



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO

PROYECTO FIN DE CARRERA



ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO DEL EJE EN TURBO COMPRESORES DE M.C.I.A.

DIRECTOR: D. VICENTE DOLZ RUIZ

CODIRECTOR D. MIGUEL ANDRÉS LÓPEZ HIDALGO

ALUMNO: FERNANDO SÁNCHEZ DE ROJAS RINCÓN

Valencia, a 22 de mayo de 2013

Agradecimientos

Quisiera aprovechar la ocasión para felicitar a todos los que me han apoyado en esta tarea. En gran medida a mis padres sin ellos esto no hubiera sido posible, ni tan llevadero, gracias por darme el apoyo necesario que necesitaba. A mi hermano por haberme ayudado en el proyecto y en lo que necesitaba. También quiero agradecer a todos mis abuelos y abuelas porque siempre han estado muy orgullosos de mi trabajo.

A mis primos, por hacerme ver que este campo es más interesante de lo que pensaba y siempre he contado con su apoyo.

No quisiera olvidarme de mis compañeros de despacho: Miguel Andrés, Luis Miguel, Jaime, Petar, Clément, Andrés. También quiero felicitar a Vicente Dolz por su carácter y sobre todo por haberme dado la oportunidad de participar en este proyecto. A toda la gente del departamento que me ha ayudado como Bernardo Planells, Jose el "torner" del taller, Valentín, Miguel Ortiz, y a toda la gente que he conocido y ha dedicado tiempo en mí, con todos ellos el trabajo ha sido más agradable.

Pero sobre todo a Miguel Andrés que se merece todos mis agradecimientos, ya que él ha sido mi tutor y ha dedicado todos los días necesarios en mi proyecto.

También a mis amigos: Adrián, Edison, Onofre, Sergio, Arán, Juan Andrés que han hecho que este proyecto sea mucho más ameno. Mis agradecimientos van por todos ellos.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO

PROYECTO FIN DE CARRERA



ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO DEL EJE EN TURBO COMPRESORES DE M.C.I.A.

DOCUMENTO 1: MEMORIA DESCRIPTIVA

DOCUMENTO 2: PLIEGO DE CONDICIONES

DOCUMENTO 3: PRESUPUESTO

DIRECTOR: D. VICENTE DOLZ RUIZ

CODIRECTOR D. MIGUEL ANDRÉS LÓPEZ HIDALGO

ALUMNO: FERNANDO SÁNCHEZ DE ROJAS RINCÓN

Valencia, a 22 de mayo de 2013

Contenido

<i>MEMORIA DESCRIPTIVA</i>	15
1 Introducción	21
1.1 Preámbulo	21
1.2 Antecedentes	23
1.3 Objetivo del proyecto	24
1.4 Viabilidad del proyecto	25
1.5 Requisitos del proyecto	26
1.6 Desarrollo del proyecto	28
2 Marco teórico	35
2.1 Sobrealimentación	35
2.1.1 Ventajas de la sobrealimentación	37
2.1.2 Inconvenientes de la sobrealimentación	38
2.1.3 Enfriamiento del aire en la admisión	40
2.1.4 Sistemas de sobrealimentación	42
2.1.5 Problemas en el acople del motor	44
2.1.6 Partes de un turbogrupo	46
2.2 Lubricación	49
2.2.1 Lubricación hidrodinámica	52
2.2.2 Viscosidad del aceite de lubricación	52
2.2.3 Características de los aceites lubricantes	54
2.2.4 Cojinetes con lubricación a presión	55
2.2.5 Refrigeración en el turbogrupo	56
2.3 Dinámica rotacional	58
2.3.1 Objetivos de la dinámica rotacional	59
2.3.2 El modelo masa-resorte	60

2.3.3	Frecuencias síncronas y no-síncronas _____	62
2.3.4	Análisis del rotor <i>Jeffcott</i> _____	64
2.3.5	Significado físico de la solución _____	66
2.3.6	Tres maneras de reducir las amplitudes del giro síncrono _____	67
2.3.7	Definiciones de las velocidades críticas _____	68
2.3.8	Oscilación en la dinámica rotacional _____	69
3	Sala de ensayos _____	75
3.1	Introducción _____	75
3.2	Descripción de la sala climática-altitud _____	75
3.3	Sala de control _____	76
3.3.1	Banco del motor _____	77
3.3.1.1	Bancada del motor _____	77
3.3.1.2	Motor K9K y sus características _____	80
3.3.1.3	Acople de los turbos al motor _____	85
3.3.2	Unidad de control electrónico (E.C.U.) _____	86
3.3.2.1	Modelo _____	87
3.3.2.2	Características de la E.C.U. _____	88
3.4	Laboratorio _____	93
3.5	Variables a medir e instrumentación _____	100
3.5.1	Sensores de desplazamiento del eje (<i>Shaft-Motion</i>) _____	101
3.5.2	Sensores de presión _____	105
3.5.3	Sensores de temperatura _____	107
3.5.4	Sensores para el caudal del aire _____	108
3.5.5	Sensores para el caudal de combustible _____	109
3.5.6	Sensor para el régimen de giro _____	109
3.5.7	Revoluciones del motor _____	110
3.5.8	Régimen instantáneo _____	111

3.6	Control del motor y sistemas de adquisición de datos _____	114
3.6.1	Rack de control del banco de ensayos _____	114
3.6.2	Sistema de control del motor (Inca) _____	115
3.6.3	Sistema de control de parámetros (Samaruc) _____	117
3.6.4	Cadena de medida YokoGawa _____	124
4	Metodología de ensayo _____	135
4.1	Introducción _____	135
4.2	Técnica de medida _____	135
4.3	Rutinas _____	139
4.4	Material para ensayar _____	141
4.5	Tareas en el laboratorio _____	143
4.5.1	Calibración de los sensores de proximidad _____	144
4.5.2	Calculo de la máxima excentricidad _____	150
4.6	Tareas en el ensayo _____	155
4.7	Procesado de datos _____	160
4.7.1	Ficheros de entrada _____	161
4.7.2	Ficheros de salida _____	163
4.8	Recomendaciones _____	167
5	Ensayos realizados _____	173
5.1	Turbos ensayados _____	173
5.1.1	Ensayo con el F9Q 134 _____	173
5.1.2	Ensayo con el F9Q 138 _____	173
5.1.3	Ensayo con el D4FT MB2 _____	174
5.1.4	Ensayo con el Garret GT17 _____	174
5.2	Resultados _____	175
5.2.1	Resultados en estacionarios _____	175
5.2.1.1	Picos de frecuencia _____	175

5.2.1.2	Detalles de las orbitas _____	177
5.2.1.3	Evolución de la dimensionalidad _____	179
5.2.1.4	Variación de la posición centro de la órbita _____	180
5.2.2	Resultados en transitorios. _____	182
5.2.2.1	Evolución de la orbita _____	182
5.2.2.2	<i>Diameter y dimensionless</i> _____	186
5.2.3	Turbo GT17 _____	189
6	Conclusiones _____	197
6.1	Conclusiones de la metodología _____	197
6.2	Conclusiones de los ensayos _____	197
6.3	Trabajos futuros _____	198
6.4	Valoración personal _____	199
	<i>PLIEGO DE CONDICIONES</i> _____	201
1	Condiciones de uso _____	207
1.1	Introducción _____	207
1.2	Objeto del pliego de condiciones _____	207
1.2.1	Accesibilidad de los elementos _____	207
1.2.2	Repetitividad _____	208
1.2.3	Fiabilidad _____	208
1.2.4	Seguridad _____	209
1.2.5	Mantenimiento _____	209
1.2.6	Precisión _____	209
1.2.7	Controlabilidad _____	210
1.3	Condiciones generales _____	211
1.3.1	Funciones a desarrollar por el técnico de laboratorio _____	211
1.3.2	Funciones a desarrollar por el ingeniero en el laboratorio _____	212

1.3.3	Funciones a desarrollar por el ingeniero en el proyecto _____	213
1.4	Condiciones particulares _____	214
1.4.1	Validez de los ensayos _____	214
1.4.2	Integridad de los equipos _____	215
1.5	Condiciones técnicas _____	217
1.5.1	Condiciones de la sala de ensayo _____	217
1.5.1.1	Dimensiones _____	217
1.5.1.2	Accesibilidad _____	218
1.5.1.3	Ventilación y sistema de extracción de gases _____	219
1.5.1.4	Aislamiento térmico _____	220
1.5.1.5	Aislamiento acústico _____	220
1.5.1.6	Condiciones de hermeticidad de la sala _____	221
1.5.1.7	Iluminación _____	221
1.5.1.8	Protección eléctrica _____	221
1.5.1.9	Almacenamiento y suministro de combustible _____	222
1.5.1.10	Vibraciones _____	222
1.5.1.11	Otros requisitos _____	222
1.5.2	Calibración del instrumental _____	223
1.5.2.1	Tarado de los sensores de temperatura _____	223
1.5.2.2	Tarado de los caudalímetro de aire _____	223
1.5.2.3	Tarado de los transductores de presión media _____	224
1.5.2.4	Tarado de los sensores de proximidad _____	225
2	Condiciones de seguridad _____	231
2.1	Introducción _____	231
2.2	Normativa sobre protección auditiva _____	231
2.2.1	Artículo 1 _____	232
2.2.2	Artículo 2 _____	232

2.2.3	Artículo 3	233
2.2.4	Artículo 4	234
2.2.5	Artículo 5	234
2.2.6	Artículo 6	235
2.2.7	Artículo 7	235
2.2.8	Artículo 8	236
2.2.9	Artículo 9	237
2.2.10	Artículo 10	239
2.3	Recomendaciones S.A.E.	240
2.4	Ordenanzas generales de seguridad e higiene	242
2.4.1	Artículo 1: Obligaciones y derechos de los trabajadores	242
2.4.2	Artículo 2: Seguridad estructural	243
2.4.3	Artículo 3: Superficies y cubicación	243
2.4.4	Artículo 4: Suelos, techos y paredes	244
2.4.5	Artículo 5: Disposiciones generales	244
2.4.6	Artículo 6: Iluminación de emergencia	245
2.4.7	Artículo 7: Ventilación, temperatura y humedad	245
2.4.8	Artículo 8: Ruidos, vibraciones y trepidaciones	246
2.4.9	Artículo 9: Protección contra contactos en equipos eléctricos	247
2.4.10	Artículo 10: Electricidad estática	249
2.4.11	Artículo 11: Recomendaciones sobre materias inflamables	249
2.4.12	Artículo 12: Prevención y extinción de incendios	251
2.4.13	Artículo 15: Mecanismos de fricción	252
2.4.14	Artículo 16: Protecciones	253
2.5	Condiciones a cumplir por la sala	254
2.6	Normas para los operadores	255
2.7	Condiciones de la instalación del motor	256

Anexos	259
Programa en MatLab	259
Imágenes	268
Tablas	272
Bibliografía	273
Libros	273
Normativa	273
Consultas en Internet	274
<i>PRESUPUESTO</i>	275
1 Presupuesto	279
1.1 Introducción	279
1.2 Presupuestos parciales	280
1.2.1 Material de oficina	280
1.2.2 Coste de la mano de obra	281
1.2.3 Elementos fungibles	282
1.2.4 Material amortizable	283
1.3 Presupuestos global	286

DOCUMENTO 1

MEMORIA DESCRIPTIVA



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Contenido

1	Introducción	21
1.1	Preámbulo	21
1.2	Antecedentes	23
1.3	Objetivo del proyecto	24
1.4	Viabilidad del proyecto	25
1.5	Requisitos del proyecto	26
1.6	Desarrollo del proyecto	28

1 Introducción

1.1 Preámbulo

El proyecto ha sido realizado en el Centro de Motores Térmicos (C.M.T.) perteneciente a *Universitat Politècnica de València* (U.P.V.) mediante la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño (E.T.S.I.D.). El departamento se encuentra ubicado en el campus universitario de Vera, junto a la avenida *Els Tarongers*, más concretamente en el edificio 6D que podemos observar en la Imagen 1.1, aunque también cuenta con más instalaciones dentro de la universidad, como puedan ser el edificio 5K y el edificio 8P.



Imagen 1.1 Edificio 6D Departamento de máquinas y motores térmicos

En el departamento, aparte de la docencia en la universidad, se está trabajando en las siguientes ramas de investigación:

- Inyección/Combustión. En ella se investigan los procesos de inyección y combustión en motores de inyección directa Diésel. Se persigue la comprensión de los fenómenos físicos y sus efectos sobre las emisiones contaminantes, con la finalidad de mejorar el rendimiento y su desarrollo.
- Renovación de la carga. Se desarrollan trabajos encaminados a reducir las partículas contaminantes de los gases de escape y aumentar las prestaciones de los motores a partir de la optimización de los procesos de carga (admisión) y descarga (escape).
- Ruido. Esta parte de investigación tiene cada vez más importancia en M.C.I.A., consiste en alcanzar grupos motrices menos agresivos con el entorno en términos acústicos, la reducción del ruido generado es un objetivo a cumplir.
- Gestión térmica. En este apartado de investigación, comprobaremos como afectan los flujos de calor al funcionamiento del motor. Mediante las mediciones en la transferencia de calor y análisis de los resultados, mejoraremos el comportamiento en determinadas ocasiones como arranque en frío o sobrecalentamiento de motores.
- Mantenimiento. Esta rama de desarrollo tiene el objetivo de desarrollar todo tipo de planes de mantenimiento, para detectar las áreas de posibles áreas de mejora. También se lleva a cabo el mejoramiento de las técnicas de análisis para prevenir los posibles fallos del motor.

El presente proyecto está englobado dentro de la segunda línea de trabajo descrita, en la Renovación de la carga, ya que estaremos trabajando sobre el comportamiento de los turbocompresores.

Los trabajos que lleva a cabo el departamento, se realizan mediante convenios y asociaciones que se establecen con empresas. Estas empresas se dedican a la industria de la automoción, empresas relacionadas con sectores de energía y/o industrias del transporte. El departamento ha trabajado con las siguientes firmas, como: VOLVO, GENERAL MOTORS, VALEO, RENAULT, REPSOL, VOSSLOH, etcétera. Toda esta labor que realiza la C.M.T. hace ver que tiene múltiples características como la enseñanza, la investigación, la innovación tecnológica y el desarrollo.

Para llevar a cabo un trabajo preciso, eficiente y de primer nivel, algunas empresas suministran motores de última generación y todo tipo de elementos innovadores, así como todo lo necesario para el trabajo. Por su parte, el C.M.T. utiliza maquinaria y aparatos de medida de alta tecnología, que garantizan la fiabilidad de los estudios e informes que se realizan en él.

1.2 Antecedentes

Prácticamente la totalidad de los motores diésel de automoción desarrollados en la actualidad, son sobrealimentados mediante turbogrupos. Es por ello que se hace necesario el desarrollo de herramientas versátiles y fiables que permitan profundizar en el conocimiento de los procesos físicos que ocurren en estas turbomáquinas.

Los fabricantes de turbogrupos invierten muchos recursos en estudiar los defectos de su producto, de ahí la aparición de una gran cantidad de técnicas experimentales con la finalidad de detectar y predecir fallos en este tipo de turbomáquinas. Es de especial importancia como esta parte del motor ha generado un aumento del rendimiento sin apenas inconvenientes, y como ha sido implantada en la actualidad por casi todos los motores en automoción.

En la actualidad se requieren motores de tamaño más reducido y más exigidos que requieren de una mecánica más ajustada, aunque garantizando la fiabilidad, lo que conlleva a realizar continuas mejoras en el diseño de turbogrupos. Los fallos más investigados son los ocurridos por falta de

lubricación, abrasivos en el aceite, temperaturas altas de escape y objetos extraños, que alteran el funcionamiento.

En el presente proyecto se analizarán como varía el movimiento del eje, en distintas situaciones. Dicho proyecto empezó a hacerse con una empresa francesa de automóviles.

1.3 Objetivo del proyecto

El objetivo de este proyecto, es analizar el movimiento del eje del turbocompresor. A lo largo del proyecto se presentan las actividades desarrolladas para realizar los ensayos de medida del movimiento del eje y el análisis de los resultados. La finalidad es medir el movimiento del eje y observar cómo es su comportamiento y cuál es el límite de funcionamiento de los turbogrupos.

Con los ensayos realizados se pretende obtener la mayor cantidad de información sobre el comportamiento del eje en diferentes condiciones de funcionamiento. Mediante los datos medidos se analizan diferentes parámetros acerca del movimiento del eje: semieje de la elipse, perímetro, desplazamiento del eje, centro de la órbita, máxima excentricidad, entre otros. También se recogerán variables termodinámicas como presiones, temperaturas y medidas de régimen de giro del eje para su posterior procesamiento. Todos los datos anteriormente mencionados, habrán de ser procesados mediante un programa de cálculo matemático, en el caso que nos ocupa será MatLab.

Para la medida del movimiento del eje se colocarán dos sensores infrarrojos o inductivos, dichos sensores medirán sobre una tuerca cilíndrica puesta sobre la punta del eje en lado del compresor o sobre la misma rueda del compresor. Dicha tuerca se utiliza para tener una superficie de referencia sobre la que tomar las medidas de los sensores con mayor calidad.

En los ensayos recrearemos distintas situaciones, falta de lubricación, pérdida de un alabe en la turbina, eje del turbo sin equilibrar, reducción en el

área de salida del aire en el compresor. Todas estas situaciones nos harán tener una idea más clara del comportamiento del turbocompresor.

1.4 Viabilidad del proyecto

La viabilidad del proyecto se fundamenta en tres aspectos: recursos tecnológicos, económicos y humanos. Tendremos en cuenta lo siguiente:

- El personal del C.M.T. posee cualificación y competencia en el ensayo, interpretación, tratamiento de los resultados y modelado de piezas, así como en el montaje e instrumentación de los elementos a ensayar y en el mantenimiento de las salas de ensayo, están avalados por su larga experiencia en multitud de proyectos de investigación realizados por su personal.
- La disposición de equipos y herramientas es fruto de más de 25 años de trabajo en la investigación de los motores térmicos, de la continua inversión en material especializado y de última generación para el estudio de este campo de la ingeniería, así como del material puesto a disposición de los trabajos por las diversas empresas que lo contratan.
- El Departamento de Máquinas y Motores Térmicos dispone de un banco para el ensayo de turbogrupos, así como del *software* y el *hardware* necesarios para la adquisición y el tratamiento de la información.
- El Departamento lleva realizando estudios centrados en turbogrupos desde hace tiempo, por lo que tienen amplia experiencia y conocimientos suficientes trabajando con turbogrupos.
- El Departamento, mediante sus propios recursos económicos puede realizar dicha tarea, y adquirir lo que sea requerido para este fin.

Con todo lo mencionado, se puede concluir que el presente proyecto es perfectamente viable.

1.5 Requisitos del proyecto

En nuestra labor necesitaremos cumplir una serie de requisitos y condiciones para garantizar la autenticidad y control de los resultados:

- Seguridad. Los motores térmicos son máquinas que funcionan a altas revoluciones y con combustible inflamable, donde además sus elementos auxiliares giran también a alta velocidad. Esto conlleva un factor de riesgo laboral a considerar. Por ello, y con el fin de conseguir mayor seguridad, todas las piezas móviles deben ser protegidas mediante carcasas que impidan el contacto accidental. Además, se debe automatizar totalmente la instalación de modo que todos los elementos podrán accionarse desde el exterior de la sala mediante control eléctrico o neumático, no haciendo falta la entrada del técnico a la sala mientras el motor está en funcionamiento. No obstante, si en algún caso surgiese la necesidad de entrar, deberá hacerse utilizando la vestimenta apropiada como son: botas protectoras con suela antideslizante, guantes y chaqueta. Todas las operaciones, así como la comprobación del comportamiento del motor son vigiladas a través de la ventana, especialmente preparada, que posee la sala de ensayos.
- Precisión. Para obtener un grado elevado de precisión que influya en unos resultados satisfactorios, debe cuidarse la elección y montaje de los distintos equipos de medida, y revisarse cuidadosamente toda la documentación que acompaña a los mismos. A la hora de utilizar equipos de medida deberán de estar correctamente calibrados para su uso y deberán ser lo más apropiados a la utilización en la que se quiera emplear.
- Controlabilidad. No sólo es importante en todo momento conocer el valor y la situación de los distintos parámetros por medio de la instrumentación necesaria, sino que además, es necesario tener un control sobre las variables que intervienen en el ensayo, todo esto es posible gracias a la regulación por medio del equipo de instrumentación empleado.

- Repetitividad. Es la fidelidad de los valores obtenidos de una misma magnitud física medidos bajo idénticas condiciones experimentales, esperando que las medidas sean similares. Se deberá cerciorarse que los datos obtenidos deberán ser similares en las mismas condiciones, ya que en caso contrario no tendrá ninguna validez nuestro ensayo, y no podrá ser dado por bueno.
- Fiabilidad. Debido a los ensayos que se realizarán en el presente proyecto, es necesario que el diseño de todos los elementos que intervienen sean altamente fiables y seguros. De lo contrario, cualquier sustitución o cambio posterior en la instalación podrían variar las medidas y verse afectados los resultados.

Todas estas consideraciones en un futuro, si se desease, podrían ser acreditadas por alguna normativa I.S.O. o similares, y mejorar cada vez las condiciones necesarias para futuras tareas o ensayos.

1.6 Desarrollo del proyecto

El proyecto se ha fragmentado en diferentes partes. El proyecto se ha dividido en tres documentos que componen dicho proyecto, que está formado por: Memoria descriptiva, Pliego de condiciones y Presupuesto. A su vez estos documentos constan de capítulos y estos a su vez están formados por apartados. El proyecto se compone de los documentos pero también de archivos adicionales como puedan ser: índice, agradecimientos, anexos bibliografía.

