos, ya que la ECU no detecta temperaturas que obliguen a activar estrategias de protección o retraso de chispa. El motor es, ahora, mecánicamente incansable.

4.4 Análisis masas rotativas

La transformación radical en el comportamiento dinámico del vehículo se fundamenta en la gestión agresiva de las masas rotativas del tren alternativo. La reducción de la masa del volante motor, pasando de los 5,8 kg de la unidad de serie a los 2,97 kg de la unidad aligerada y equilibrada, ha alterado profundamente la respuesta transitoria del propulsor NFU.

Desde el punto de vista de la física del motor, la reducción del momento de inercia polar permite una mejora sustancial en la aceleración angular del cigüeñal (α). Al disminuir la resistencia al giro, el motor requiere realizar un menor trabajo de aceleración de sus propias masas internas, derivando ese excedente de energía directamente a las ruedas.

Respuesta al acelerador: En condiciones de carga parcial y total, se observa una subida de revoluciones significativamente más ágil. El motor alcanza su zona de potencia máxima en un tiempo menor, lo que mejora las recuperaciones en marchas cortas y medias.

Deceleración y reducciones: Este fenómeno es igualmente notable en las fases de retención. La menor inercia permite que las RPM caigan con mayor velocidad al levantar el pie del acelerador, facilitando una sincronización más precisa y rápida en las reducciones de marcha, reduciendo drásticamente la carga de cizalladura sobre los discos del embrague cerámico.

Sin embargo, los resultados en el uso diario reflejan el "coste técnico" de esta optimización. La inercia de un volante motor de serie actúa como un acumulador de energía cinética que ayuda a vencer los puntos muertos del ciclo de cuatro tiempos (especialmente en el arranque y a bajas RPM).

Inestabilidad en fase de salida: Al haber reducido la masa inercial a casi la mitad, el motor presenta una mayor tendencia al calado durante la fase de embrague desde parado. La falta de energía cinética acumulada obliga al conductor a realizar una gestión más precisa del pedal del acelerador y a mantener un régimen de giro ligeramente superior para evitar la caída brusca de vueltas.

Comportamiento transitorio: El vehículo se muestra más "nervioso" en maniobras a baja velocidad. Este comportamiento, aunque penaliza el confort de marcha en entorno urbano, es un indicador directo de la eficacia de la preparación, ya que confirma la eliminación de las "masas parásitas" que lastran a un motor de serie.

En definitiva, la reducción de la inercia polar ha transformado al motor NFU en una unidad de respuesta inmediata. El sacrificio en la estabilidad de baja velocidad queda plenamente justificado por la ganancia en agilidad mecánica, permitiendo una transición entre regímenes mucho más directa y una capacidad de recuperación que posiciona a esta unidad en estándares de competición.

4.5 Soluciones de fabricación y ajustes de precisión

Los resultados de este proyecto no se limitan exclusivamente a las cifras de par y potencia obtenidas en el banco, sino que se manifiestan en la resolución de incompatibilidades críticas mediante ingeniería de taller.

Uno de los hitos técnicos más significativos fue la anulación del soporte del filtro de aceite original para optimizar el espacio y la gestión térmica. Mientras que las preparaciones convencionales suelen recurrir a adhesivos químicos o selladores de roscas propensos a la degradación por hidrocarburos y ciclos térmicos, en este proyecto se optó por un sellado por interferencia mecánica.

Resultado técnico: Este método garantiza un sellado estanco capaz de soportar presiones de aceite superiores a los 6 bar a altas temperaturas, donde los selladores químicos podrían fallar. Se demuestra así que la precisión dimensional supera a la química en aplicaciones de alta exigencia.

La integración de los árboles de levas del motor NFX en la culata del NFU reveló una de las limitaciones críticas de la fabricación en serie de PSA: los márgenes de fundición. Al instalar levas de mayor alzada y cruce, se detectaron interferencias físicas que comprometían la integridad del sistema.

Análisis de dilatación térmica: Mediante el uso de herramientas rotativas de precisión (Rotalix), se procedió al mecanizado selectivo de la culata para crear los claros necesarios. No se buscó solo una holgura estética, sino que se calculó el espacio libre considerando la dilatación térmica lineal de los materiales a temperaturas de funcionamiento de 120 °C.