- El primer documento es la memoria descriptiva, que está constituida a su vez por cinco capítulos:
 - La introducción: donde se detalla la temática que rodea al proyecto, así como los motivos que han llevado a su realización.
 - Un marco teórico, donde se explica la sobrealimentación y cómo funcionan los turbocompresores, después se presenta los fundamentos teóricos de la lubricación y luego la teoría de la dinámica rotacional.
 - Descripción de la sala en la que se realizarán los ensayos explicando los sensores y los equipos de medida, así como el motor.
 - Metodología de los ensayos y análisis de movimiento: en este capítulo se presenta la metodología empleada en los ensayos y la forma de procesar los datos que se obtienen de los sensores que miden el movimiento del eje, así como todas las tareas necesarias para realizar los ensayos correctamente.
 - Ensayos y resultados: en este capítulo se enumeran los ensayos que se han realizado y se presentan los resultados del análisis del movimiento del eje.
 - Las conclusiones que se han extraído, de todos los resultados obtenidos, y posibles trabajos futuros.

- El segundo documento es el pliego de condiciones donde se detallan las condiciones de uso, de seguridad, higiene, y se marcan las pautas a cumplir para el ensayo en este tipo de instalaciones.
- El tercer documento es el presupuesto, que detalla el coste que supone la realización de este proyecto, se estudian los costes asociados de su realización, los recursos humanos materiales y costes varios, que han intervenido. Se realizarán tanto los presupuestos parciales como el global.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

Contenido

2	Marco teórico	35
2.1	Sobrealimentación	35
2.1.1	Ventajas de la sobrealimentación	37
2.1.2	Inconvenientes de la sobrealimentación	38
2.1.3	Enfriamiento del aire en la admisión	40
2.1.4	Sistemas de sobrealimentación	42
2.1.5	Problemas en el acople del motor	44
2.1.6	Partes de un turbogruppo	46
2.2	Lubricación	49
2.2.1	Lubricación hidrodinámica	52
2.2.2	Viscosidad del aceite de lubricación	52
2.2.3	Características de los aceites lubricantes	54
2.2.4	Cojinetes con lubricación a presión	55
2.2.5	Refrigeración en el turbogruppo	56
2.3	Dinámica rotacional	58
2.3.1	Objetivos de la dinámica rotacional	59
2.3.2	El modelo masa-resorte	60
2.3.3	Frecuencias síncronas y no-síncronas	62
2.3.4	Análisis del rotor <i>Jeffcott</i>	64
2.3.5	Significado físico de la solución	66
2.3.6	Tres maneras de reducir las amplitudes del giro síncrono	67
2.3.7	Definiciones de las velocidades críticas	68
2.3.8	Oscilación en la dinámica rotacional	69

2 Marco teórico

2.1 Sobrealimentación

La sobrealimentación de motores de combustión interna alternativos (M.C.I.A.) consiste en el aumento de la densidad del aire de admisión por medio de un aumento en la presión del aire en el colector de admisión. Este aumento de la densidad a la entrada del motor, permite aumentar el gasto másico de aire que circula a través del motor para una cilindrada determinada. Dicho aumento de presión se consigue mediante un compresor, como se representa en la Imagen 2.1:

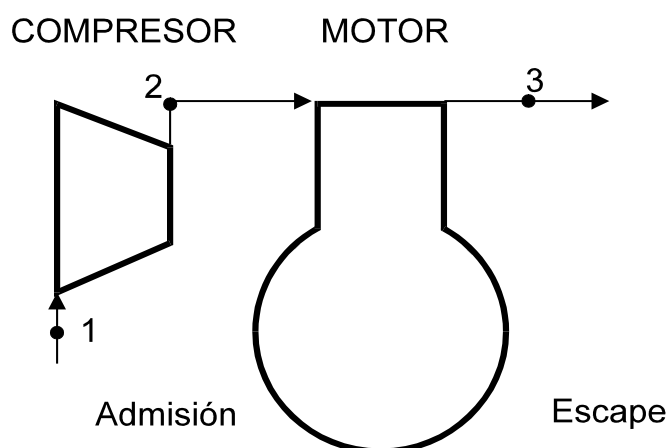


Imagen 2.1 Esquema de un motor sobrealimentado

Este aumento del gasto de aire se puede introducir, tanto en motores de encendido provocado (M.E.P.), como en motores de encendido por compresión (M.E.C.), con un aumento del gasto de combustible que se quema en el motor, proporcional al dosado.

En el caso de los motores M.E.P., al funcionar éstos con un dosado cercano al estequiométrico, el aumento del gasto de combustible es proporcional al de aire. En motores de encendido por compresión (M.E.C.) o motores diesel, la limitación en el gasto de combustible viene dada por la cantidad de aire admitida, ya que el dosado, en este caso, debe mantenerse por debajo de un cierto valor (entre 0'7 y 0'8), evitando así una opacidad excesiva en los humos emitidos.

Considerando que el rendimiento efectivo del motor no se ve afectado, podemos concluir que la sobrealimentación produce un aumento proporcional de la potencia del motor.

Dado que la potencia efectiva de un motor puede expresarse como:

$$W = \frac{\eta_v \cdot V_t \cdot n \cdot \rho_a \cdot i}{\lambda \cdot g_e}$$

2.1

Se comprueba que depende de los siguientes parámetros:

η_v = rendimiento volumétrico

V_t = cilindrada del motor

n = régimen de giro del motor

ρ_a = densidad del aire de aspiración

i = índice del tipo de ciclo (2t o 4t)

λ = inversa del dosado

g_e = consumo específico de combustible

En la ecuación 2.1 se observa que es posible aumentar la potencia recibida por un motor de combustión interna alternativo de varias formas:

- **Aumentar la cilindrada total de motor** (V_t), ya sea aumentando el número de cilindros, o bien la cilindrada unitaria de cada uno de ellos. Esta posibilidad aumenta el costo, el peso y el volumen del motor, y el espacio disponible hoy en día en los automóviles para colocar el motor, es más que reducido.
- **Aumentar el régimen de giro del motor** (n), esta medida repercute en un mayor desgaste por fricción de las piezas móviles y se somete al motor, además, a unas mayores fuerzas de inercia, disminuyendo así la duración y fiabilidad del motor y obligando a buscar materiales de más dureza, resistencia y/o elasticidad.

- **Aumentar la densidad del aire de admisión** (ρ_a) comprimiéndolo antes de entrar en el cilindro. Con este método el resultado que se obtiene es un motor sobrealimentado. Hoy en día ésta es la mejor solución, ya que es la solución más económica, fiable y rentable constructivamente hablando, con el fin de aumentar de forma sustancial la potencia de un motor.

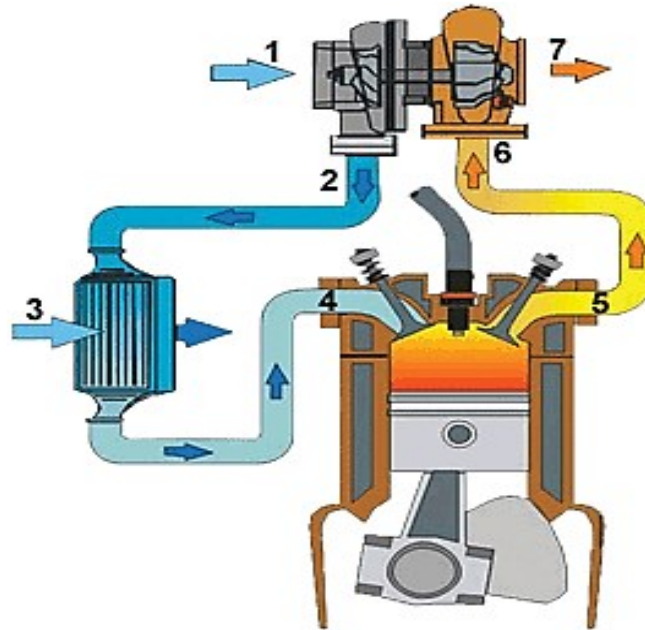


Imagen 2.2 Motor sobrealimentado

2.1.1 Ventajas de la sobrealimentación

En general, podemos afirmar que al sobrealimentar un motor se obtienen las siguientes ventajas:

- El costo por unidad de potencia disminuye, ya que las diferencias entre un motor de aspiración natural y un motor sobrealimentado son pequeñas. Por otra parte, el fabricante puede sobrealimentar uno de sus motores de aspiración natural con lo que obtiene un motor de mayor potencia sin tener que emprender un proyecto totalmente nuevo.
- Si el motor se sobrealimenta aprovechando los gases de escape, el rendimiento del motor mejora, debido a que aprovecha energía que anteriormente se desaprovechaba.

- La sobrealimentación puede conducir en ocasiones a un aumento del rendimiento térmico del motor y la consecuente reducción del consumo específico de combustible, y un aumento de potencia. El aumento del rendimiento térmico del motor conlleva la necesidad de un tamaño del sistema de refrigeración menor que un motor atmosférico de igual potencia.
- Al aumentar la presión de admisión aumenta el área del ciclo ideal diesel en el diagrama p - V , por lo tanto aumenta el trabajo del ciclo, como puede observarse en la Imagen 2.3.

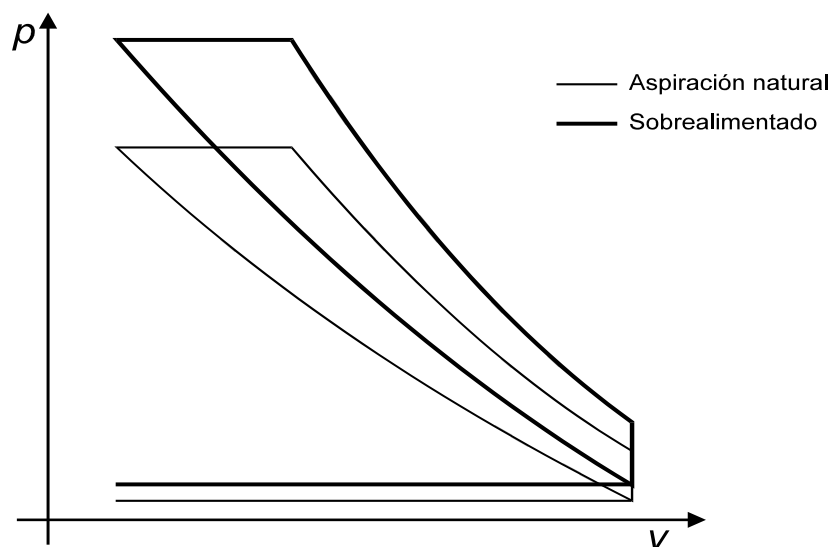


Imagen 2.3 Comparación entre ciclo ideal de un motor de aspiración natural y el correspondiente a un motor sobrealimentado

2.1.2 Inconvenientes de la sobrealimentación

No obstante, también la sobrealimentación en los motores también presenta algunos inconvenientes a tener en cuenta.

- Tensiones mecánicas. En los motores de encendido por compresión (M.E.C.) sobrealimentados, debido a la disminución del tiempo de retraso como consecuencia de la mayor presión y temperatura en el instante de la inyección, la presión máxima de combustión aumenta más lentamente que la presión media efectiva (p.m.e.) al aumentar la presión de sobrealimentación. Éste inconveniente es el más importante de este proceso.

Como se aprecia en la Imagen 2.3, si el motor se sobrealimenta con relaciones de compresión muy altas, la presión máxima puede llegar a ser excesiva, esto se deriva en un aumento de los esfuerzos en la biela, el cigüeñal y sus apoyos. Como posible solución a este problema podemos optar por reducir la relación de compresión volumétrica del motor y refrigerar el aire de admisión después del compresor.

En el caso de los motores de encendido provocado (M.E.P.), las presiones máximas aumentan de forma significativa al sobrealimentar el motor, hecho que conduce a la detonación, por lo que es necesario refrigerar el fluido después del compresor, así como disminuir la relación de compresión del motor.

- Tensiones térmicas. Al sobrealimentar un motor, las tensiones térmicas crecen de forma importante, siendo en general, más críticas que las tensiones mecánicas.

Los motores de encendido por compresión (M.E.C.) son especialmente sensibles a un aumento de la temperatura de admisión, ya que tienen altas relaciones de compresión. Como ejemplo, se puede apreciar que un aumento de la temperatura de admisión de 10°C provoca un aumento de la temperatura final de compresión sin combustión del orden de 20 a 30°C, en función de la relación de compresión de turbo.

Por otra parte, hay que indicar que las tensiones térmicas aumentan con el tamaño del motor, por lo que en los grandes motores sobrealimentados la refrigeración se hace crítica y hay que recurrir a técnicas especiales.

Como posibles soluciones para limitar las cargas térmicas, se puede refrigerar el fluido en la admisión, reducir la relación de compresión volumétrica y, en el caso de los motores de encendido por compresión (M.E.C.), reducir el dosado. También puede aumentarse el cruce de válvulas, para de esta forma barrer los aires residuales con el aire fresco y refrigerar así la cámara de combustión.

2.1.3 Enfriamiento del aire en la admisión

La compresión del aire de admisión lleva consigo, además del consiguiente aumento de presión en el fluido compresible, un aumento de temperatura, ya que el proceso de compresión se acerca al adiabático, pero no es completamente adiabático, debido a que esto es prácticamente inalcanzable conseguir un rendimiento adiabático perfecto.

Esto se traduce en temperaturas de entrada al motor que pueden estar entre los 100 y los 200°C dependiendo del grado de compresión del fluido. Este aumento de temperatura produce una disminución proporcional de la densidad. Para minimizar este problema, en algunos motores sobrealimentados, se emplea un refrigerador del aire de sobrealimentación, que enfría el aire del compresor antes de entrar al motor.

El enfriador utilizado es un intercambiador de calor aire-aire, o bien aire-agua, del tipo carcasa-tubos, llamado comúnmente *intercooler*. Así, el nuevo esquema del sistema de admisión de un motor sobrealimentado sería el representado por la Imagen 2.4.

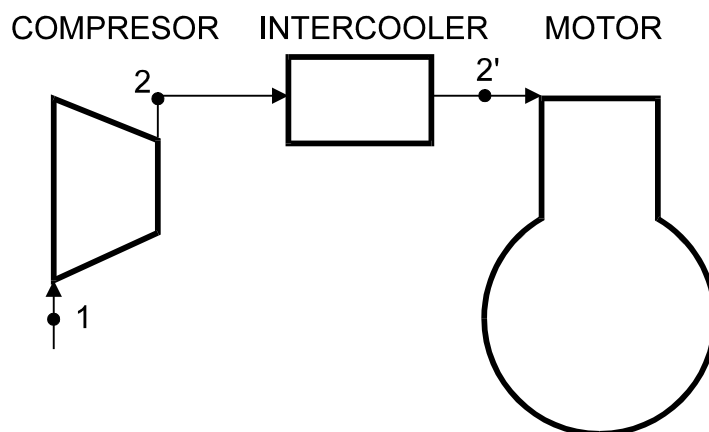


Imagen 2.4 Esquema de un motor sobrealimentado con refrigeración del aire de admisión

El comportamiento del *intercooler* viene dado por su eficiencia, definida como la relación entre el enfriamiento que se produce en el aire de sobrealimentación y el máximo que se podría producir teniendo en cuenta la temperatura ambiente.

Siguiendo la numeración de la expresión:

$$\varepsilon = \frac{T_2 - T_{2'}}{T_2 - T_{amb}}$$

2.2

Es importante destacar que el *intercooler* será más eficiente, cuanto mayor sea la temperatura del aire de sobrealimentación, es decir, cuanto mayor sea la relación de compresión si la consideramos adiabática. Esto conlleva a que en motores en los que la relación de compresión, también llamado grado de sobrealimentación, sea elevada, la eficiencia va a ser alta, por lo que la superficie de intercambio térmico será moderada. Este es el caso de los motores de encendido por compresión (M.E.C.), en los que el uso del *intercooler* se ha generalizado.

En el caso de los motores de encendido provocado (M.E.P.), el grado de sobrealimentación está limitado (por el problema de la detonación), por lo que la eficiencia del *intercooler* será baja y será necesario elevar la superficie de intercambio térmico y por lo tanto, el volumen ocupado. Este problema conduce a que, en la práctica, no se instalen sistemas de enfriamiento del aire de sobrealimentación en este tipo de motores.

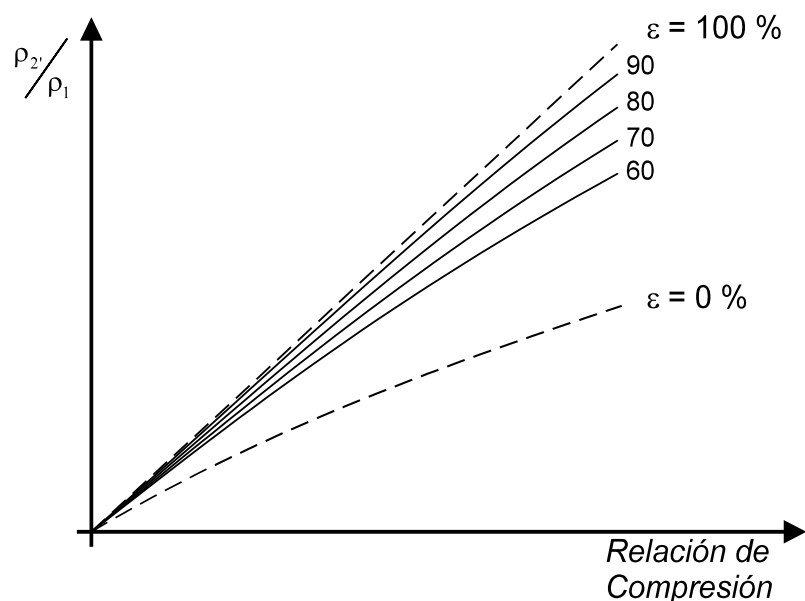


Imagen 2.5 Efecto del enfriamiento del aire de sobrealimentación sobre la densidad de entrada al motor

En la Imagen 2.5 se muestra el efecto del enfriamiento posterior a la compresión en función de la relación de compresión del compresor y de la eficiencia del *intercooler*. Se aprecia que al aumentar el grado de sobrealimentación se hace más adecuado el enfriamiento, ya que puede multiplicar por dos la densidad.

El enfriamiento del aire de sobrealimentación, además de incrementar la densidad del aire entrante al motor, reduce la carga térmica del motor y las emisiones de óxidos de nitrógeno.

2.1.4 Sistemas de sobrealimentación

Existen diversos métodos de sobrealimentar un motor, los más comunes suelen ser los siguientes:

- Turbocompresor

Este sistema de sobrealimentación, el más empleado hoy día, sobre todo en motores diesel, consiste en aprovechar la energía mecánica y térmica de los gases del escape, accionando una turbina unida coaxialmente a un compresor por medio de un eje. Cuando los gases de escape salen del motor, antes de ir al escape, pasan por esta turbina y ejercen una fuerza sobre sus álabes, haciéndola girar más deprisa cuanta más energía tengan.

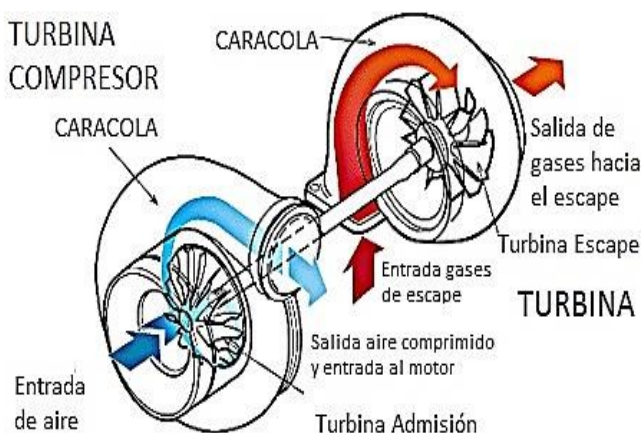


Imagen 2.6 Turbocompresor

Esta energía mecánica de giro adquirida por la turbina es transmitida al compresor, que aspira aire del filtro y lo empuja aprovechando la fuerza centrífuga hacia el colector de admisión. De este modo se obtiene una presión de alimentación superior a la atmosférica. En determinadas circunstancias, se llegan a generar sobrepresiones de 2 bar, en presión absoluta.

La nueva generación de turbos se denominan, turbos de geometría variable (T.G.V.), este sistema varía la posición de los álabes del interior de la caracola del turbo para tener una gran progresividad y de esta manera dar un empuje constante desde bajas revoluciones del motor. Junto a estos turbos se instala una válvula de descarga de sobre presión tarada por el fabricante para que el turbo proporcione el empuje requerido.

- Compresor volumétrico

Es un sistema de sobrealimentación que consiste en un compresor mecánico, que va conectado al cigüeñal a través de un sistema de arrastre mecánico, y gira al mismo tiempo que este. Una de las ventajas de este tipo de compresor es que trabaja ya desde bajas revoluciones del motor. La principal desventaja es que resta par, aunque cuando sube el régimen de vueltas la respuesta es inmediata.