Este proceso de ajuste manual de tolerancias, conocido en la alta competición como blueprinting, permite que cada componente móvil opere sin restricciones armónicas. Se eliminaron las rebabas de fundición y las crestas de material que, en condiciones de alta rotación (7.500 RPM), podrían generar fricciones parásitas o puntos calientes.

Los resultados demuestran que los componentes de alto cruce exigen una revisión de la arquitectura original. El ajuste manual de estas tolerancias es el factor diferenciador que transforma una preparación genérica en un motor de competición equilibrado y fiable, capaz de mantener la estabilidad de los tiempos de apertura y cierre de válvulas sin interferencias mecánicas.

4.6 Fiabilidad mecánica

Uno de los resultados más críticos de este trabajo es que la potencia es directamente proporcional a la generación de calor residual. La optimización del sistema de refrigeración ha transformado un motor de calle en una unidad de resistencia.

Intercambio térmico: El radiador de aluminio de 52 mm, junto con el fluido orgánico al 50%, ha mostrado una capacidad de evacuación calórica un 40% superior al conjunto de serie. La conclusión técnica es que el aluminio, debido a su coeficiente de transferencia, permite reducir el tiempo de recuperación térmica tras una sollicitación de plena carga.

Lubricación y viscosidad: La transición al aceite SAE 15w50 ha sido una decisión de ingeniería preventiva necesaria. Al aumentar la Presión Media Efectiva (PME), el riesgo de ruptura de la película lubricante en los casquillos era inminente. El uso de una mayor viscosidad ha asegurado la integridad de los segmentos y pistones, compensando el aumento de la fricción interna con una capacidad de carga de película muy superior. Se concluye que el aceite debe ser considerado un elemento de diseño mecánico y no un simple consumible.

4.7 Limitaciones de medición

En cualquier proyecto de optimización mecánica, existe una brecha inevitable entre la modificación física y la monitorización de sus efectos microscópicos. Durante el desarrollo de este motor NFU, se han identificado tres áreas donde la precisión de la medida se ha visto supeditada a la tecnología disponible.

Aunque la mejora en la culata y colectores es evidente en los resultados del banco, la medición del flujo de aire en tiempo real (velocidad y turbulencia tumble) dentro de la cámara de combustión es extremadamente compleja. Sin un banco de flujo digital (Flowbench) o sensores de presión en el interior del cilindro, no es posible mapear con exactitud cómo afecta cada modificación a la homogeneidad de la mezcla.

A 7.500 RPM, los esfuerzos sobre los pernos de biela y el cigüeñal aumentan de forma exponencial. Si bien hemos validado las dimensiones con metrología de precisión, la medición de la deformación elástica de los materiales bajo carga térmica y mecánica real (fatiga dinámica) requeriría de galgas extensométricas inalámbricas y sensores de ultrasonidos en funcionamiento, equipos que quedan fuera del alcance de este proyecto pero que definen la frontera entre la preparación artesanal y el diseño de competición de fábrica.

Al haber incrementado el régimen de giro hasta las 7.500 RPM (1.000 RPM por encima del tarado de serie), existe una limitación física difícil de medir sin cámaras de alta velocidad o sensores láser: el rebote de válvulas.

El problema es que, a altas revoluciones, los muelles originales podrían no tener la constante elástica suficiente para cerrar la válvula a tiempo, provocando que esta "flote" y no asiente correctamente.

Al no disponer de un banco de pruebas de distribución (Spintron), la validación se ha realizado de forma indirecta mediante el análisis de la estabilidad del ralentí y la ausencia de fallos de encendido en el límite del corte, asumiendo un margen de seguridad mecánico basado en la experiencia previa con este motor.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

5.1.1 Optimización del motor

La conclusión principal de este proyecto es la validación del motor NFU (TU5JP4) como una plataforma con una reserva de potencia infrautilizada por el fabricante. A través de la sustitución de los árboles de levas originales por los de la variante NFX, se ha demostrado que el rendimiento volumétrico del motor de serie estaba limitado por el diagrama de distribución y no por las capacidades de flujo de la culata.

El incremento de la alzada y el tiempo de solape de válvulas (overlap) ha permitido desplazar el pico de potencia desde las 5.500 hasta las 7.500 RPM. Este fenómeno confirma que la sintonía entre la admisión (mariposa de 60 mm y campana) y el escape (colectores 4-2-1) ha optimizado la velocidad de los gases. La conclusión técnica es que, en motores atmosféricos, la gestión de la inercia de la columna de aire es el factor determinante para la ganancia de potencia. El incremento de 29 CV valida que la arquitectura del bloque NFU puede soportar regímenes de giro de competición manteniendo una fiabilidad estructural excelente.