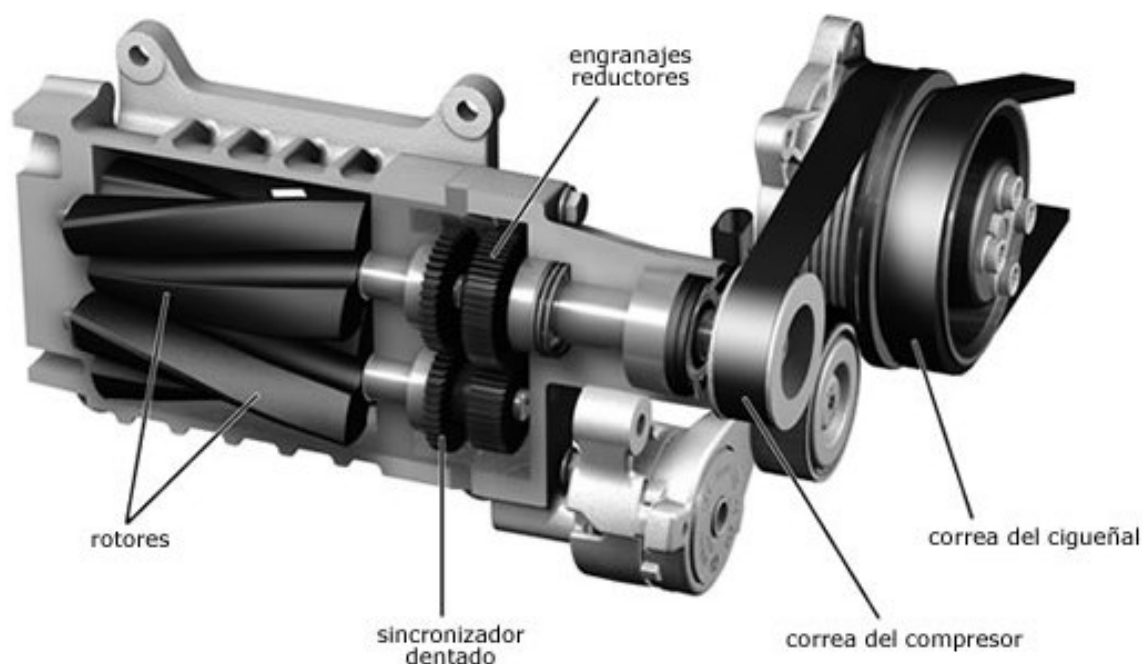


Imagen 2.7 Compresor volumétrico

Otro problema que genera, es que los rozamientos son muy grandes y cuando aumentamos el régimen, los rozamientos son mayores, por lo tanto a mayores revoluciones, mayor pérdida de potencia, con lo cual el máximo rendimiento lo da a regímenes bajos o medios.

- Compresor comprex

Este tipo de compresores recibe el nombre de *comprex*, por la forma de realizar la técnica de funcionamiento cambiador de la onda de presión. Se empezaron a implantar en los vehículos para mejorar las características del turbocompresor en bajas revoluciones del motor. El principio de funcionamiento de estos tipos de compresores se basa en transmitir por contacto directo al aire del colector de admisión los residuos de energía de presión contenidos en los gases de escape por medio de las finas paredes radiales de un tambor que recibe movimiento del cigüeñal del motor, como se puede apreciar en la Imagen 2.8. En este caso, la absorción de potencia del motor es mínima ya que el accionamiento tiene como único objetivo mantener al rotor en movimiento giratorio. La función de compresión la siguen realizando de forma exclusiva los gases de escape.

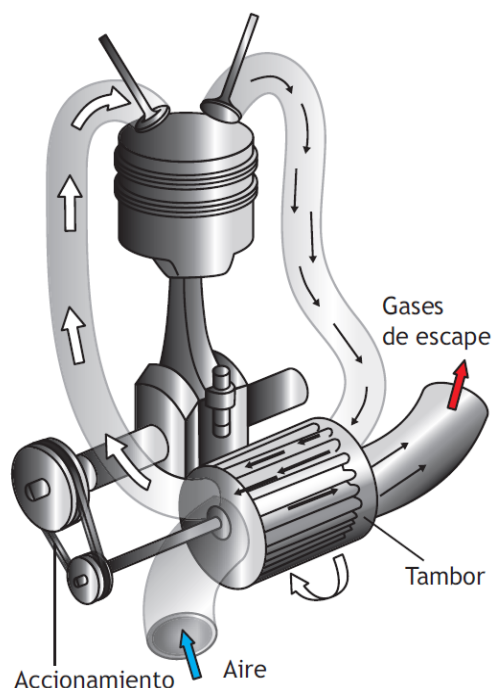


Imagen 2.8 Compresor comprex

En este caso, la absorción de potencia del motor es mínima ya que el accionamiento tiene como único objetivo mantener al rotor en movimiento giratorio. La función de compresión la siguen realizando de forma exclusiva los gases de escape.

Su régimen de funcionamiento máximo está en torno a los 15.000 o 20.000 r.p.m., produciéndose a partir de aquí un descenso notable de su rendimiento.

2.1.5 Problemas en el acople del motor

El acoplamiento de dos máquinas tan diferentes como son el motor alternativo y el turbogrupo plantea muchos problemas. Es ilustrativo relacionar las características de las máquinas que intervienen con espíritu comparativo, lo cual nos da una idea de la problemática que se representa en el acoplamiento. En la Tabla 2.1 se muestran las principales características de ambas máquinas.

Motor de combustión interna alternativo	Turbomáquinas
Gran volumen y pequeña potencia específica	Pequeño volumen y gran potencia específica
Medio / bajo rendimiento como máquina	Alto rendimiento como máquina
Temperaturas instantáneas elevadas	Temperaturas instantáneas bajas
Bajo régimen	Alto régimen
Flujo pulsante	Flujo continuo

Tabla 2.1 Características de ambas máquinas

Al conectar un motor alternativo a una turbomáquina se obtiene un motor mixto. Si se pueden resolver los problemas presentes por tener interconectadas dos máquinas de características diferentes y se puede hacer funcionar y regular cada máquina por separado para obtener el máximo partido en conjunto de cada una de ellas, se pueden conseguir en general buenos resultados de funcionamiento, resultados muchos mejores que los que se obtendrían, por ejemplo, utilizando un motor atmosférico de la misma cilindrada.

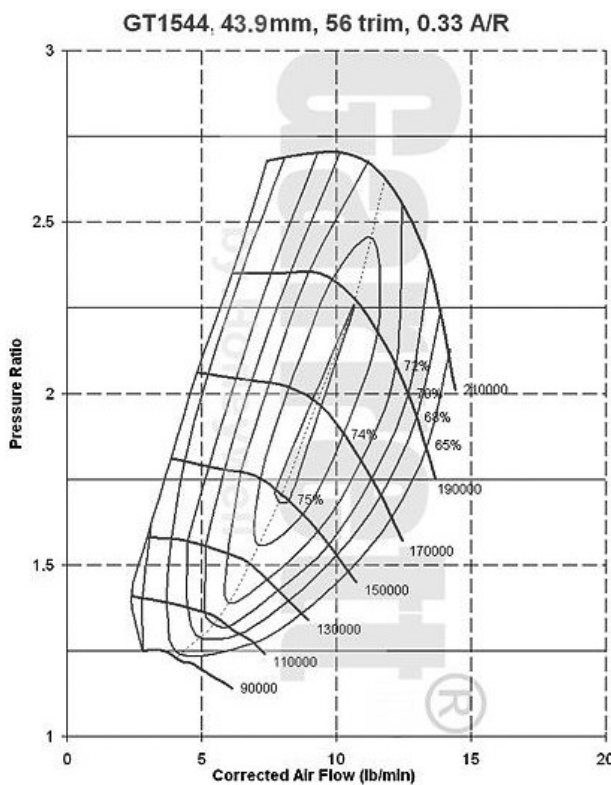


Imagen 2.9 Mapa de funcionamiento de un turbocompresor

Para acoplar el turbo, necesitaremos saber cuál es el rango de funcionamiento que nos interesa utilizar, para ello nos fijaremos en cuáles son sus curvas características tanto de turbina como de compresor. En la Imagen 2.9 observamos dos líneas, las de revoluciones y las de eficiencia del turbogrupo. En eje vertical veremos cuál es la presión de soplado y en el eje horizontal tenemos el gasto másico de aire que puede llegar a proporcionar el compresor.

2.1.6 Partes de un turbogrupo

El turbo suele estar formado por tres partes que son: carcasa de compresor, carcasa de turbina y el *housing*. Además de estos elementos, pueden estar formados por más, como puede ser la válvula de descarga o membrana neumática. En la Imagen 2.10 siguiente veremos dichos elementos.

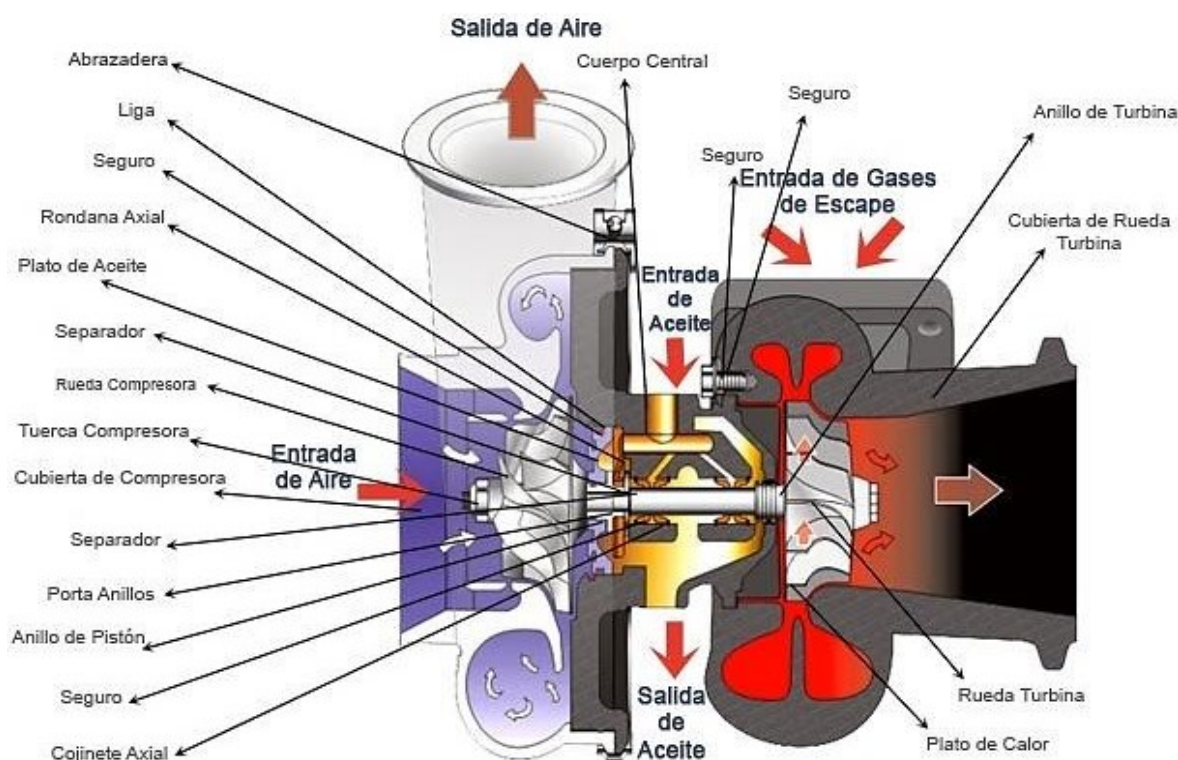


Imagen 2.10 Partes de un turbogrupo

En la Imagen 2.10 por la parte de la izquierda vemos la carcasa del compresor, que tiene un color gris claro, se encarga de conducir los gases hacia el colector de admisión suministrándole una presión adicional debido a la rueda del compresor. La carcasa de la turbina es la que guía los gases provenientes del colector de escape para que hagan rotar la turbina de manera eficiente, aparece de color gris oscuro en la Imagen 2.10.

También observaremos el cuerpo central o *housing*, que es el que contiene el eje de la turbina formado por el eje y las dos ruedas. Se encarga de unir las dos carcasas, permitir el giro del eje, lubricarlo y refrigerarlo. Es la parte

más delicada de las tres. También contiene los cojinetes (o rodamientos de bolas) y el circuito de lubricación.

- Cojinetes radiales

Con un rodamiento de manguito, el eje gira sin fricción sobre una película de aceite contenida en el cilindro de rodamiento. El suministro de lubricante del turbocompresor procede del circuito de aceite del motor. El sistema de rodamientos está diseñado de forma que los casquillos flotantes de latón, que giran a la mitad de la velocidad del eje aproximadamente, queden situados entre la carcasa central fija y el eje giratorio. De este modo dichos rodamientos de alta velocidad pueden adaptarse de forma que no se produzca contacto metálico alguno entre el eje y los rodamientos en ninguno de los puntos de funcionamiento. Además de su función lubricante, la película de aceite en las separaciones de los rodamientos también sirve de amortiguación, contribuyendo así a estabilizar el conjunto de la rueda de la turbina y el eje. Estas separaciones optimiza la capacidad de soporte de carga hidrodinámica y las características de amortiguación de los rodamientos. La selección del espesor del aceite lubricante para las separaciones interiores viene determinado por la resistencia del rodamiento, mientras que las separaciones exteriores se diseñan en función de la amortiguación de los rodamientos. Las separaciones de los rodamientos son de tan solo unas centésimas de milímetro.

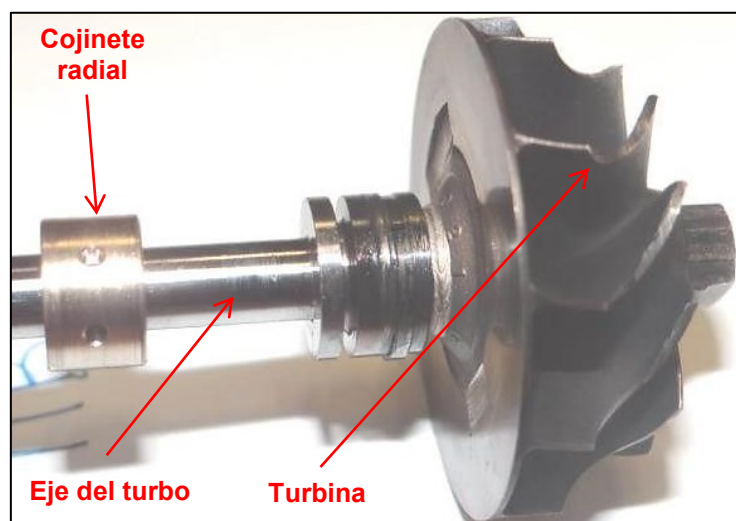


Imagen 2.11 Esquema del cojinete radial

- Cojinetes axiales

Ni los rodamientos de casquillo plenamente flotante ni el sistema de rodamientos de casquillo fijo de una sola pieza soportan fuerzas en dirección axial. Como las fuerzas gaseosas que actúan en dirección axial sobre el compresor y las ruedas de la turbina tienen cargas distintas, el conjunto del eje y la rueda de la turbina se desplaza en dirección axial. El rodamiento axial, rodamiento de superficie deslizante con recubrimientos cónicos, absorbe dichas fuerzas. Dos pequeños discos que se fijan al eje actúan como superficie de contacto. El rodamiento axial se fija en la carcasa central. Una placa deflectora de lubricante evita que éste penetre en la zona de estanqueidad del eje.



Imagen 2.12 Cojinete axial



Imagen 2.13 Posición del cojinete en el eje del turbo

2.2 Lubricación

El rozamiento o dificultad de deslizamiento de una superficie sobre otra se cree que es debido a la interpenetración de las irregularidades de ambas superficies y a la atracción entre los átomos superficiales de los puntos de contacto. A medida que se pulimentan las superficies disminuye el rozamiento debido a la interacción de las asperezas y aumenta el producido por las atracciones superficiales.

Si entre ambas se interpone una película de lubricante el deslizamiento, en lugar de hacerse entre ellas, se produce entre las moléculas de fluido. Entonces la fuerza necesaria para el movimiento resulta incomparablemente menor que para el deslizamiento en seco. El fluido empleado para suavizar el movimiento de dos superficies se denomina lubricante, y al empleo de lubricantes para reducir el movimiento se denomina lubricación. Con la lubricación se logran, además de la reducción del rozamiento, aumentar la estanqueidad entre los órganos con movimiento, eliminar las partículas que aparecen debido al propio funcionamiento, limpiar las paredes de los cilindros de partículas de carbón adherida a ellos procedentes de la combustión, amortiguar los golpes y reducir los ruidos.

La lubricación consiste en interponer entre ambas superficies una película de aceite sobre la que resbalan, la cual, en los motores alternativos, llega a ser en ocasiones tan delgada que su espesor es de tan sólo unas décimas de micra. Esto, que es muy frecuente, permite comprender que el lubricante debe ser de tal calidad que resista las duras condiciones de trabajo de los motores sin que se rompa la película. Para conseguirlo cada motor debe usar un aceite de características adecuadas, por lo que deben seguirse las indicaciones del constructor, al mismo tiempo que usarse aceite de buena calidad y renovarlos con la frecuencia necesaria.

La película de aceite que se interpone reduce las pérdidas de energía, para lo cual se descompone en tres capas, dos de ellas adheridas a las superficies, mientras la capa intermedia hace de cojín hidráulico. Aunque el aceite lubricante absorbe una cierta cantidad de energía, la cual depende de la

fluidez, del espesor de la película y de las características de la superficie enfrentadas, es mucho menor que la que se consumiría por el rozamiento directo entre ambas. No obstante, como la referida energía es absorbida por el aceite, este se calienta y obliga a su refrigeración.

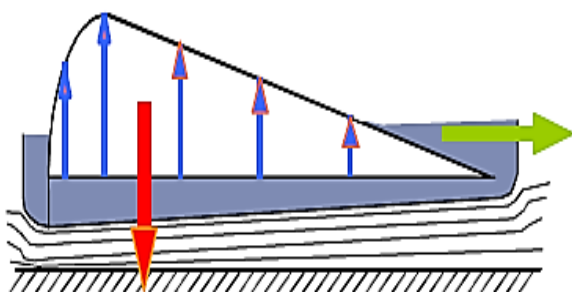


Imagen 2.14 Principio de lubricación

La duración y el buen funcionamiento del motor dependen en gran medida del uso de un aceite apropiado. Reponer el nivel de aceite constituye una buena norma, pero no debe prescindirse de cambiar todo el aceite después del determinado número de horas

de funcionamiento del motor, el cual está establecido por la firma constructora. Puede aumentarse la eficacia de la lubricación añadiendo aditivos especiales al aceite.

La lubricación se produce porque, cuando una superficie se desplaza con respecto a otra manteniéndose un ligero ángulo entre ambas, como indica en la Imagen 2.14, y entre ellas se interpone una película de aceite, este genera un gradiente de presión, capaz de soportar las cargas que actúen sobre las superficies, e impedir que se toquen entre ellas. Si las superficies llegan a estar paralelas o no hay movimiento relativo entre ellas, se anula el gradiente de presión y desaparece la capacidad de soportar las referidas cargas, sin que las superficies entren en contacto.

Este tipo de lubricación se llama lubricación fluida, que se detallará en el apartado 2.2.1. Cuando la velocidad relativa de las superficies o la viscosidad del aceite no son suficientes para producir el gradiente de presión, se denomina lubricación límite.

En el caso de la lubricación fluida, entre las superficies no hay contacto, por lo que el desgaste es nulo y la resistencia al movimiento es originada principalmente por la viscosidad del lubricante, el coeficiente de rozamiento varía entre 0'002 y 0'012, y la capacidad portante supera los $1'23 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$. En el caso de la lubricación límite, el coeficiente de rozamiento varía de 0'012 y

0'1, la capacidad portante es de unos $1'96 \cdot 10^6$ N/m² y, el desgaste en este caso depende de las propiedades del aceite, particularmente de la untuosidad, de los materiales y del acabado de la superficie.

Es conveniente recordar que las superficies no lubricadas tienen un coeficiente de rozamiento superior a 0'1, que la capacidad portante es de menos de $9'81 \cdot 10^5$ N/m² y el desgaste es muy elevado. Los cojinetes del sistema biela-manivela son los que presentan en general mayores problemas de lubricación. En ellos, cuyo esquema se presenta en la siguiente Imagen 2.15, cuando el motor está parado el gradiente de presión del aceite es nulo, y la lubricación es de tipo límite.

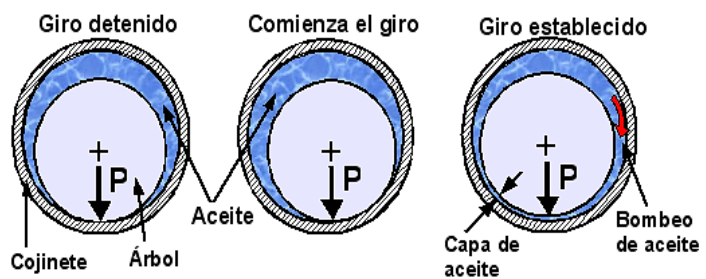


Imagen 2.15 Lubricación de un cojinete

Cuando comienza a girar, debido a la rodadura se produce un cierto arrastre de lubricante, lo que produce un gradiente discontinuo de presión. Cuando la velocidad aumenta se origina un gradiente continuo de presión que soporta la carga sin contacto entre las superficies. En este caso la lubricación es fluida.

Esto explica que, durante el período de arranque, se produce un gran desgaste del motor, por lo que no conviene cargar el motor hasta alcanzar progresivamente la mínima velocidad de giro. El cojinete de un turbocompresor, aunque debido al movimiento no se producen elevados gradientes de presión, puede soportar cargas muy elevadas, ya que el aceite situado entre las superficies es empujado hacia la parte sin carga, lo que le hace adquirir gran capacidad de carga. La lubricación de los engranajes se hace mediante chorro directo, o por inmersión parcial de éstos en el aceite. Es importante evitar que el acierte sea comprimido por los dientes ya que se originan vibraciones y cargas excesivas, con la consiguiente pérdida de potencia.

2.2.1 Lubricación hidrodinámica

La lubricación hidrodinámica es aquella en que las superficies del cojinete que soportan la carga están separadas por una capa de lubricante relativamente gruesa a manera de impedir el contacto entre metal y metal, y en que la estabilidad así obtenida puede explicarse por las leyes de la mecánica de los fluidos. La lubricación hidrodinámica no depende de la introducción del lubricante a presión aunque sí puede hacerse. Sin embargo, si se requiere que haya un abastecimiento adecuado de lubricante en todo momento. La presión en el lubricante la origina la superficie en movimiento, que lo arrastra hacia una zona de forma de cuña a una velocidad suficientemente grande que origine la presión necesaria para separar las superficies actuando contra la carga que obra sobre el cojinete. La lubricación hidrodinámica es llamada también lubricación de película completa (o fluida).

2.2.2 Viscosidad del aceite de lubricación

Los aceites empleados en la lubricación de los motores están sometidos a elevadas temperaturas y presiones, lo cual hace que tiendan a descomponerse, anulando así sus propiedades lubricantes, por tanto, la calidad de estos aceites debe ser muy elevada. Los más usados y que ofrecen características adecuadas son los aceites minerales, obtenidos del petróleo, mezclados con aditivos que mejoran sus cualidades.

La característica más importante de los lubricantes es la viscosidad, la cual se define como la resistencia que opone un líquido a fluir por un conducto. Esta debe ser la adecuada para que cumpla la misión encomendada, hay que si el aceite es muy fluido llenará perfectamente los espacios y holguras entre las piezas en contacto, pero en cambio, debido a su excesiva fluidez, soportará con dificultad las cargas y presiones a que debe estar sometido y no eliminará los ruidos de funcionamiento. Por el contrario, si el aceite es muy viscoso, soportará perfectamente la presión, pero fluirá mal por los conductos de engrase, llenará con dificultad el espacio entre las piezas y la bomba,

necesitará, además, un mayor esfuerzo para su arrastre, obligando a consumir mayor energía al motor y ocasionando un mayor calentamiento de mismo.

Fue Newton, en 1668, quien primero valoró la viscosidad midiendo la fuerza necesaria para hacer girar un cilindro dentro de otro concéntrico con él, sumergidos ambos en aceite. Mediante ensayos descubrió que la fuerza referida es:

- Proporcional a la superficie enfrentada de ambos cilindros.
- Proporcional a la velocidad lineal relativa de los cilindros.
- Inversamente proporcional al espesor de la capa de fluido comprendida entre los dos cilindros.

De los ensayos se estableció la siguiente ecuación con los parámetros definidos en la Imagen 2.16:

$$F = \frac{\nu \cdot S \cdot v}{h}$$

2.3

Donde los parámetros de la ecuación 2.3 son los siguientes:

S = es la superficie deslizante

v = velocidad de deslizamiento

h = espesor de la película lubricante

ν = constante de proporcionalidad de la viscosidad absoluta

Podremos despejar ν , entonces la expresión obtenida sería:

$$\nu = \frac{F \cdot h}{S \cdot v}$$

2.4

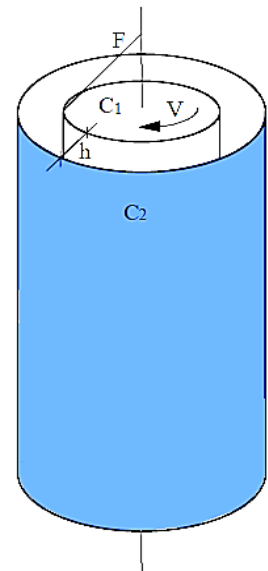


Imagen 2.16 Esquema utilizado por Newton para

La unidad de viscosidad absoluta puede definirse como la viscosidad de un fluido, que opone una resistencia de la unidad de fuerza al desplazamiento de la unidad de superficie plana a la unidad de velocidad con respecto a otra superficie plana colocada a una distancia igual a la unidad de longitud. Esta unidad de viscosidad absoluta se denomina Pascal-segundo (Pa·s). Se denomina viscosidad relativa a la relación entre la viscosidad absoluta y la densidad del fluido, esta fórmula está definida por la ecuación 2.5:

$$\mu_{rel} = \frac{\mu_{abs}}{\rho}$$

2.5

2.2.3 Características de los aceites lubricantes

Existen múltiples parámetros que definen el aceite, aquí solo están enumerados algunos de ellos:

- Untuosidad. Esta propiedad se define como la capacidad que poseen los aceites de adherirse a las superficies que impregnan. Para aumentarla se añaden como aditivos pequeñas proporciones de aceites de ballena, de palma y de colza. La untuosidad no se cuantifica pues no existen aparatos normalizados que permitan medirla.
- Punto de inflamación. Se conoce como punto de inflamación en los aceites la temperatura mínima a la que se inflaman sus vapores en contacto con un punto incandescente. Los aceites utilizados en la lubricación, actualmente soportan temperaturas hasta los 240°C.
- Capacidad detergente. En los motores se producen gran cantidad de residuos que se aglomeran y producen mal funcionamiento y rápido desgaste. Para evitarlo se añade a los aceites productos detergentes, que los mantienen en suspensión sin que se aglomeren.

- Capacidad antiespumante. La formación de espuma consiste en la emulsión de aire en la masa del aceite. Esto es un fenómeno indeseable pues perjudica las buenas cualidades del lubricante. La formación de espuma se evita con la adición de sustancias antiespumantes.
- Índice de viscosidad. Como la viscosidad de los lubricantes disminuye al elevar su temperatura, es necesario conocer esta variación, cuando se han de emplear en máquinas que, como los motores alternativos, trabajan entre un gran rango de temperaturas.
- Estabilidad química. Es la capacidad que tienen los aceites de permanecer inalterables con el tiempo a la oxidación y a la descomposición. Para mejorarla se usan aditivos.
- Punto de congelación. Se llama punto de congelación a la temperatura más baja la cual solidifica un aceite, en España los aceites para motores soportan hasta -20°C .
- Grado de acidez. Se refiere al porcentaje de ácidos libres que contiene un aceite de engrase. Dicho porcentaje no debe exceder del 0,03% para evitar corrosiones.

2.2.4 Cojinetes con lubricación a presión

Cuando la acción hidrodinámica genera tanto calor que el flujo normal de lubricación es insuficiente para eliminarlo del cojinete, se hace necesario proporcionar un suministro adicional de aceite a presión. Para obtener un flujo máximo a través del cojinete y conseguir así el máximo efecto de enfriamiento, es práctica común usar un canal o ranura circunferencial por el medio del cojinete, con un agujero de alimentación para el aceite localizado en la parte opuesta a la zona de carga. En la Imagen 2.17 se ilustra con un cojinete de este tipo.

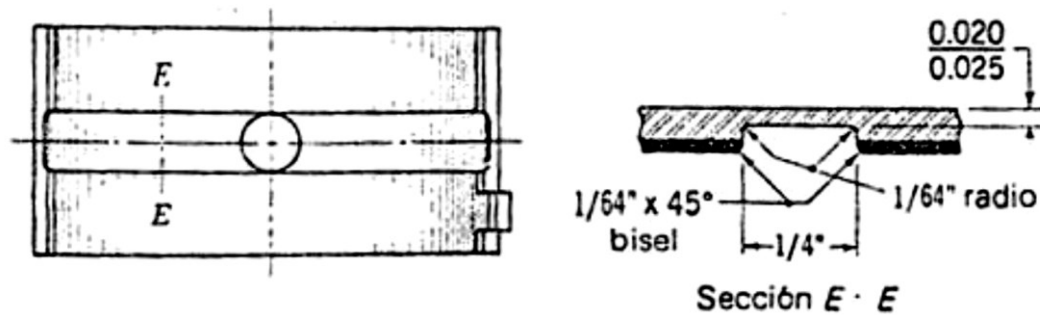


Imagen 2.17 Ranura circunferencial completa, situada en la parte central de un cojinete

El efecto de la ranura es originar una especie de dos medios cojinetes, cada uno con una relación l/d menor que la original. La ranura divide a la curva de distribución de presión en dos lóbulos y reduce así el espesor mínimo de la película, pero este método tiene amplia aceptación entre los ingenieros de lubricación y permite soportar más carga sin que haya sobrecalentamiento.

A fin de establecer un método, para determinar el flujo de lubricante, se supondrá que hay una ranura suficientemente amplia para que la caída de presión en ella sea pequeña. Inicialmente se despreciará la excentricidad y luego se aplicará el factor de corrección para esta condición. Entonces, el flujo de aceite quedará determinado por el volumen que fluya hacia fuera de las dos mitades del cojinete, en la dirección del eje común.

2.2.5 Refrigeración en el turbogrupo

La turbina está impulsada en el caso de motores de encendido por compresión (M.E.C.), por gases que se encuentran entre 800 y 900°C a plena carga por lo que no es difícil encontrar valores tanto en el extremo del rodete y en la voluta, similares a estos valores. Para que esto se de la carga debe ser muy alta y su rendimiento bajo, en los motores de encendido provocado (M.E.C.) estos valores pueden llegar a subir 100 o hasta 200°C más. En la parte central del rodete, las temperaturas se reducen, pero aún así, superaran con creces los valores de 500°C trabajando a plena carga.

La zona del compresor recibe el aire a la temperatura ambiente, pero debido al efecto de compresión y en menor medida por la radiación del conjunto de la turbina, muy cercana, eleva su temperatura por encima de 80°C incluso pudiendo alcanzar en alguna zona los 140°C.

El eje que recibe engrase debe mantener la temperatura del mismo debajo de 200°C, valor a partir del cual el aceite empieza a carbonizarse. Para ello se disponen de pantallas térmicas dentro del equipo compresor, para evitar que el calor pueda pasar fácilmente los distintos elementos que existen el turbogruppo.

La falta de engrase motivado por la parada del motor, con alta temperatura en la turbina, generara una uniformización de las temperaturas en todo el conjunto debido a su pequeño tamaño, por lo que se pueden dar casos de deterioro de los cojinetes por agarrotamiento de los mismos.

Es por ello que la lubricación tiene una función secundaria (aparte de la lubricación), que es la refrigeración. Aunque en ocasiones se dispone de turbos que mantienen el agua de refrigeración en unos valores aceptables, solo con la circulación continúa de aceite en los cojinetes y el aire que recorre las aletas de la carcasa del cárter, mantiene el turbo en unas condiciones óptimas.

Debido a que la lubricación es forzada, a diferencia de la refrigeración por circulación natural. La parada del motor, suprime la lubricación y con ello la refrigeración (en el caso de no existir mediante agua), es muy recomendable que se garantice la refrigeración de las partes del turbo antes de la detención del motor, circular a cargas bajas o medias antes de parar y esperar unos minutos antes de detener el motor, es muy recomendable para el funcionamiento a largo plazo del turbo compresor.

2.3 Dinámica rotacional

La dinámica rotacional es la parte de la física que analiza los comportamientos dinámicos en máquinas rotativas. Recientemente se han incorporado programas informáticos de elementos finitos para el análisis de las vibraciones, además estos programas han sido especificados para este fin.

La densidad potencial que alcanzan las maquinas rotativas es muy elevada. Las turbomáquinas actuales tienen concentrada gran cantidad de energía en un espacio muy reducido, indudablemente, el ejemplo más claro es una turbomáquina que posee la N.A.S.A., que es capaz de alcanzar una potencia de 55.000 kW en el tamaño de un *frisbee*. Una característica de estas máquinas es que permiten altas densidades de potencia y velocidades de flujo que se logra con la velocidad de giro, en relación a otros tipos de máquina de tamaño similar. La mayoría de las aplicaciones de dichas maquinas suelen ser: motores para aviación, motores para locomotoras o para producción eléctrica en centrales.

El reto que presenta el diseño de los flujos aerodinámicos e hidrodinámicos, además del diseño de los alabes o demás requisitos y otros problemas, en ocasiones son pasados por altos. A menudo ocurre que las costosas turbomáquinas son construidas, pero son incapaces de producir su rendimiento nominal o de diseño. Otros problemas que no son considerados en la fase de ingeniería es el uso de la escala en el modelo que se está diseñando, o que no se están modelando los parámetros importantes que influyen en las características de la dinámica rotacional.

Incluso cuando los problemas en la dinámica rotacional son considerados, mediante métodos empíricos e intuitivos, introducirán al ingeniero en una problemática. El análisis de la dinámica rotacional tiene dos características: que sus predicciones son bastante precisas cuando las comparamos en contraposición de las mediciones experimentales (mientras los parámetros sean definidos de manera precisa en el modelo matemático) y sus predicciones son bastante contrarias a la intuición humana.

Dado el potencial de precisión que podemos aprovechar en la dinámica rotacional y la posibilidad de cometer fallos en la intuición, se debe reconocer la utilidad de aprender algunas de sus predicciones matemáticas y familiarizarse con los principales resultados de las investigaciones experimentales.

2.3.1 Objetivos de la dinámica rotacional

En el diseño, la operación y solución de problemas de máquinas rotativas, el análisis de la dinámica rotacional puede ayudar a lograr los siguientes objetivos:

1. Predecir las velocidades críticas. Velocidades en las que la vibración debida al balanceo o el desequilibrio del rotor es máxima, puede ser calculada de los datos del diseño, y evitar usar la máquina en esa situación de funcionamiento.
2. Determinar cómo debe ser diseñado el modelo para cambiar las velocidades críticas. Siempre que los ingenieros de diseño no cumplan exactamente el objetivo o se hace necesario cambiar la velocidad de funcionamiento, las modificaciones del diseño podrían cambiar las velocidades críticas.
3. Predecir las frecuencias naturales de la vibración torsional. Este objetivo se aplica a todo el sistema del tren de potencia entero en el que la máquina es empleada.
4. Calculo del equilibrado de masas y su posición mediante los datos de vibración. Esta capacidad permite equilibrar el rotor para llevar a cabo una reducción en la vibración síncrona.
5. Predecir amplitudes de las vibraciones síncronas causadas por el desequilibrio en el eje. Es una de las tareas más difíciles de conseguir con precisión, desde que el rotor está girando depende de dos factores que son difíciles de medir: la distribución del desequilibrio a lo largo del rotor, y el sistema de amortiguación del rotor en el cojinete.

6. Predecir las frecuencias y el régimen de inicio de vibraciones que producen la inestabilidad dinámica. El objetivo es definir y precisar mejor el modelo matemático, ya que existen fuerzas desestabilizadoras que todavía no son comprendidas suficientemente. Sin embargo, la inestabilidad causada por los cojinetes, puede ser pronosticada con bastante precisión.
7. Determinar las modificaciones del diseño para suprimir las inestabilidades dinámicas. Dicha finalidad se puede conseguir más fácilmente que el objetivo 6, desde que las simulaciones por ordenador, pueden predecir el efecto relativo de la estabilización, incluso si los modelos para las fuerzas de desestabilización son sólo aproximaciones.

2.3.2 El modelo masa-resorte

El modelo más sencillo para el análisis de vibraciones en un eje es una masa rígida montada en un resorte lineal, con un solo grado de libertad. En la ecuación 2.6 podemos calcular cual es la primera velocidad crítica de cualquier sistema de cojinetes, convirtiéndola en revoluciones por minuto la expresión quedaría:

$$N_1 = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

2.6

Donde k es la constante de elasticidad del muelle y m es la masa.

Si el eje es suficientemente rígido en comparación a la película de lubricación del cojinete, podremos decir que la K_B (el coeficiente de rigidez) corresponde a la rigidez que presenta la película de lubricación dentro del cojinete. Por tanto utilizaremos en la fórmula toda la masa del eje, ya que interviene toda ella en desequilibrar el movimiento de rotación, como veremos en la Imagen 2.18a.

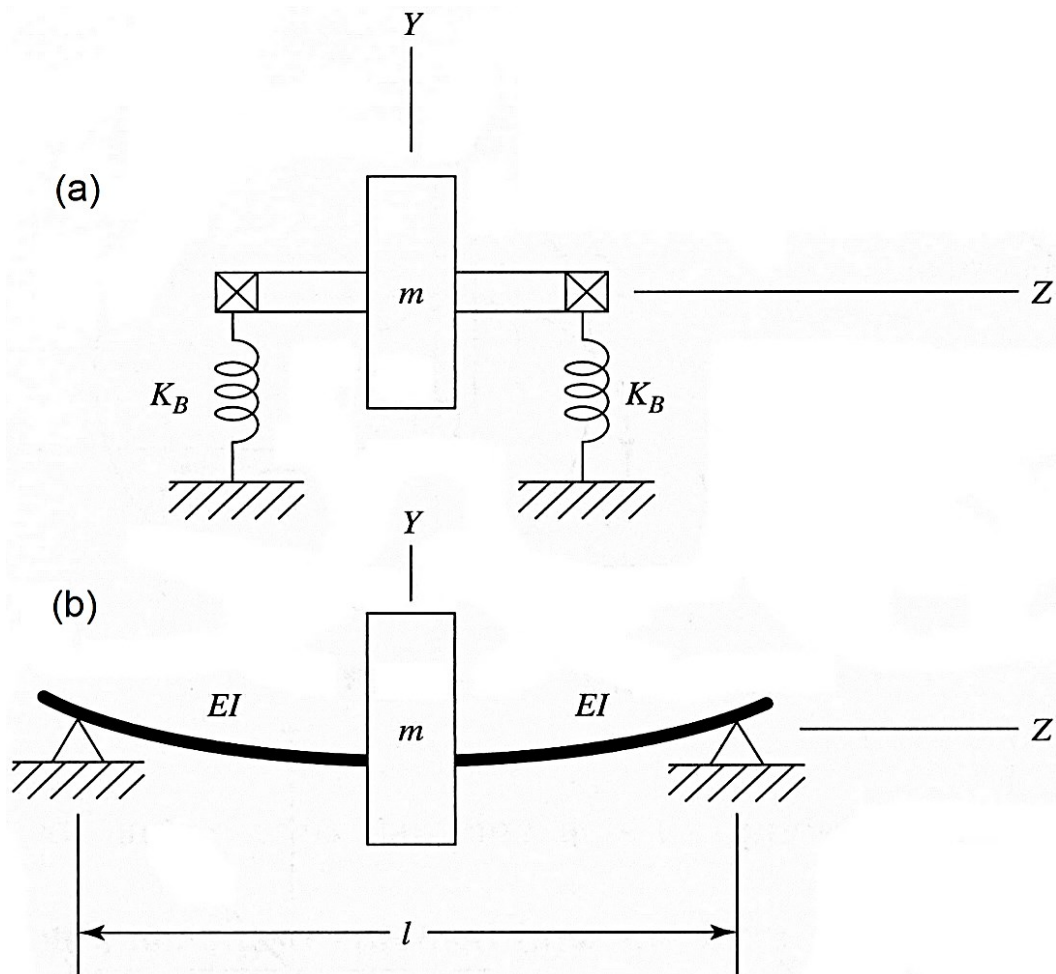


Imagen 2.18 Rotadores rígidos y flexibles vistos como un sistema masa-resorte

Otra hipótesis es que el eje no sea tan rígido en comparación a los apoyos y sufra deformación. En este caso la K_B será igual a la rigidez que tiene el eje, haciendo la suposición de que los apoyos sean rígidos. En esta suposición no podremos utilizar toda la masa del eje, ya que existe parte de la masa que está siendo deformada y que no participa en el movimiento de vibración, y existe masa que genera el desequilibrio, esto se puede ejemplificar en la Imagen 2.18b.

Estos modelos sirven de ayuda para entender las frecuencias naturales, pero tienen serias dificultades para análisis más complejos en la dinámica rotacional. El modelo masa-resorte de un grado de libertad puede ejecutar un movimiento de translación en una dirección, mientras el sistema de cojinetes puede ejecutar orbitas originadas por el giro, que deberían tener un forma compleja y estar influenciados por determinados patrones.

Este fallo puede ser eliminado considerando que el modelo masa-resorte posee dos grados de libertad, permitiéndole vibrar simultáneamente en dos direcciones como puedan ser el eje X y el eje Y. La combinación de vibraciones en dos direcciones ortogonales puede producir diferentes tipos de movimiento de la masa. El tipo del movimiento producido depende de las amplitudes relativas y la relación de fases en x e y. Si la vibración tiene una sola frecuencia, los movimientos producidos son orbitas circulares, orbitas elípticas y rectas.

El modelo con dos grados de libertad que está representado en la Imagen 2.19 fue usado por *Rankine* en 1869 en el primer análisis de la dinámica rotacional, en un intento de explicar el comportamiento crítico en los sistemas de cojinetes. Este modelo consta de una masa rígida girando en una órbita circular con un resorte actuando en dirección radial. Rankine usó la segunda ley de *Newton* incorrectamente en un sistema de coordenadas rotacionales, y predijo que las máquinas rotativas nunca podrían ser capaces de sobrepasar su primera velocidad crítica.

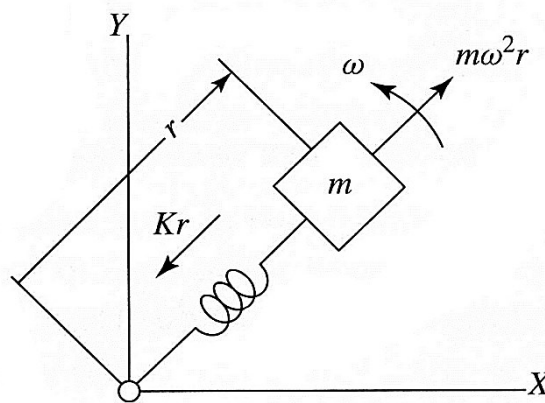


Imagen 2.19 Modelo de Rankine

2.3.3 Frecuencias síncronas y no-síncronas

Las frecuencias constituyen una de las medidas más útiles para el diagnóstico de los problemas en dinámica rotacional. Por ejemplo, un origen común de los movimientos del eje, es el desequilibrio del rotor, y lo produce siempre girando en frecuencia síncrona con la velocidad del eje. Por tanto, las grandes amplitudes de las vibraciones síncronas normalmente indican un problema de desequilibrio. La rotación síncrona excitada por el desequilibrio fue el problema que abordado por el análisis de *Jeffcott*, descrito brevemente y presentado con detalle en el apartado 2.3.4.