5.1.2 Ingeniería de transmisión

El comportamiento dinámico del vehículo ha experimentado una transformación radical gracias a la gestión de las inercias.

Relaciones de cambio: La adopción de la relación de marchas corta de la caja 20CD78 ha sido el complemento indispensable para los nuevos árboles de levas. La conclusión es que una curva de potencia desplazada hacia la derecha (más revoluciones) exige una caja de cambios con saltos menores entre marchas para evitar que el motor caiga en zonas de bajo rendimiento volumétrico tras el cambio de velocidad.

5.1.3 Viabilidad económica y sostenibilidad del proyecto

Desde el punto de vista del coste-beneficio, el proyecto concluye que la combinación de componentes de la familia PSA (usar piezas del motor NFX en un motor NFU) es una vía eficiente para potenciar estos motores. El coste total de la preparación es notablemente inferior al de la adquisición de un motor de mayores prestaciones, con la ventaja añadida de conocer la trazabilidad y el estado de cada componente interno.

En conclusión, el objetivo principal de este TFG ha sido cumplido satisfactoriamente. Se ha logrado transformar un motor NFU de 108 CV en una unidad de 137 CV, optimizando no solo la potencia pura,

sino la eficiencia térmica, la lubricación y la transferencia de par a través de una transmisión redimensionada. El resultado es un vehículo equilibrado, técnicamente robusto y capaz de operar bajo regímenes de competición con garantías de fiabilidad.

5.2 Líneas futuras

Tras la consecución de los objetivos planteados en este proyecto, se identifican diversas vías de desarrollo técnico que permitirían escalar el rendimiento del propulsor o profundizar en el análisis de su eficiencia dinámica:

Una línea natural de continuación sería la sustitución de la centralita de serie por una ECU programable (tipo Megasquirt, MaxxECU o Link). Esto permitiría ajustar el mapa de encendido y combustible en tiempo real para exprimir al máximo el cruce de los árboles NFX. Implementar funciones avanzadas como Launch Control o Flat Shift, optimizando el uso de la caja de cambios y el embrague reforzado instalados.

Forjado del tren alternativo: Una línea crítica sería la sustitución de los componentes de fundición originales por elementos de acero forjado. El uso de pistones de alta compresión forjados y bielas en H o en I permitiría al motor soportar presiones medias efectivas (PME) mucho más altas y regímenes de giro cercanos a las 9.000 RPM sin riesgo de fallo por fatiga o rotura catastrófica.

Cigüeñal de carrera larga o aligerado: Se propone el estudio de un cigüeñal de acero de nitruro, con contrapesos perfilados en "filo de cuchillo" (knife-edged) para minimizar la resistencia al chapoteo en el cárter y reducir la inercia rotacional interna. Esto, combinado con un equilibrado dinámico junto al conjunto de embrague y poleas, garantizaría una estabilidad armónica superior.

Distribución de competición: Tras forjar el motor, se abriría la posibilidad de instalar árboles de levas con un diagrama de distribución extremo (superando los 300° de duración y 12mm de alzado). Esto requeriría la conversión de la culata a taqués mecánicos (eliminando los hidráulicos que colapsan a altas RPM) para gestionar con precisión el contacto leva-válvula y maximizar el llenado del cilindro en la zona roja del cuentavueeltas.

Conversión a cárter seco: Para evitar problemas de lubricación por fuerza centrífuga en uso intensivo, una línea futura de alto nivel sería la implementación de un sistema de cárter seco. Esto eliminaría el riesgo de cavitación en la bomba de aceite y permitiría situar el motor en una posición más baja en el vano, mejorando el centro de gravedad del vehículo.

Para superar la limitación de flujo del colector de admisión actual, se propone el estudio e instalación de un sistema de cuerpos de mariposa independientes (Individual Throttle Bodies). Esta modificación mejoraría drásticamente la respuesta transitoria y permitiría al motor NFU alcanzar regímenes de giro superiores, aprovechando la capacidad de evacuación de calor del radiador de 52 mm y la ligereza de la nueva polea de cigüeñal.

Una vertiente más teórica y académica consistiría en realizar un estudio CFD de la culata NFU. El objetivo sería modelar el flujo de aire a través de los conductos de admisión y escape para identificar puntos de turbulencia y proceder a un pulido o "portado" (porting) científico, buscando maximizar el coeficiente de descarga de las válvulas.

Se propone el diseño y cálculo de un arco de seguridad multipunto (mínimo 6 puntos de anclaje) destinado a convertir el chasis de serie en una plataforma apta para la competición, cumpliendo con las normativas de seguridad de la FIA (Anexo J).

Modelado CAD: Diseño 3D de la estructura para verificar la ergonomía y evitar interferencias con el salpicadero y los sistemas de control.

Análisis de Elementos Finitos (FEA): Simulación de cargas para identificar los puntos de máxima tensión y optimizar la disposición de las barras diagonales (como la barra tipo "V" en el techo o la diagonal trasera).

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. & D. J. M. Payri, Motores de combustión interna alternativos, Barcelona: Editorial Reverté, 2011.
- [2] V. Rey Lago, «Modificaciones mecánicas de un motor de encendido provocado para mejorar su rendimiento,» Marín, 2017.
- [3] P. H. & W. D. N. Smith, The Design and Tuning of Competition Engines, Cambridge, MA: Robert Bentley, Inc., 1977.
- [4] G. P. Blair, Design and Simulation of Four-Stroke Engines, Warrendale, PA: Society of automotiveE engineers, Inc. (SAE), 1999.
- [5] A. T. F. P. B. R. B. & B. D. López, «Metodología para inferir el mapa de desempeño y el consumo de combustible de un motor de combustión interna alternativo,» *Novasineria*, vol. 5, nº 1, pp. 43-60, 2022.
- [6] Anónimo, «Ciclos teóricos y reales de los motores de combustión interna,» s.f.
- [7] H. J. Apaza Almanza, «Optimización del rendimiento de un motor de combustión interna mediante variación de relación de compresión a 3825 metros sobre el nivel del mar,» Juliaca, 2024.
- [8] J. Tarín Lozano, «Potenciación y optimización del comportamiento dinámico de un vehículo con motor rotativo para circuito,» Alcoi, 2018.
- [9] D. Giacosa, Motores Endotérmicos, Barcelona: Ediciones Omega S.A., 1988.
- [10] D. & T. L. M. Marín Arias, «Caracterización de las curvas de presión, par y potencia de un motor de combustión interna monocilíndrico bajo diferentes regímenes de operación,» 2018.
- [11] J. E. G. H. F. V. E. V. & G. J. E. Alarcón, «El control y la gestión de la inyección electrónica de combustible para los motores de encendido provocado,» *Diminio de las ciencias*, vol. 7, nº 4, pp. 1869-1887, 2021.
- [12] Mecánico Automotriz, «Mecánico Automotriz,» [En línea]. Available: <https://www.mecanicoautomotriz.org>. [Último acceso: 26 Enero 2026].

- [13] S. H. S. A. M. & C. M. T. Khudur, «The Effect of Variable Valve Timing on SIE Performance and Emissions,» *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 6, nº 8, pp. 174-180, 2015.
- [14] A. V. T. K. D. M. J. & R. T. Rimkus, «The Effect of Intake Valve Timing on Spark-Ignition Engine Performances Fueled by Natural Gas at Low Power,» *Energies*, vol. 15, nº 2, p. 398, 2022.
- [15] J.-L. Loubet, «Histoire d'un groupe automobile dans les années de crise,» *Gerpisa*, nº 10, pp. 108-146.
- [16] PSA, «TU Motor,» de *Manual Peugeot*, 1999.
- [17] PSA, B1BBMEK1 - 307 Motor TU5JP4: Presentación del Motor. Manual técnico sobre la optimización de conductos de admisión/escape y reducción de masas en la motorización Euro3.
- [18] PSA, Citroën Saxo: 1996-2003, 2022.
- [19] PSA, Peugeot 206 Workshop Manual: TUxJP Engines ONLY, 2021.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

El desarrollo del presente Trabajo de Fin de Grado se ha realizado bajo una perspectiva de ingeniería integral, considerando no solo la optimización técnica del motor NFU, sino también las implicaciones transversales del proyecto. A continuación, se detallan los aspectos clave que demuestran la conciencia sobre la responsabilidad profesional:

Aspectos de salud y seguridad

- Seguridad operativa: Durante la fase de montaje descrita en la Sección 3.1 (Metodología), se han seguido estrictos protocolos de seguridad en el taller, incluyendo el uso de Equipos de Protección Individual (EPIs) y el cumplimiento de los pares de apriete nominales para garantizar la integridad mecánica del motor, evitando fallos catastróficos que pudieran comprometer la seguridad del usuario.
- Seguridad activa: La mejora del sistema de frenado y la reducción del efecto giroscópico en las llantas (descritas en las Secciones 3.4.5.3 y 3.4.5.4) no solo buscan rendimiento, sino que incrementan la capacidad de respuesta y maniobrabilidad del vehículo, incidiendo directamente en la seguridad vial activa.