Pero no todos los movimientos relacionados con el giro son síncronos, de hecho también existen más problemas que engloban movimientos no-síncronos.

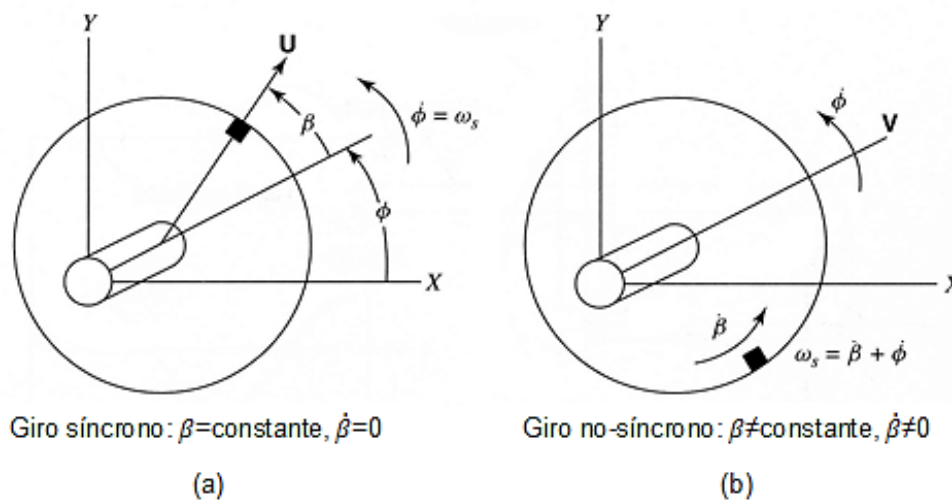


Imagen 2.20 Giro síncrono y no-síncrono

En la Imagen 2.20 se muestra el giro del rotor y describe la diferencia fundamental entre los dos tipos de movimientos. El elemento de color oscuro representa una masa desequilibrada. En la Imagen 2.20a el intervalo de tiempo en el que cambia el ángulo ϕ , es la velocidad de giro. El ángulo β (ángulo entre el desequilibrio del eje y la posición de la masa) permanece constante, por lo que la velocidad de giro (la órbita que describe el eje) y la velocidad del eje son las mismas (giro síncrono). De manera que el desequilibrio \vec{U} conduce al vector de giro del rotor \vec{V} mediante un ángulo constante β . En la Imagen 2.20b el intervalo de tiempo para el que el ángulo β cambie es la velocidad del rotor, relativa al giro rotativo del vector \vec{V} , por eso la velocidad de giro ω_s es la suma de $\dot{\beta}$ y $\dot{\phi}$. La velocidad $\dot{\beta}$ siempre estará variando, por lo que no pueden ser síncronas ambas velocidades, en este caso la velocidad de giro y la velocidad del eje no son las mismas, y no son síncronas. La distinción entre estos dos tipos de movimientos nos proporciona el factor básico para clasificar espectros de frecuencias. Las velocidades críticas y el desequilibrio responde al análisis con el giro síncrono. La inestabilidad en dinámica rotacional está relacionada exclusivamente con los giros no-síncronos.

2.3.4 Análisis del rotor *Jeffcott*

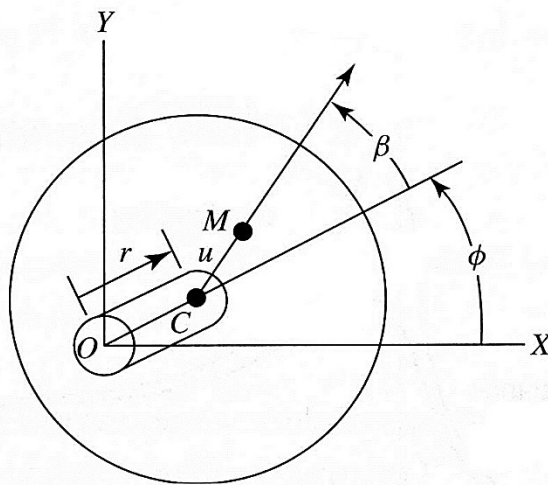


Imagen 2.21 Vista de perfil del rotor *Jeffcott*, con coordenadas

La Imagen 2.21 muestra una vista de perfil del rotor *Jeffcott*, con coordenadas que describen su movimiento. El centro de la masa del disco desequilibrado está en el punto M . En el punto C está ubicado el centro geométrico del disco. Por lo que el vector $u = \overline{CM}$, y la flexión del eje debida a las cargas dinámicas es \overline{OC} , las cargas debidas a la gravedad no serán aplicadas, ya que son

insignificantes comparadas con la inercia de muchas máquinas de alta velocidad.

El eje tiene una rigidez de flexión k (N·m), el disco tiene una masa m (kg), y el rozamiento con el aire del disco y el eje se puede estimar por el coeficiente c (F·s²/m). Este sistema dinámico tiene tres grados de libertad: si asumimos constante la velocidad se reducen a dos grados de libertad. Las coordenadas polares r , ϕ , β poseen una ventaja, proporcionan el giro sincrónico en términos de constantes que son fácilmente interpretadas, pero las ecuaciones del movimiento no lineal, no son adecuadas para el análisis del desequilibrio en la dinámica rotacional. Las coordenadas cartesianas x e y (del centro del eje) para todos los valores del ángulo β , producen ecuaciones lineales diferentes.

Además la solución en términos de x e y , como funciones de tiempo, correlacionan mejor con los desplazamientos por la vibración. Las ecuaciones diferenciales, tanto en coordenadas polares como en coordenadas paramétricas y sus soluciones en ambos tipos de coordenadas son expuestas a continuación:

- Coordenadas polares

$$\ddot{r} + \frac{c}{m} \dot{r} + \left(\frac{k}{m} - \dot{\phi}^2 \right) r = \omega^2 u \cos(\omega t - \phi) \tag{2.7}$$

2.7

$$r \ddot{\phi} + \left(2\dot{r} + \frac{c}{m} r \right) \dot{\phi} = \omega^2 u \sin(\omega t - \phi) \tag{2.8}$$

2.8

La solución para los giros síncronos es:

$$r_s = \frac{\omega^2 u}{\sqrt{\left(\frac{k}{m} - \omega^2 \right)^2 + \left(\frac{c\omega}{m} \right)^2}} \tag{2.9}$$

2.9

$$\omega_s t - \phi_s = \beta_s = \tan^{-1} \left(\frac{c\omega}{m \left(\frac{k}{m} - \omega^2 \right)} \right) \tag{2.10}$$

2.10

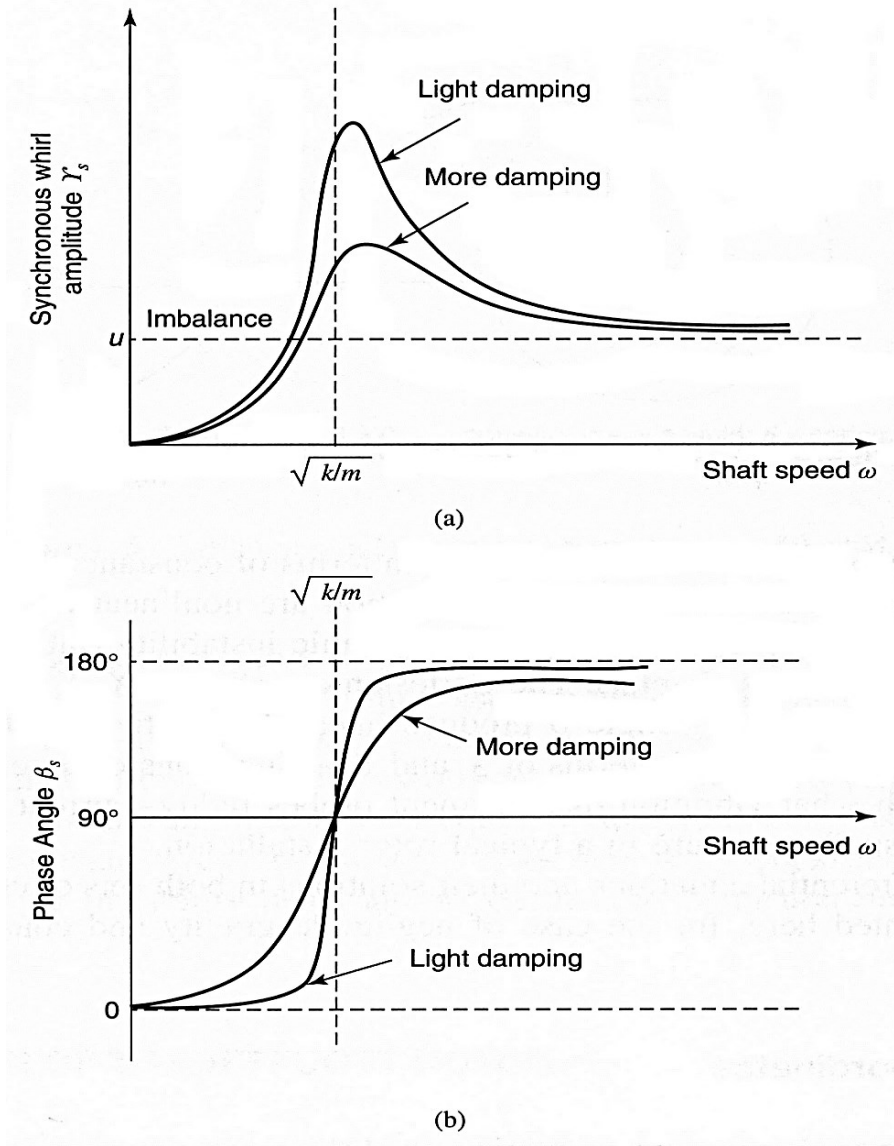


Imagen 2.22 Desequilibrio correspondiente con el rotor Jeffcott (a) amplitud, y (b) fase

- Coordenadas cartesianas

$$m\ddot{X} + c\dot{X} + kX = m\omega^2 u \cos(\omega t)$$

2.11

$$m\ddot{Y} + c\dot{Y} + kY = m\omega^2 u \sin(\omega t)$$

2.12

La solución para los giros síncronos es:

$$X = \frac{\omega^2 u}{\sqrt{\left(\frac{k}{m} - \omega^2\right)^2 + \left(\frac{c\omega}{m}\right)^2}} \cos(\omega t - \beta_s)$$

2.13

$$Y = \frac{\omega^2 u}{\sqrt{\left(\frac{k}{m} - \omega^2\right)^2 + \left(\frac{c\omega}{m}\right)^2}} \sin(\omega t - \beta_s)$$

2.14

$$\beta_s = \tan^{-1} \left(\frac{c\omega}{m \left(\frac{k}{m} - \omega^2 \right)} \right)$$

2.15

2.3.5 Significado físico de la solución

En la Imagen 2.22a se muestra como la amplitud de los giros síncronos aumenta con la velocidad conforme nos vayamos acercando a las velocidades críticas, y disminuye después de atravesar las velocidades críticas y se aproxima al valor del desequilibrio en las velocidades supercríticas. Por tanto, a alta velocidad, la amplitud del giro síncrono puede hacerse arbitrariamente pequeña por el balanceo preciso del rotor. En las velocidades cercanas a la crítica, puede ser visto que el parámetro más importante para reducir la amplitud es la amortiguación. En la Imagen 2.22a nos muestra la definición más útil de lo que es la velocidad crítica: la velocidad a cuyo síncrono corresponde el desequilibrio máximo.

Al observar la Imagen 2.21 veremos en relación con la solución para el ángulo de fase síncrona β_s , que produce una explicación para la aproximación asintótica de la amplitud hacia u . En cuanto la velocidad crítica es superada, el ángulo β_s , pasa los 90° y se aproxima 180° en las velocidades supercríticas.

En la Imagen 2.21 muestra como el ángulo β es el ángulo que genera el desequilibrio en el vector de giro. Por consiguiente, a alta velocidad el centro de la masa m se aproxima al interior de la órbita de giro, y permanece estático, y el centro del eje C y gira alrededor del centro de la masa M . Este fenómeno es llamado la inversión de la velocidad crítica o la inversión del centro de la masa.

2.3.6 Tres maneras de reducir las amplitudes del giro síncrono

Una revisión del análisis del rotor *Jeffcott* nos acercará al problema de minimizar las amplitudes del giro síncrono: (1) equilibrar el rotor, (2) cambiar las velocidades de funcionamiento (aparte de las velocidades críticas), (3) añadir amortiguación al sistema de soporte del rotor. Aunque el rotor *Jeffcott* es un modelo simplificado, estos tres objetivos son efectivos para controlar los giros síncronos de la mayoría de máquinas más complejas. Un criterio adecuado a utilizar depende de las limitaciones prácticas del modelo a analizar.

Evitar el balanceo del rotor es el objetivo principal a conseguir, porque ataca el problema de origen. Sin embargo, debería ser apuntado aquí que en la práctica, un rotor no puede ser equilibrado perfectamente, no importa que método se utilice, ya que el mejor equilibrado posible tenderá a degradarse durante el funcionamiento prolongado.

El segundo objetivo, cambiar el funcionamiento de la maquina en un rango diferente de las velocidades críticas, se puede conseguir mediante el cambio de funcionamiento de la velocidad del eje, o cambiando las propias velocidades críticas. En la práctica, la segunda opción, normalmente es conseguida modificando la rigidez del soporte del rotor, este parámetro no está incluido en el análisis del modelo *Jeffcott*, pero tiene el mismo efecto en las velocidades críticas como en la rigidez del eje k . En general, cambiar las velocidades críticas es más útil para máquinas de velocidades constantes o maquinas con un estrecho intervalo de velocidades de funcionamiento.

Si una velocidad crítica debiese ser repetidamente o lentamente superada, o si la maquina tuviese que trabajar en el rango de velocidades críticas, la forma más efectiva de reducir la amplitud de los giros síncronos es añadir amortiguación. Esto es difícil de aplicar en el rotor *Jeffcott*, ya que la única fuente de amortiguación es la resistencia aerodinámica. Afortunadamente, la mayoría de turbomáquinas tienen soportes con rodamientos flexibles, en los cuales el amortiguamiento puede ser añadido mediante una película de lubricación, en cuyos casos la amortiguación puede ser definida mediante criterios de diseño y necesidades específicas.

La fricción interna de las partes que rotan es una fuente que generan giros subsíncronos auto-excitados, por tanto es conveniente tener una lubricación adecuada que permita una amortiguación suficiente y que evite los rozamientos o fricciones internas.

2.3.7 Definiciones de las velocidades críticas

La definición de las velocidades críticas depende de quién las utilice. Tendremos una idea más global del término si conseguimos entender el uso que se suele aplicar a este término. Una confusión bastante común suele ser que las velocidades críticas son las inestabilidades (el cual es cierto pero solo en el caso de no tener amortiguamiento). A continuación se muestra una serie de definiciones de la velocidad críticas:

1. Si las frecuencias de cualquier componente armónico aplicándole fuerzas periódicas, son iguales o se aproximan a las frecuencias naturales de cualquier vibración del rotor, existirá una condición de resonancia. Si la resonancia existe en una determinada velocidad, esta se llamara velocidad crítica.
2. Momento en el cual las frecuencias síncronas igualan a las frecuencias naturales del rotor. El sistema funcionará en un estado de resonancia y la respuesta del rotor será aumentada si la resonancia no es amortiguada.

3. La velocidad de la maquina cuyas vibraciones ocurren en una magnitud significativa en relación con su vida y necesidades de la aplicación.
4. Velocidades a las cuales el desequilibrio (giros síncronos) es máxima.

2.3.8 Oscilación en la dinámica rotacional

La gran mayoría de problemas encontrados en la dinámica rotacional corresponden con los giros síncronos producidos por el desequilibrio. Las aproximaciones a estos problemas son modestas, incluso si una maquina tiene un sistema de rodamientos es más compleja de los modelos que han sido analizados aquí. La minoría restante de los problemas que implican el giro no-síncrono de la vibración se puede subdividir en tres clasificaciones:

1. Vibraciones supersíncronas debidas a la desalineación (las frecuencias más importantes son dos veces la velocidad del eje).
2. Vibraciones subsíncronas y supersíncronas debidas a la variación cíclica de los parámetros, principalmente causados por pérdida de eficacia en los rodamientos, fricciones con el eje, o coeficientes de fuerza no lineares.
3. Giros del rotor no síncronos que inducen al eje a girar a realizar movimientos no estables, o tienen el potencial para convertirlos en inestables, normalmente cuando una determinada velocidad alcanza un umbral de régimen.

Las soluciones en cuanto a las dos primeras clasificaciones tienen soluciones obvias, aligerar el eje, reforzar la carcasa de rodamientos o los cojinetes, o eliminar la fricción. Los problemas que generan las vibraciones del tercer tipo, no son tan comunes, pero originan fallos bastante caros. Estos problemas tienen problemas imprecisos, escurridizos y el tratamiento es más complicado. Esta es la principal clasificación de los problemas asociados a la dinámica rotacional.

CAPÍTULO 3

SALA DE ENSAYOS

Contenido

3	Sala de ensayos	75
3.1	Introducción	75
3.2	Descripción de la sala climática-altitud	75
3.3	Sala de control	76
3.3.1	Banco del motor	77
3.3.1.1	Bancada del motor	77
3.3.1.2	Motor K9K y sus características	80
3.3.1.3	Acople de los turbos al motor	85
3.3.2	Unidad de control electrónico (E.C.U.)	86
3.3.2.1	Modelo	87
3.3.2.2	Características de la E.C.U.	88
3.4	Laboratorio	93
3.5	Variables a medir e instrumentación	100
3.5.1	Sensores de desplazamiento del eje (<i>Shaft-Motion</i>)	101
3.5.2	Sensores de presión	105
3.5.3	Sensores de temperatura	107
3.5.4	Sensores para el caudal del aire	108
3.5.5	Sensores para el caudal de combustible	109
3.5.6	Sensor para el régimen de giro	109
3.5.7	Revoluciones del motor	110
3.5.8	Régimen instantáneo	111
3.6	Control del motor y sistemas de adquisición de datos	114
3.6.1	<i>Rack</i> de control del banco de ensayos	114
3.6.2	Sistema de control del motor (Inca)	115
3.6.3	Sistema de control de parámetros (Samaruc)	117

3.6.4 Cadena de medida YokoGawa _____ 124

3 Sala de ensayos

3.1 Introducción

En el presente capítulo se detalla la descripción de todo el material que ha intervenido en los ensayos que se han realizado con la finalidad de ver el movimiento del eje: descripción de la sala de ensayos, características del motor utilizado para el funcionamiento del turbo y sensores empleados, y demás elementos. Se explicará también todo lo relacionado con el material colocado para los ensayos y los aparatos que hemos utilizado para recoger las medidas que se han hecho, asimismo se describirá el funcionamiento de dichos aparatos.

3.2 Descripción de la sala climática-altitud

Para poder ejecutar los ensayos requeridos es necesaria la construcción de un recinto que nos permita tener total controlabilidad del ensayo. Los ensayos han sido realizados en la sala climática-altitud del Centro de Motores Térmicos (C.M.T.). Esta sala posee todos los requisitos que necesitamos para tomar las medidas de los ensayos. Esta sala está situada en la planta baja del edificio 6D.

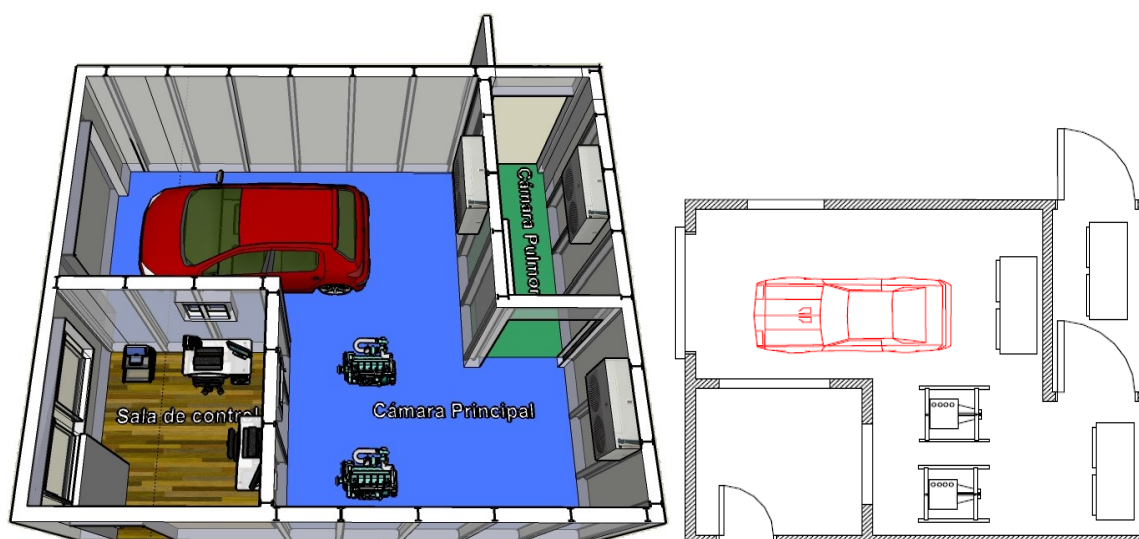


Imagen 3.1 Sala climática-altitud

Esta cámara tiene como característica importante el rango de temperaturas de trabajo, entre -30°C y 10°C , tanto para la cámara principal como para la antecámara o cámara pulmón, hay que tener en cuenta que a bajas temperaturas la cámara funciona bien, pero a -10°C aparecen problemas para poder estabilizar la temperatura desde el panel de control. También dicha cámara es capaz de simular altitud (en torno a 3.000 m) dentro del recinto de trabajo, para ello consta de unas bombas de vacío que hacen posible crear una depresión en el interior del recinto, simulando con ello la altitud deseada.