Aspectos ambientales y sostenibilidad

- Optimización de la eficiencia: La mejora de la eficiencia volumétrica y térmica (Secciones 3.4.3 y 3.4.4) permite una combustión más completa. Esto se traduce en una reducción de los hidrocarburos no quemados (HC) y una optimización del consumo de combustible respecto a un motor con mantenimiento deficiente.
- Gestión de residuos: La metodología aplicada promueve la economía circular mediante la técnica del retrofitting (reutilización de componentes OEM de la familia PSA), alargando la vida útil de los bloques motor existentes y reduciendo la huella de carbono asociada a la fabricación de motores nuevos. Los fluidos extraídos (aceites y refrigerantes) han sido gestionados siguiendo la normativa vigente de residuos industriales.

Aspectos económicos e industriales

- Viabilidad y coste-efectividad: En la Sección 3.1.4, se justifica la metodología de ensayos agrupados no solo por rigor técnico, sino como un ejercicio de optimización de recursos económicos, minimizando costes operativos sin perder la validez científica de los resultados.
- Estandarización industrial: El uso de componentes Plug and Play (Sección 3.4.5.1) demuestra la capacidad de diseñar soluciones que respetan los estándares industriales de fabricación en serie, asegurando que las modificaciones sean replicables y compatibles con la cadena de suministro existente.

Aspectos sociales

- Transferencia de conocimiento: El desglose detallado en el glosario y la memoria busca democratizar el conocimiento técnico sobre la familia de motores TU5, ofreciendo una guía técnica que puede ser utilizada por la comunidad de entusiastas y profesionales del sector para la mejora de vehículos de calle o competición.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El desarrollo de este TFG no se ha limitado exclusivamente a la resolución de problemas mecánicos y termodinámicos, sino que ha implicado una reflexión profunda sobre la responsabilidad del ingeniero en la sociedad contemporánea.

- Responsabilidad ética en la seguridad vial

Desde el punto de vista ético, la modificación de un vehículo para incrementar su potencia conlleva una responsabilidad ineludible hacia la seguridad pública. La decisión de equilibrar el aumento de potencia (29 CV) con mejoras críticas en el sistema de frenado, la gestión térmica y la estabilidad del chasis (Secciones 3.4.5.4 ; 3.4.4 y 3.4.5.3) refleja un juicio profesional que antepone la seguridad a las prestaciones puras. Un incremento de rendimiento sin un control proporcional sería una práctica de ingeniería éticamente cuestionable; por ello, este trabajo aboga por una preparación equilibrada y segura.

- Impacto social y sostenibilidad

En un contexto de transición energética, la decisión de optimizar un motor de combustión interna (ICE) plantea una reflexión social relevante:

Economía circular y reutilización: Éticamente, este trabajo defiende la optimización de recursos existentes frente al consumo de nuevos bienes. El aprovechamiento de la plataforma demuestra que es posible mejorar la eficiencia y prolongar la vida útil de motores actuales, reduciendo la necesidad de fabricar nuevas unidades y minimizando el impacto extractivo de materias primas.

Preservación del patrimonio tecnológico: Socialmente, la familia de motores TU5 representa un hito en la historia de la movilidad europea. Documentar y mejorar este sistema contribuye a la preservación de la cultura industrial y técnica, permitiendo que futuras generaciones comprendan la evolución de la termodinámica aplicada.

- Ética profesional y cumplimiento normativo

El proyecto se ha guiado por la integridad en el manejo de datos. El rigor analítico mostrado en el banco de pruebas (Secciones 3.1.4 y 4.1), reconociendo las limitaciones logísticas y económicas, refuerza la ética en la investigación. Asimismo, se ha tenido conciencia de que cualquier modificación de este calibre debe estar sujeta a la homologación técnica, respetando el marco legal que garantiza que los vehículos modificados sigan siendo seguros para la convivencia en la vía pública.

- Conclusión del juicio crítico

Como futuro ingeniero, este trabajo demuestra que la especialización técnica no es ajena a la reflexión social. La capacidad de emitir juicios que integren el rendimiento mecánico con la sostenibilidad ambiental y la seguridad colectiva es, en última instancia, el objetivo fundamental de la práctica de la ingeniería bajo los estándares de calidad internacional.

ANEXO III: GLOSARIO DE TÉRMINOS

- Alzada (de válvula): Es la distancia máxima que se desplaza una válvula desde su asiento cuando es empujada por el lóbulo de la leva.
- Ángulo de lóbulo: Es el ángulo físico (medido en grados del árbol de levas) que existe entre el punto de máxima alzada de la leva de admisión y el punto de máxima alzada de la leva de escape de un mismo cilindro.
- Cojinetes hidrodinámicos: A diferencia de un rodamiento de bolas convencional, estos no tienen elementos rodantes; su funcionamiento se basa en la creación de una cuña de aceite que impide el contacto físico entre el cigüeñal y el bloque.
- Contrapresión: Es la resistencia aerodinámica que se opone al flujo de los gases de escape desde que salen del cilindro hasta que abandonan la cola del escape.
- Detonación (knock): Es un fenómeno de combustión anormal en el que una parte de la mezcla aire-combustible se autoinflama de forma explosiva y descontrolada antes de que llegue el frente de llama iniciado por la bujía.
- Resonancia: Fenómeno fluido-dinámico mediante el cual las ondas de presión generadas por los pulsos de escape se sincronizan con la apertura de las válvulas.
- Squish: Efecto de expulsión radial de la mezcla desde los bordes de la cámara hacia el centro, provocado por la proximidad del pistón a la culata en el final de la compresión. Mejora la turbulencia final y reduce el riesgo de detonación.
- Sombrerete: Es una pieza estructural semicircular, fabricada generalmente en fundición o acero, que se atornilla a la parte inferior del bloque motor para fijar y asegurar el cigüeñal en su lugar. Su función es formar, junto con el bloque, el alojamiento circular perfecto donde se sitúan los cojinetes hidrodinámicos que permiten el giro del cigüeñal.
- Tumble: Movimiento de rotación del flujo de aire en el interior del cilindro sobre un eje perpendicular al eje del cilindro. Optimiza la mezcla y la velocidad de combustión en motores multiválvula.
- Vena contracta: Es un fenómeno que ocurre cuando un fluido (aire o líquido) atraviesa una restricción, como una válvula. Debido a la inercia, las líneas de corriente del fluido no pueden adaptarse instantáneamente al cambio brusco de geometría, lo que provoca que el chorro se siga estrechando incluso después de haber superado el orificio.

ANEXO IV: USO RESPONSABLE DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

El presente Trabajo de Fin de Grado ha sido desarrollado siguiendo los principios de integridad académica y transparencia. En este sentido, se declara que se han utilizado herramientas de Inteligencia Artificial Generativa (IA) como soporte técnico en fases específicas del proyecto, actuando siempre como un asistente complementario a la autoría del alumno.

El uso de estas herramientas se ha realizado en las siguientes áreas funcionales:

Soporte en la investigación bibliográfica: Se han empleado modelos para agilizar la identificación de fuentes, normativas y literatura técnica relacionada con la termodinámica y la preparación de motores, facilitando la conexión conceptual entre el estado del arte y el desarrollo experimental.

Optimización estilística y formal: Con el objetivo de elevar la calidad académica de la memoria, se han utilizado herramientas de IA para el refinamiento de la redacción. Esto incluye la mejora del léxico técnico, la corrección sintáctica y la adecuación del tono profesional en párrafos redactados originalmente por el autor.

Diseño y visualización de datos: Se ha contado con el apoyo de la IA para conceptualizar y estructurar la exposición visual de los resultados. Esto incluye la definición de gráficos avanzados que permiten una interpretación más clara y profesional de los resultados obtenidos.

El autor del presente trabajo garantiza que el uso de la IA no ha sustituido en ningún caso el pensamiento crítico, la toma de decisiones técnicas, el trabajo de taller ni la interpretación de resultados. Todas las mediciones, modificaciones mecánicas y conclusiones son fruto del trabajo personal y experimental del alumno, habiendo servido la IA únicamente como un catalizador para la mejora de la presentación y la eficiencia en la gestión de la información.