Durante la realización del presente proyecto la temperatura de trabajo ha sido la temperatura ambiente en el momento de efectuar los ensayos, al igual que la presión ambiente, que ha sido aproximadamente la del nivel del mar. Podemos decir que no hemos necesitado alcanzar bajas temperaturas ni bajas presiones (altitud elevada), puesto que no era nuestro objetivo.

3.3 Sala de control

Se procederá ahora a describir la sala de control. La sala de control está situada anexa a la cámara climática, como se ha podido observar en la Imagen 3.1. Consta de dos ventanas con un doble cristal llamado “cristal de impacto”, el cual es capaz de soportar grandes presiones y además es un gran aislante térmico, minimizando así la pérdida de calor cuando la cámara está operativa, con su consiguiente ahorro energético. Permite a los operarios tener una visión del motor y del interior de la cámara climática mientras se están realizando los ensayos, lo cual es una medida de seguridad añadida al poder controlar en tiempo real qué está sucediendo con el motor dentro de la cámara.

En el interior de la sala de control se encuentran los cuadros de control del sistema de refrigeración de la cámara principal y la cámara pulmón, así como los de control de humedad y de las bombas de vacío, además hay tres equipos informáticos y una cadena de medida Yokogawa, estos sistemas de adquisición serán explicados con mayor detalle más adelante, en el apartado 3.6.

Es en ésta sala donde se sitúan los técnicos para poner en marcha la instalación después de realizar las medidas de control y seguridad pertinentes, como son la inspección visual del motor y las herramientas, esto se realiza antes de cada ensayo para garantizar tanto la seguridad del ensayo como del motor, los operarios y la propia cámara climática. Una vez realizadas las inspecciones de seguridad se pasa a dicha sala para llevar a cabo todos los preparativos informáticos del ensayo, ya que únicamente desde la sala de control se puede encender el motor con el que vamos a realizar los ensayos.

Además, es únicamente desde los equipos informáticos situados en la sala de control desde donde se va a poder controlar y registrar los diferentes parámetros para desarrollar un ensayo válido (Inca, Samaruc y YokoGawa).

3.3.1 Banco del motor

Se presenta una descripción del motor que se va a utilizar para el estudio del movimiento del eje en turbogrupos así como toda la instalación y el montaje necesarios dentro de la cámara climática y en la sala para el montaje del motor y la posterior realización de los ensayos.

3.3.1.1 Bancada del motor

El motor ha de montarse sobre una bancada multifuncional apta para la obtención de los ensayos necesarios para la realización del estudio experimental de este proyecto. Los puntos de anclaje del motor a ésta no son fijos, pudiéndose ajustar el motor espacialmente y de manera sencilla durante su montaje. La bancada se ha aislado del suelo mediante elementos de absorción de vibraciones, los cuales se han seleccionado atendiendo a los esfuerzos transmitidos por el motor durante el proceso de arranque, el régimen y la aceleración a la cual se van a ensayar los diversos turbogrupos. El montaje del motor sobre la bancada ha estado accionado con un embrague adicional en todo momento, ya que nos conviene que el motor no gire solidario con la caja

de cambios del motor, porque queremos eliminar todo los componentes que fuesen innecesarios para generar las velocidades y aceleraciones que vamos a realizar.

La bancada está formada mayoritariamente por perfiles de acero del tipo UPN, y permite el agarre del motor por sus tres puntos de sujeción, el primero situado en la caja de cambios, el segundo en la parte de la correa de distribución y un tercero lateral evitando así cualquier tipo de movimiento. Una gran parte de las vibraciones del motor se absorben por medio de *silentblocks*, los cuales están colocados en cada una de las uniones de nuestro motor K9K con su bancada. En la Tabla 3.1 se da una lista con las características de los distintos perfiles que conforman la bancada.

Perfil	Cantidad	Longitud (mm)	Peso/longitud (kg/m)	Peso parcial (kg)	Peso total (kg)
UPN 100	2	1200	13.4	64.32	195.84
UPN 80	2	1200	13.4	32.16	
UPN 80	4	900	13.4	48.24	
UPN 80	2	1005	13.4	26.93	
UPN 80	1	590	13.4	7.91	
UPN 80	2	505	13.4	13.53	
UPN 80	1	205	13.4	2.75	

Tabla 3.1 Características de los perfiles UPN de la bancada

La bancada esta provista, además, de unos muelles que también absorben las vibraciones que se produzcan durante todo el ensayo. Se han colocado también perfiles “libres” en la bancada del motor, los cuales permiten la movilidad del conjunto en horizontal y en vertical para un mejor ajuste del mismo, y para poder reutilizar la bancada en caso de que el motor tenga que ser sustituido, todo ello pensando en ensayos y proyectos futuros. Los tornillos utilizados son de dureza 8.8 y de métrica 10. Algunos de los perfiles dan la posibilidad de posicionar sobre ellos elementos adicionales, como por ejemplo,

el accionador del embrague, el radiador y la unidad de control electrónico (E.C.U.).

La pintura utilizada es un esmalte metálico liso especial diseñado para soportar temperaturas extremas. Esto evita o retarda en gran medida la oxidación de los perfiles. De no ser así, con el paso del tiempo los perfiles pueden alcanzar la rotura, con los consiguientes riesgos y gastos que esto implicaría.

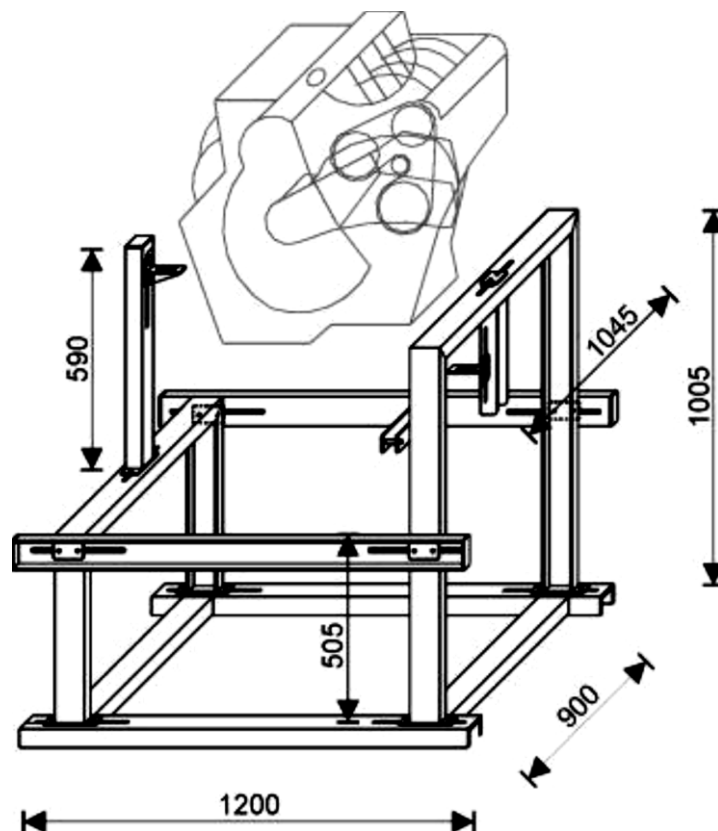


Imagen 3.2 Esquema de la instalación del motor sobre la bancada

El motor utilizado en la cámara climática para los ensayos no lleva acoplado ningún freno, porque intentamos probar a recrear las situaciones que queríamos, y observamos que no era necesario el uso del freno, por lo que no se le acopló. La mayoría de ensayos utilizan un freno para simular distintos estados de carga, y es más fácil recrear y controlar diversas situaciones del motor, pero en nuestro caso, para el uso que necesitábamos no necesitábamos generar cargas, ni diversas situaciones, solo queríamos realizar el soplado del turbo.

3.3.1.2 Motor K9K y sus características

El motor con el que se va a realizar los ensayos es un K9K de 1.500 cm³ proporcionado por la empresa fabricante de motores *Renault*, se puede observar en la Imagen 3.3. Este mismo motor se utiliza para la motorización diesel de vehículos como son los modelos *Mégane* y *Laguna* y *Clio*, así como en las furgonetas *Kangoo* de *Renault*. El motor tiene una relación de compresión de 16:1 y cumple con la normativa Euro 5. Esta normativa entró en vigor en el año 2007 y pretende tanto reducir, como controlar y unificar la cantidad de contaminantes emitidos por los motores diesel en toda Europa.

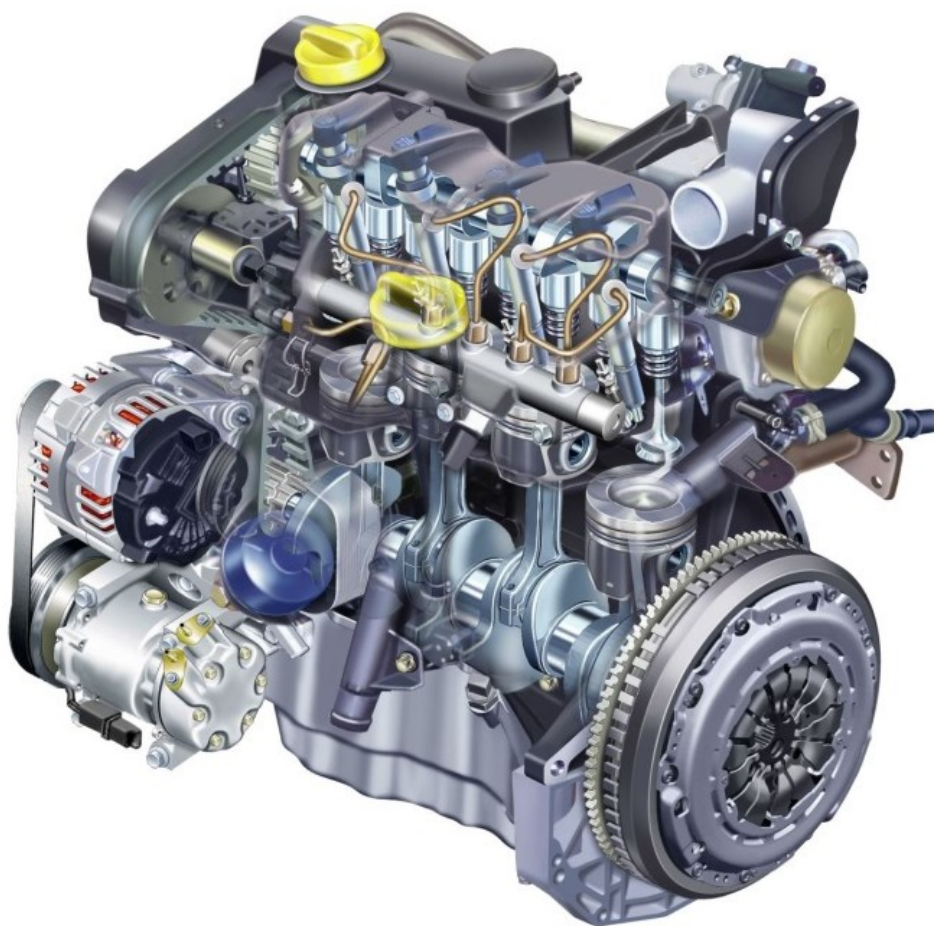


Imagen 3.3 Motor K9K

El motor, denominado K9K 1.5DCI, es un motor turbodiesel el cual, como su propio nombre indica, tiene en una aproximación rápida, una cilindrada de 1.500 cm³, aunque a continuación se van a detallar las características técnicas más relevantes del motor.

Carburante	Gasóleo
Potencia máxima (CV - kW/rpm)	85 - 63/3.750
Par máximo (Nm/rpm)	200/1.900
Número y disposición de cilindros	4 en línea
Material del bloque - culata	Acero - aluminio
Diámetro - carrera	76 - 80'5
Cilindrada (cm3)	1460
Relación de compresión	16:1
Distribución	2 válvulas por cilindro. Un árbol de levas en la culata
Alimentación	Inyección directa, conducto común esférico + multi-inyección, turbo compresor

Tabla 3.2 Características del motor K9K

En cuanto a las características constructivas del motor se puede decir que:

- Este motor tiene una tendencia modular, como la mayoría de los motores actuales, es decir, que los diversos motores de una familia tienen en común muchas piezas: bloque, cigüeñal, bielas, cojinetes, bombas de aceite y agua...
- En cuanto al vencimiento de inercias que tiene que superar el motor en estado de funcionamiento, se puede nombrar un elemento que se encarga exactamente de vencer esas inercias y que se denomina árbol contrarrotante.
- El motor pesa 98 kg, es decir, es un motor pesado si se compara con un motor gasolina de igual cilindrada y el bloque de aluminio, eso sí, pesa unos 50 kg menos que el motor 1'9 litros de inyección directa.

- Para reducir el peso de las piezas en movimiento, y por tanto facilitar en giro del motor, se utilizan levas sinterizadas y encajadas en los árboles, además, el vástago de las válvulas es muy fino (5'5 mm).
- Las levas mueven las válvulas a través de balancines de rodillos, lo cual disminuye la fricción hasta el punto que reduce el consumo del motor entre un 1'5 y un 2% dependiendo del régimen del motor.
- El bloque está realizado en acero y la culata es de aluminio.

En lo referente al sistema de alimentación de carburante, se trata de un sistema *common-rail* de última generación, creado por *Siemens*, el cual tiene una presión de inyección ligeramente mayor a la de otros motores *common-rail* actuales. Los inyectores tienen seis orificios diminutos, lo cual facilita la mezcla del carburante. Esto es debido a que cuanto más pequeños son los orificios del inyector, más finamente se atomiza el carburante, aunque se traduce también en que el proceso de inyección es más lento.

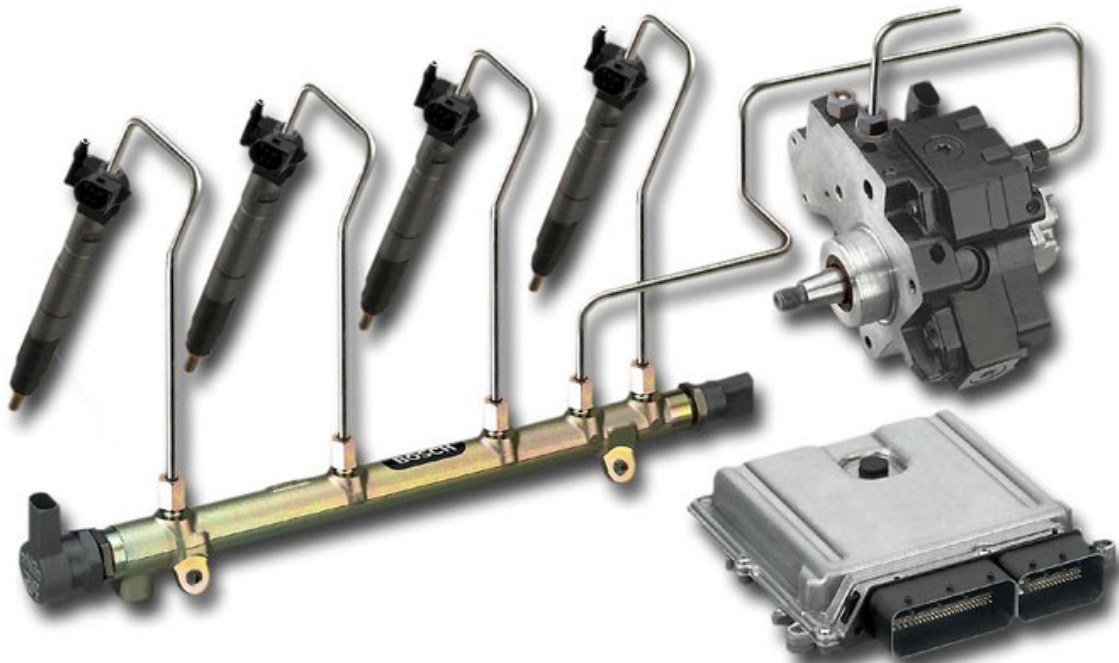


Imagen 3.4 Sistema de inyección common-rail

- Línea de escape

El motor se encuentra instalado en el interior de una cámara climática, por lo tanto es necesario extraer los gases de escape que éste produzca dentro del recinto. Para ello se diseña una línea de escape (Imagen 3.5, Imagen 3.6 e Imagen 3.7), la cual une la salida de la turbina con el extractor de gases. Dicho extractor se encarga de suministrar la energía suficiente para contrarrestar la caída de presión de todos los elementos de la línea de escape diferentes a la línea original, e impulsar los gases al exterior de la cámara climática.



Imagen 3.5 Línea de escape



Imagen 3.6 Silenciador del motor K9K

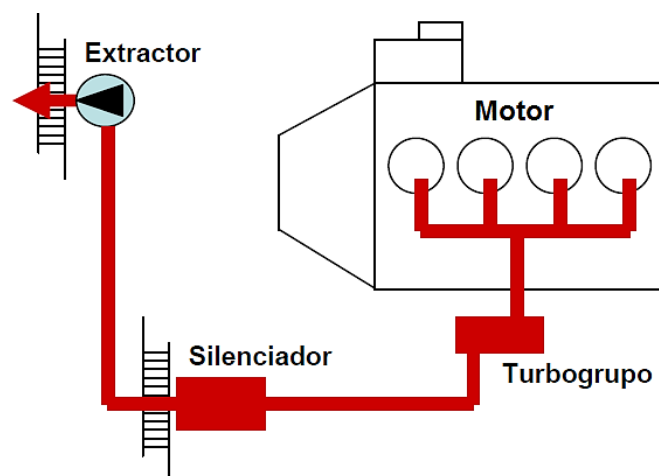


Imagen 3.7 Esquema de la línea de escape

- Línea de carburante

Para el estudio del movimiento del eje y los posteriores transitorios que se van a realizar, es necesario que, en el momento del arranque, tanto el motor como todos sus fluidos se encuentren a la temperatura requerida por el fabricante (condiciones isotermas). Para conseguir esto, en el caso del carburante se ha de instalar un sistema que suministre el carburante necesario al motor a la temperatura que fijemos (Imagen 3.8 e Imagen 3.9).

Se opta por la instalación de un pequeño depósito a una altura superior a cualquiera de los puntos del motor para no tener que colocar una bomba de baja presión. Aunque si se debe instalar una bomba en un *by-pass* para realizar el purgado de la instalación si fuese necesario.



Imagen 3.8 Línea de combustible

El esquema de la línea de combustible es el siguiente:

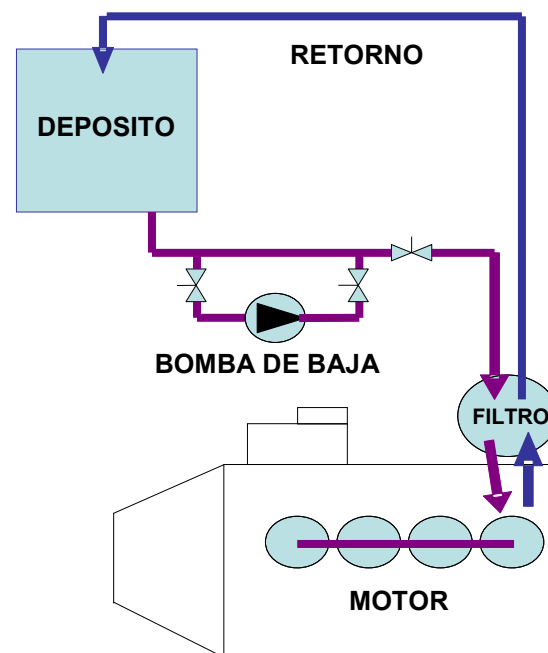


Imagen 3.9 Esquema de la línea del combustible

3.3.1.3 Acople de los turbos al motor

Para realizar poder medir con diferentes turbos en el mismo motor se ha requerido de unos tubos de acero o hierro mecanizados, en los que se pueden ensayar todos los turbos que queramos. Al utilizar un solo motor para realizar los ensayos con los distintos turbogrupos es necesario disponer de alguna solución que nos ayude a colocar fácilmente otros turbos al motor. Esto viene ilustrado en la Imagen 3.10.

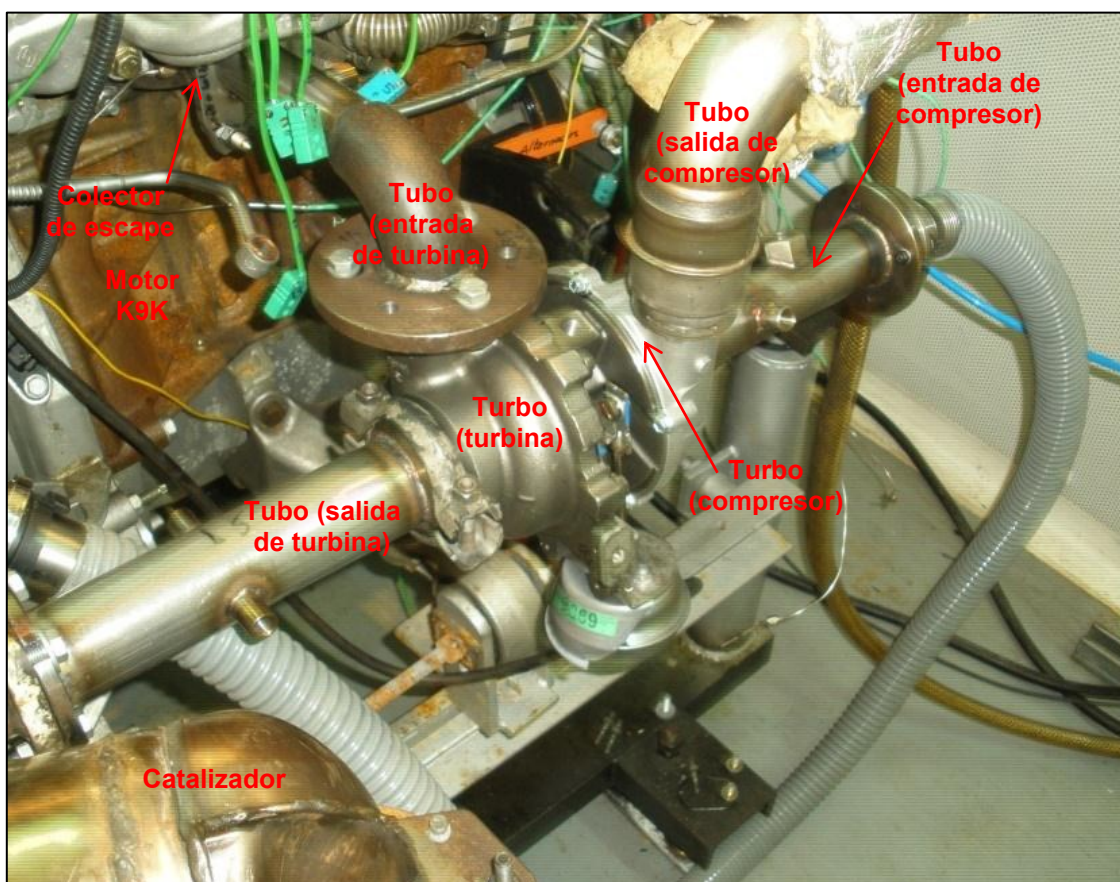


Imagen 3.10 Acople del turbo al motor

Al realizar dicha operación tenemos varias ventajas, una es la que ya se ha mencionado anteriormente, que se puede instalar turbos con más comodidad. Otra ventaja es que gracias a la nueva disposición del turbo podemos maniobrar con más facilidad, instalación de sensores, ajuste de elementos. Otra mejora es que la bancada gana versatilidad gracias a que podemos dirigir la dirección en la que va dirigido los elementos (gases de escape, aire de admisión).

Toda la instalación para el acople debe de estar diseñada para que exista el menor número de codos, o que estos no sean muy pronunciados. Esto ha sido realizado en el C.M.T. por el tornero en el taller bajo encargo.

3.3.2 Unidad de control electrónico (E.C.U.)

La unidad de control electrónico, la cual se va a mostrará continuación en la Imagen 3.11, es la encargada de analizar y controlar todos los parámetros del motor, éstos pueden ser modificados según se requiera en cada ensayo. Este tipo de E.C.U. se le denomina unidad de control electrónico abierta. Las modificaciones que se realicen sobre los parámetros de la E.C.U., aunque pueden ayudarnos a llegar al régimen del turbo deseado haciendo que el régimen del motor sea menor, no deben sobrepasar unos límites, ya que sobrepasar dichos puntos podría traer como consecuencia un mal funcionamiento del motor e incluso su rotura, creando así una situación de riesgo para las personas que estén trabajando en este proyecto y para el proyecto en sí.

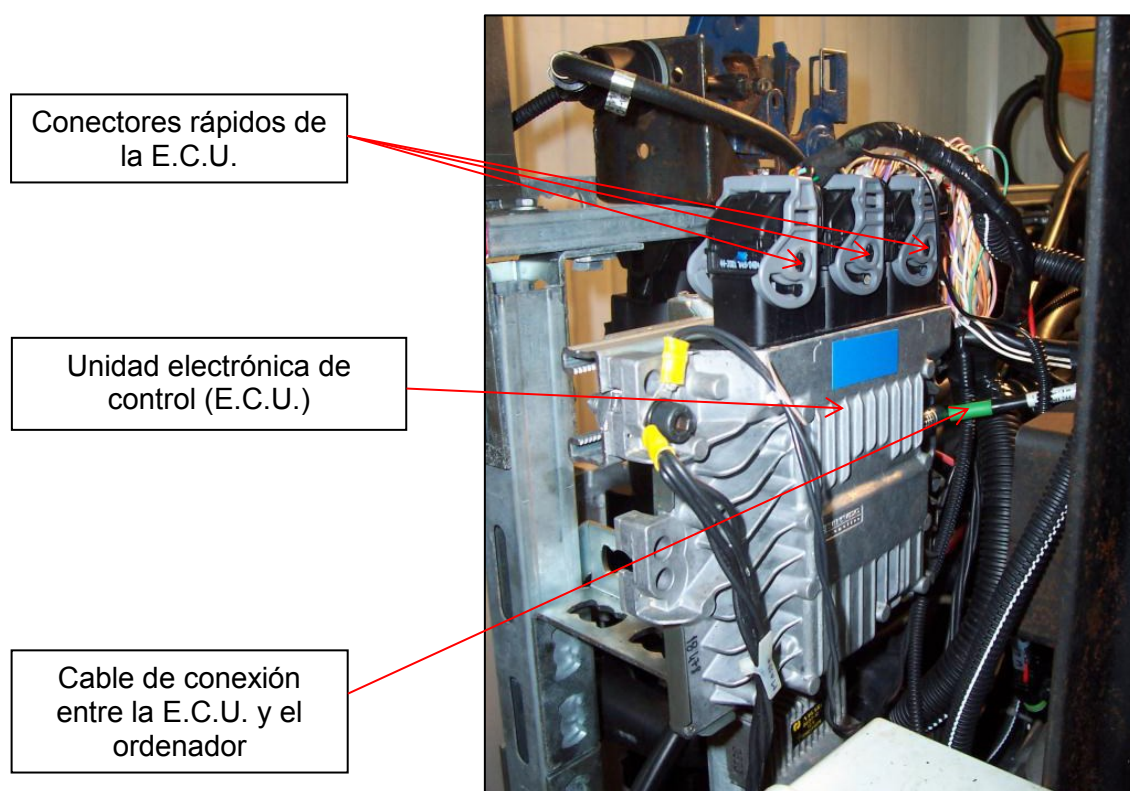


Imagen 3.11 Unidad de control electrónico (E.C.U.)

3.3.2.1 Modelo

Existen varias marcas que hoy en día se encargan de fabricar unidades de control electrónico y, a su vez, sistemas de inyección (SIEMENS, DELPHI, BOSCH). Además estas marcas tienen relación con el sistema de inyección del motor ya que los mismos fabricantes se encargan de la fabricación de ambos componentes.

La unidad de control electrónico se encarga de analizar los datos procedentes de los sensores del motor y analiza muchos de los parámetros de control del motor, los cuales pueden ser modificados según requieran los ensayos sin sobrepasar los límites, ya que esta E.C.U., como ya se ha dicho anteriormente, es especial, puesto que se pueden modificar a conciencia todos los parámetros del motor, es decir, se trata de una E.C.U. abierta.

Inicialmente, el motor K9K viene montado con un sistema de inyección *common-rail* de segunda generación SIEMENS, capaz de realizar inyecciones múltiples. Para poder aumentar el número de inyecciones es necesario que los inyectores sean capaces de reducir el tiempo entre una inyección y otra, en una magnitud de 1.500 a 150 microsegundos, además de reducir la cantidad mínima inyectada en cada inyección.

Es necesario, por tanto, disponer de una centralita capaz de cambiar continuamente la lógica de inyección en función de tres parámetros: el número de revoluciones del motor, el par solicitado en ese momento por el usuario y la temperatura del líquido de refrigeración.

La unidad de control electrónico del motor K9K usado en este proyecto es un modelo de SIEMENS fabricada en Alemania.

3.3.2.2 Características de la E.C.U.

La unidad de control electrónico se encuentra dentro de una caja metálica. Los sensores, actuadores y la alimentación de corriente, están conectados a la E.C.U. a través de un conector multipolar. Los componentes de potencia para la activación directa de los actuadores, están integrados en la caja metálica de tal forma que se garantiza una buena disipación térmica hacia la misma.

A la unidad de control se le exigen altas prestaciones tales como:

- Rapidez en los cálculos y ponderaciones a realizar, así como en detectar y subsanar en la medida de lo posible los errores que puedan aparecer mientras el motor esté operativo.
- Resistencia a la temperatura del entorno de trabajo (en servicio de marcha normal puede estar entre -40°C y 85°C).
- Resistencia a productos de servicio (aceite, carburante, etc.)
- Resistencia a la humedad del entorno de trabajo
- Compatibilidad electromagnética
- Solicitaciones mecánicas

Como se ha dicho anteriormente, la unidad de control electrónico con la que se van a realizar los ensayos es una unidad de control electrónico abierta. La mayoría, si no todas las unidades de control electrónico que existen en el mercado son cerradas, al menos todas las de cualquier vehículo más o menos nuevo. Se dice que una E.C.U. es cerrada cuando no es posible modificar los parámetros de ésta. Podemos obtener comunicación con una E.C.U. cerrada, pero únicamente para realizar test de comprobación de errores de funcionamiento (es decir, fallos o alertas en el funcionamiento del motor). Esta comunicación de transmisión de datos se realiza mediante una conexión rápida.

En la Imagen 3.11 mostrada anteriormente, se puede apreciar, en la parte superior de la foto, tres conectores rápidos que son los encargados de comunicar todos los sensores y actuadores del motor con la unidad de control electrónico. En la parte derecha se puede observar un cable negro con una cinta verde, que se encarga de mantener la comunicación entre la E.C.U. y el ordenador de la sala de control. El programa que permite la intercomunicación de la información para su posterior lectura y manipulación es el Inca, el cual se explicará posteriormente en el apartado 3.6.2.

La tarea fundamental de la E.C.U. consiste en recibir y evaluar las señales de los sensores externos, así como traducir esta información para que el motor funcione correctamente ante la demanda del usuario.

Los microprocesadores calculan, a partir de estos datos de entrada y según campos característicos almacenados en memoria, los tiempos de inyección e instantes de inyección, transformándolos en desarrollos temporales de señal que están adaptados al movimiento del motor. Debido a la precisión requerida y al alto dinamismo del motor es necesaria una gran capacidad de cálculo.

Con las señales de salida se activan las etapas finales que suministran suficiente potencia para los actuadores de regulación de presión del rail y para la desconexión del elemento. También se activan actuadores para las funciones del motor, como son, por ejemplo:

- Retroalimentación de los gases de escape
- Actuador de presión de sobrealimentación
- Relé para la electrobomba del carburante

Y para otras funciones auxiliares como:

- Relé de calefacción adicional
- Relé de incandescencia
- Acondicionador de aire

- Válvula de E.G.R.

Las etapas finales están protegidas contra cortocircuitos y destrucciones debidas a sobrecargas eléctricas. El microprocesador recibe retroinformación sobre anomalías de este tipo, así como de cables interrumpidos. Las funciones de diagnóstico de las etapas finales para los inyectores reconocen también desarrollos deficientes de señal. Adicionalmente se retransmiten algunas señales de salida a través de interfaces a otros sistemas del vehículo. Dentro del marco de un campo de seguridad, la E.C.U. supervisa también el sistema de inyección completo.

En la Imagen 3.12 y en la Tabla 3.3 se puede ver los distintos parámetros que tiene en cuenta la E.C.U. en los análisis en tiempo real que es capaz de tener en cuenta al mismo tiempo.

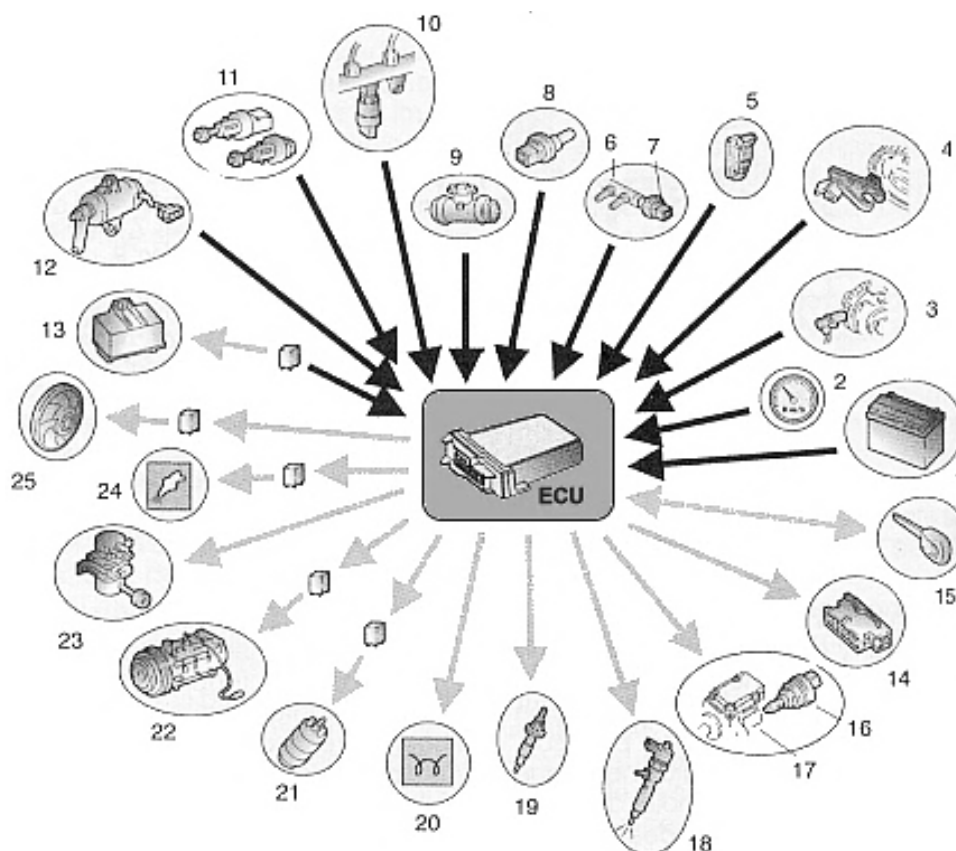


Imagen 3.12 Esquema de entrada y salida de señales de la E.C.U.

1	Batería	14	Toma de diagnóstico
2	Velocímetro	15	Equipo de cierre antirrobo
3	Sensor de r.p.m. del cigüeñal	16	Regulador de presión en la bomba
4	Sensor de fase	17	Bomba de alta presión
5	Sensor de sobrepresión	18	Inyectores
6	Conducto de paso de carburante	19	Bujías de espiga incandescente
7	Sensor de control de la temperatura del gasóleo	20	Luz testigo de aviso de calentadores funcionando
8	Sensor de la temperatura del líquido refrigerante	21	Electrobomba de carburante de baja presión
9	Caudalímetro	22	Compresor del A.C.
10	Rampa de inyección con sensor de presión del carburante	23	Válvula de E.G.R.
11	Interruptores del pedal de freno y de embrague	24	Luz testigo de funcionamiento del equipo electrónico
12	Potenciómetro del pedal del acelerador	25	Electroventilador
13	Cajetín electrónico de precalentamiento		

Tabla 3.3 Parámetros de entrada y salida de la unidad de control electrónico

La activación de los inyectores plantea exigencias especiales. La corriente eléctrica genera en una bobina con núcleo magnético, una fuerza magnética que actúa sobre el sistema hidráulico de alta presión en el inyector. La activación eléctrica de esta bobina debe realizarse con flancos de corrientes muy pronunciados para conseguir una tolerancia reducida y una elevada capacidad de reproducción del caudal de inyección. Condición previa para ello son las tensiones elevadas que se almacenan en memoria de la unidad de control.

Una regulación de corriente divide la fase de actuación de corriente (tiempo de inyección) en una fase de corriente de excitación y una fase de retención. La regulación debe tener una precisión tal que le permita al inyector funcionar en cada margen de servicio de forma reproducible y debe, además, reducir la potencia de pérdida en la unidad de control y en el inyector.

Todo ello tendrá la posibilidad de modificarse, gracias al sistema Inca que posee las funciones adecuadas para dicho propósito.

3.4 Laboratorio

El laboratorio no se ha utilizado para los ensayos, pero si para realizar todas las operaciones de la metodología de ensayo. El laboratorio en el que hemos realizado estas operaciones está ubicado en la primera planta del edificio 8P. Hemos necesitado utilizar dicho laboratorio para poder realizar que se expondrán en siguiente capítulo.

Este laboratorio posee todo lo necesario para los trabajos que necesitábamos, ya que se ha pensado para dicho fin, en el podemos encontrar herramientas básicas y espacio de trabajo que es cómodo para las tareas que se expondrán después.

A continuación, se puede apreciar en la Imagen 3.13 de que consta el banco de equilibrado, como y de que está formado.

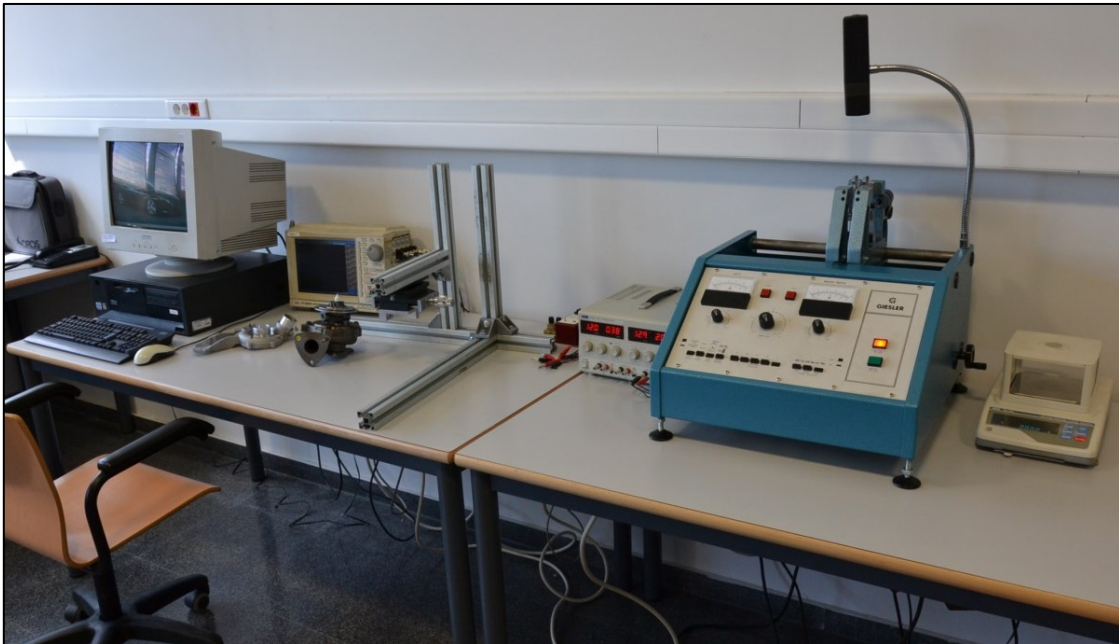


Imagen 3.13 Banco de equilibrado

Este banco consta de los siguientes elementos:

- Máquina de equilibrado de ejes Giesler (véase Imagen 3.14)

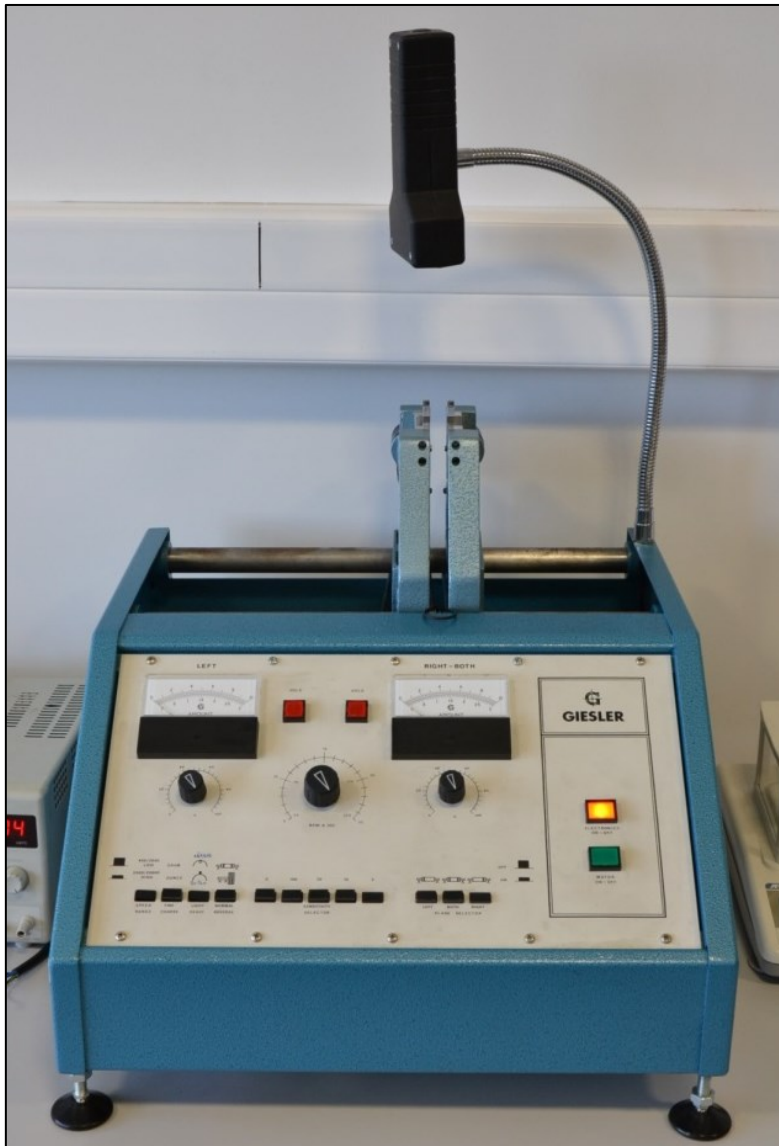


Imagen 3.14 Máquina de equilibrado de ejes Giesler

Esta máquina de equilibrado es necesaria, cuando ponemos una tuerca en la rueda del compresor. Al introducir un elemento adicional que el fabricante de turbogrupos no ha considerado, hemos de volver a equilibrar la tuerca en la máquina.

Para ayudarnos a calibrar existe una “plastilina” especial para este propósito, y la maquina nos dice la cantidad que tenemos que quitar o añadir y la posición.

- Ordenador (véase Imagen 3.15)

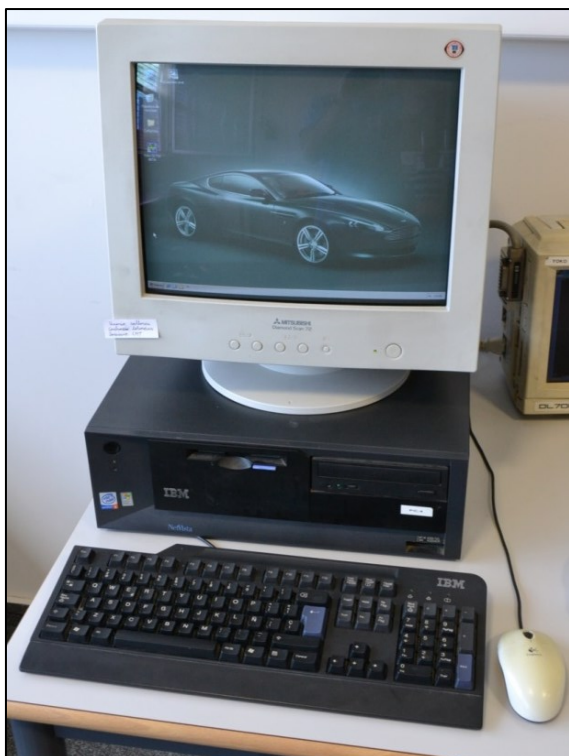


Imagen 3.15 Ordenador

El ordenador en cuestión es un ordenador estándar, en el que se le ha instalado el programa Yoko, para poder medir con la YokoGawa DL708E, además de programas de cálculo como Excel, etc.

Este ordenador nos ayudará en cuestiones como: calibración, esquema de montaje, almacenamiento de datos y cálculo mediante programas.

- Balanza de precisión AND GX-400 (véase Imagen 3.16)



Imagen 3.16 Balanza de precisión

Esta balanza es capaz de medir de 0 a 410g con una precisión de $\pm 0.001g$. Esta balanza se ha usado para calibrar el eje del turbo, mediante la adición o eliminación de un material similar a la "plastilina". Para saber la cantidad de masa con la se está trabajando es necesario el uso de una máquina de estas características.

- Estructura de aluminio con mesa micrométrica (véase Imagen 3.17)

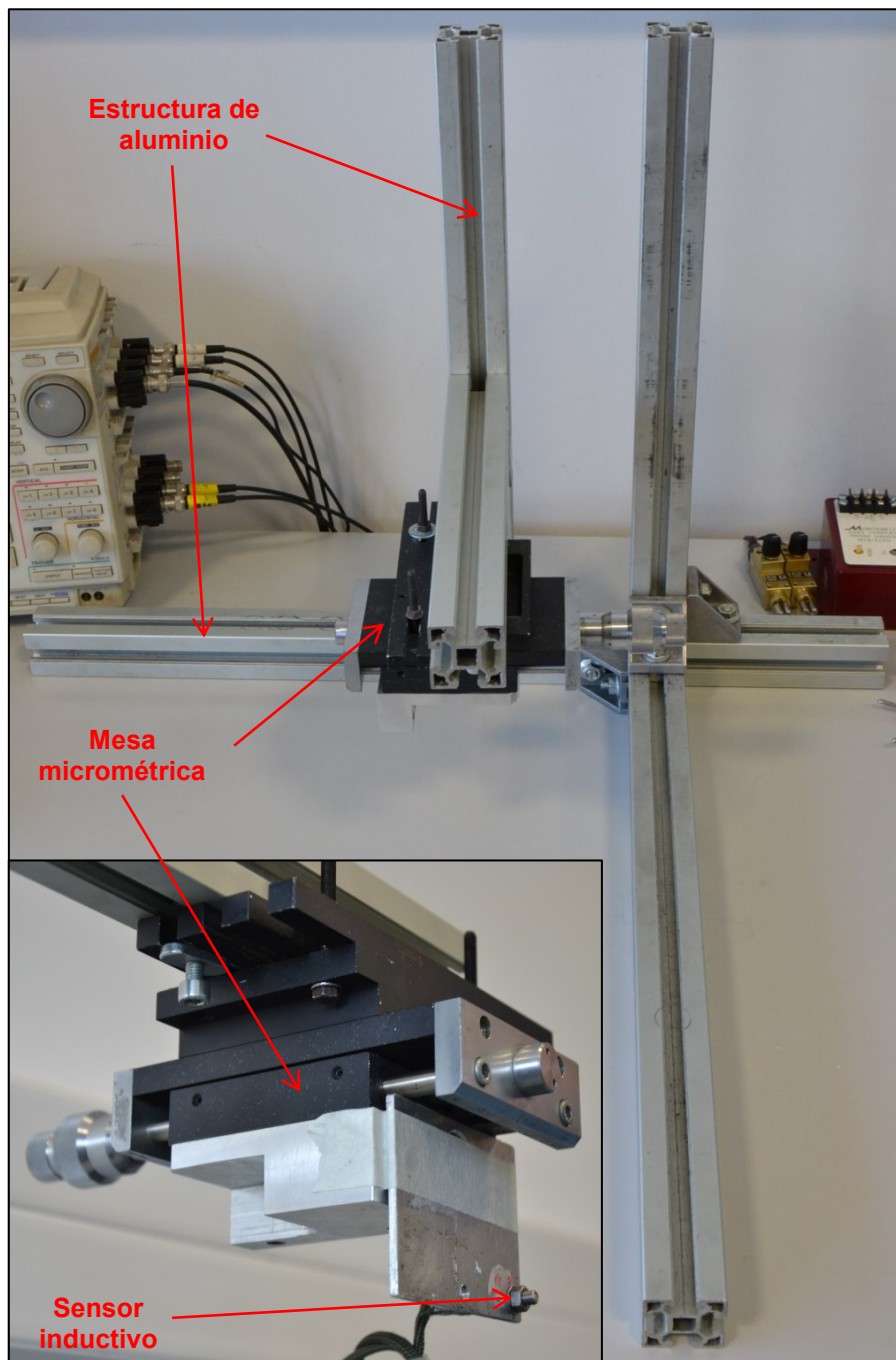


Imagen 3.17 Estructura de aluminio

Esta estructura está construida por 5 barras de un determinado perfil de aluminio de distintas longitudes unidas por escuadras de aluminio propias de ese perfil. El principal uso de esta mesa ha sido el de calibrar sensores, ya sea

sobre la mesa como se muestra en la Imagen 3.17 o bien dentro de la máquina de equilibrado.

Estos sensores van roscados sobre la mesa micrométrica. La mesa micrométrica consta de dos partes, una pieza de aluminio en la que tiene distintos pasos de rosca para los diferentes sensores, que va enganchada a los que es propiamente la mesa micrométrica, que es un elemento que desplaza a la parte de aluminio (donde están roscados los sensores) en un eje (el cual podremos determinar según montemos la estructura) con una tolerancia de $\pm 0'005$ mm, esta a su vez es la que va enganchada a la estructura de aluminio.

- Cadena de medida YokoGawa 708E (véase Imagen 3.18)

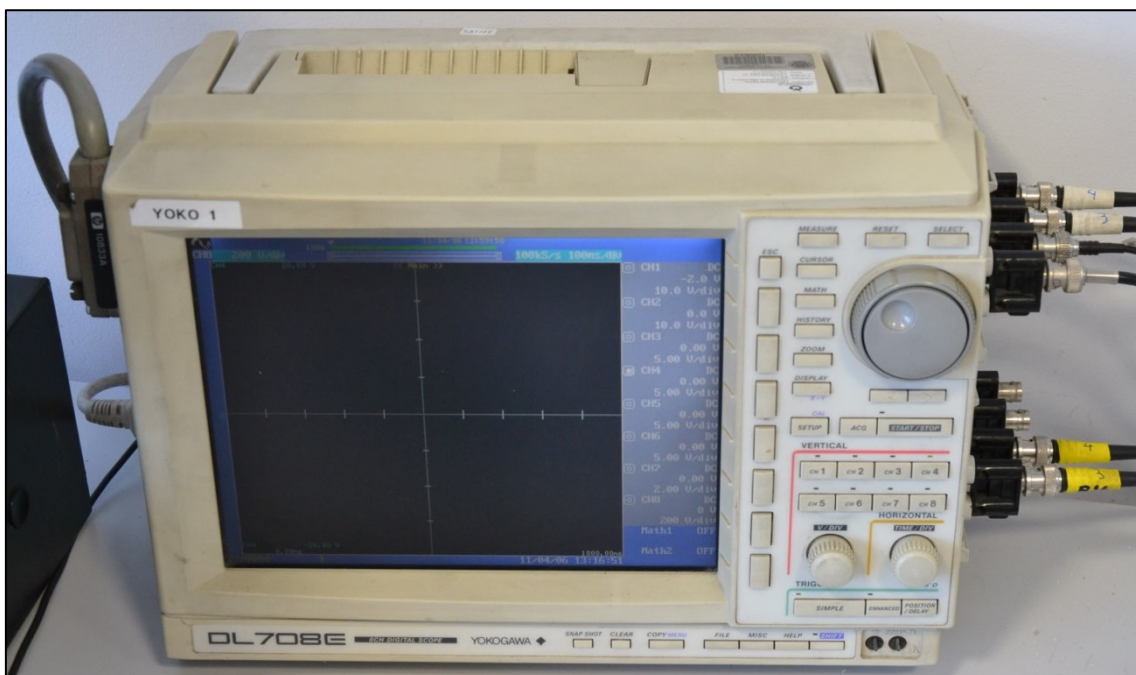


Imagen 3.18 YokoGawa DL708E

Esta cadena de medida es similar a la utilizada en la sala de ensayos, con la única diferencia de que esta es de 8 canales y no de 16 como la DL750. Su funcionamiento para la obtención de las medidas mediante el programa Yoko es idéntica a la anteriormente mencionada Yoko DL 750.

- Fuente de alimentación TTi EL302T (véase Imagen 3.19)



Imagen 3.19 Fuente de alimentación TTi EL302T

Esta máquina es una fuente de alimentación eléctrica que es capaz de generar voltajes en el intervalo de 0 a 30 V y amperajes de 0 a 2 A, en tres salidas como muestra la imagen. Esta fuente de alimentación la tenemos configurada para que sea capaz de conectarse mediante conectores “banana”.

En general el uso de esta fuente es utilizado para suministrar voltaje a las cajas electrónicas de los sensores, y para suministrar un voltaje variable a el motor de la máquina de equilibrado. Consta de tres pantallas de repetidas: la primera el para regular el voltaje, la segunda para regular el voltaje con una mayor precisión, y la tercera es para situar el tope de amperaje que deseemos.

- Mesa de trabajo con mordaza y superficie de goma (véase Imagen 3.20)



Imagen 3.20 Mesa de trabajo

La mesa de trabajo consta de una superficie como para el trabajo, consta de la estructura de la mesa que es totalmente metálica, y una superficie de goma que mejora las operaciones en dicha superficie, aparte tiene incorporada una mordaza de gran tamaño para el amarre de distintos elementos.

- Pie de rey Mitutoyo

El pie de rey es un calibre de la marca Mitutoyo con una precisión de ± 0.05 mm. El uso de este aparato ha sido el de tomar referencias en las medidas que se ha requerido, como colocación de la rosca de la carcasa a la altura que se deseaba.



Imagen 3.21 Pie de rey Mitutoyo

3.5 Variables a medir e instrumentación

El motor que se recibe de P.S.A. (similar al producido en la cadena de montaje) se debe instrumentar, ya que la información que el motor proporciona solamente se puede obtener a través de la E.C.U. en caso de no instrumentarlo.

En la Tabla 3.4 se muestran los parámetros más relevantes que se miden en los ensayos, así como los instrumentos utilizados para realizar estas mediciones:

Parámetros a medir	Instrumento utilizado
Temperatura entrada y salida de aceite en el turbo	Termopar K cabeza cubierta $\varnothing 1'5$ mm
Temperatura pipas de admisión.	Termopar K cabeza descubierta $\varnothing 1'5$ mm
Temperatura líquido refrigerante del motor.	Termopar K cabeza cubierta $\varnothing 1'5$ mm
Temperatura aceite del motor.	Termopar K cabeza cubierta $\varnothing 1'5$ mm
Temperatura combustible.	Termopar K cabeza cubierta $\varnothing 1'5$ mm
Temperatura ambiente.	Termopar K cabeza descubierta $\varnothing 1'5$ mm
Temperatura entrada y salida turbina	Termopar K cabeza cubierta $\varnothing 1'5$ mm
Temperatura aceite <i>housing</i> turbo	Termopar K cabeza cubierta $\varnothing 1'5$ mm
Referencia de giro del motor.	Codificador angular (Kistler 2613A)
Régimen instantáneo del turbo	Sensor de régimen magnético
Desplazamiento del eje del turbo	Sensores <i>Shaft-Motion</i>
Presión admisión aire	Sensor presión media Fm-p
Presión entrada turbina	Sensor presión media Fm-p
Presión aceite entrada turbo	Sensor presión media Fm-p
Porcentaje de pedal utilizado	Módulo entrada analógica Samaruc y cadena de medida YokoGawa DL750

Tabla 3.4 Instrumentación requerida

Como ya se ha dicho anteriormente, el motor K9K dispone de una unidad de control electrónico (E.C.U.) abierta, lo cual permite el acceso a ella a través de un *software*. El programa utilizado se denomina Inca, y mediante él es posible tanto observar como manipular a conveniencia una gran cantidad de parámetros en el motor como son, por ejemplo, la cantidad o la presión del combustible inyectado en cada ciclo del motor. Esta información es de valores consigna y medios, como por ejemplo la presión en rail de la cual se obtiene un valor consigna (*fup_sp*) y un valor medio (*fup_mes*).

Por esta razón, en el departamento se ha decidido tomar datos del motor más fiables a través de distintos elementos de medida colocados en el motor a posteriori, como son los captadores de presión, termopares tipo K, pinzas amperimétricas, etc.

Estos instrumentos han de encontrarse en buenas condiciones de funcionamiento, ya que las mediciones que se realicen durante el ensayo han de analizarse posteriormente para conocer así el funcionamiento del motor a cada instante del ensayo en sus distintos puntos de operación. Una medición errónea podría suponer, además de no conocer las prestaciones reales del motor, un diagnóstico falso en el posterior análisis de los resultados, pudiendo incluso no detectar problemas si los hubiese, o pensar que hay problemas donde en realidad no los hay.

Una vez conocidas todas las variables necesarias, y hecha una selección de los elementos que se utilizarán para instrumentar el motor, se va a pasar a hablar con más detenimiento de cada uno de los parámetros a medir.

3.5.1 Sensores de desplazamiento del eje (*Shaft-Motion*)

Las distintas modificaciones en la línea del motor de este proyecto han sido llevadas a cabo con el propósito de poder medir, como ya se ha dicho, el desplazamiento producido en el eje de un turbogruppo cuando este está sometido a unas situaciones y regímenes determinados.

Para realizar dicha técnica de medición, los dos sensores de infrarrojos (también llamados ópticos) que van a medir el desplazamiento del eje se colocan radialmente a éste, enfocando a la punta del eje en el lado del compresor y formando juntos un ángulo de 90° . Para minimizar la apertura del haz de luz después de la reflexión, un cilindro con un diámetro grande de aproximadamente 12 mm o 9 mm (dependiendo del tamaño del turbo) se coloca en la punta del eje del compresor. Además, el acabado de la superficie del cilindro es de color blanco, maximizando así la reflexión de la luz infrarroja producida por los sensores, aumentando así su sensibilidad. En la Imagen 3.22 se muestra un esquema de cómo ha sido instrumentada la carcasa con los sensores infrarrojos.

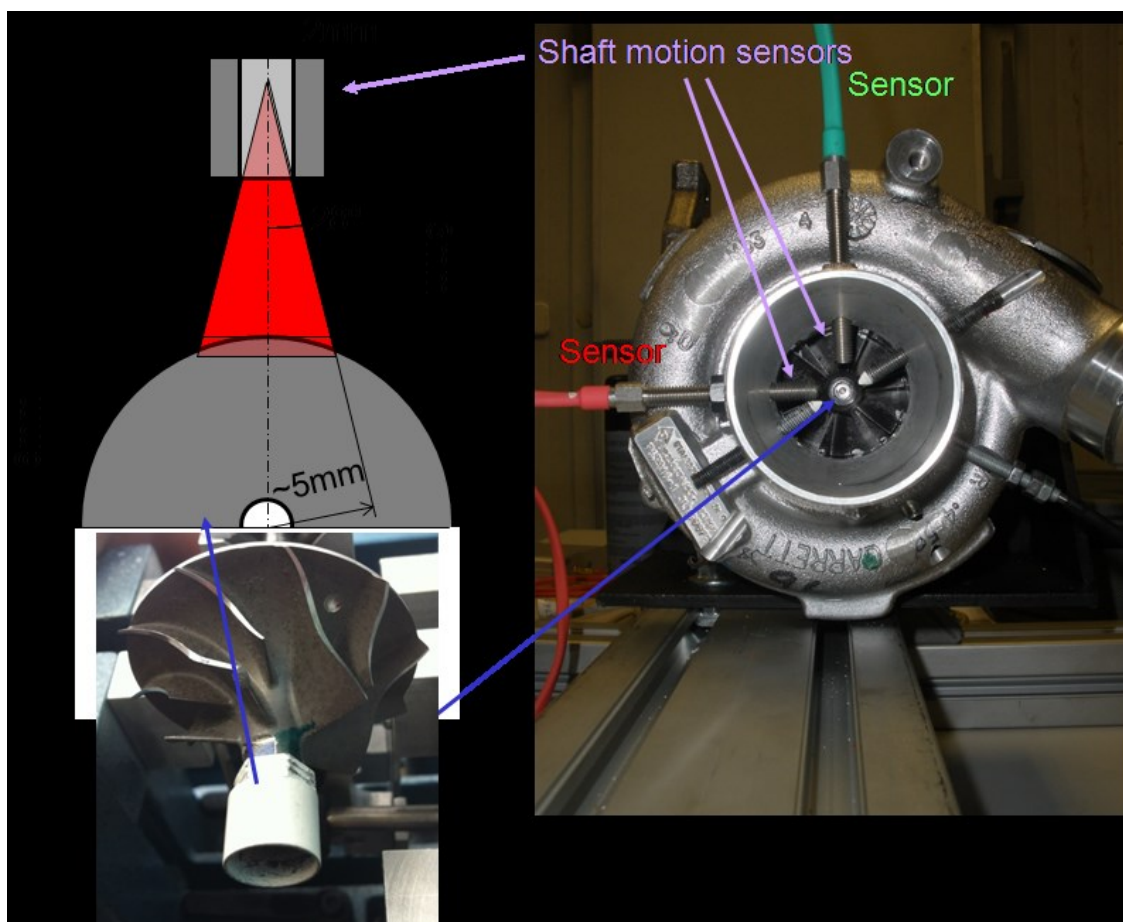


Imagen 3.22 Esquema de montaje de los sensores ópticos

Los sensores se van a colocar a 3 mm de la superficie del cilindro montado en el eje, descrito anteriormente ya que a esta distancia es donde tienen mayor sensibilidad. Sin embargo, los sensores tienen un rango de

operación que va desde los 0'5 mm hasta los 10 mm y son capaces de registrar los datos a una frecuencia de 1 MHz, aunque para evitar problemas de memoria a la hora de registrar los datos, la frecuencia de adquisición de los sensores se ha visto limitada a 100 kHz.

El sensor óptico consta de dos partes como se va a poder apreciar a continuación en la Imagen 3.23: en primer lugar, el amplificador, el cual incluye la configuración de la sensibilidad y el indicador de funcionamiento del mismo, en segundo lugar se tiene la sonda de fibra óptica.

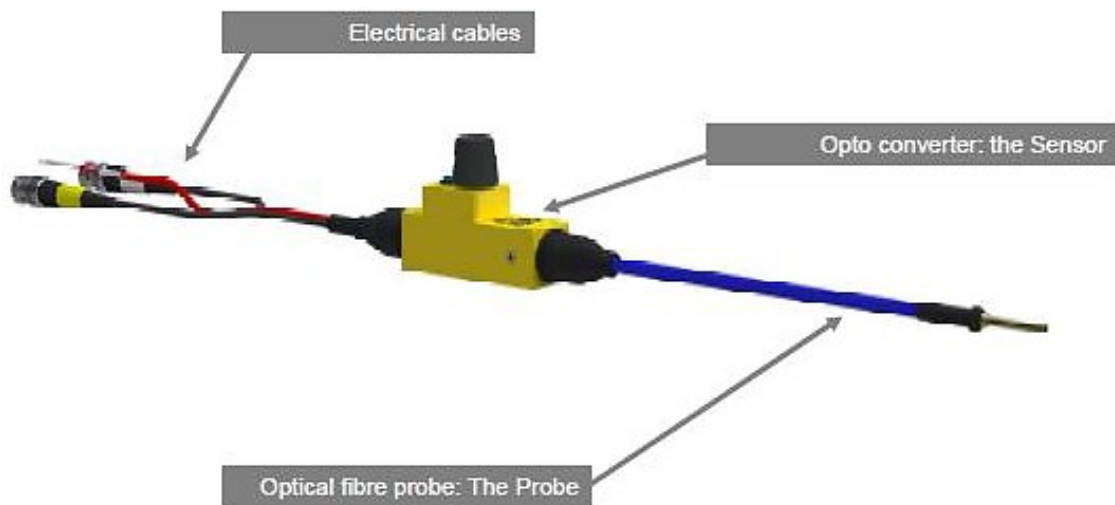


Imagen 3.23 Sensor óptico completo

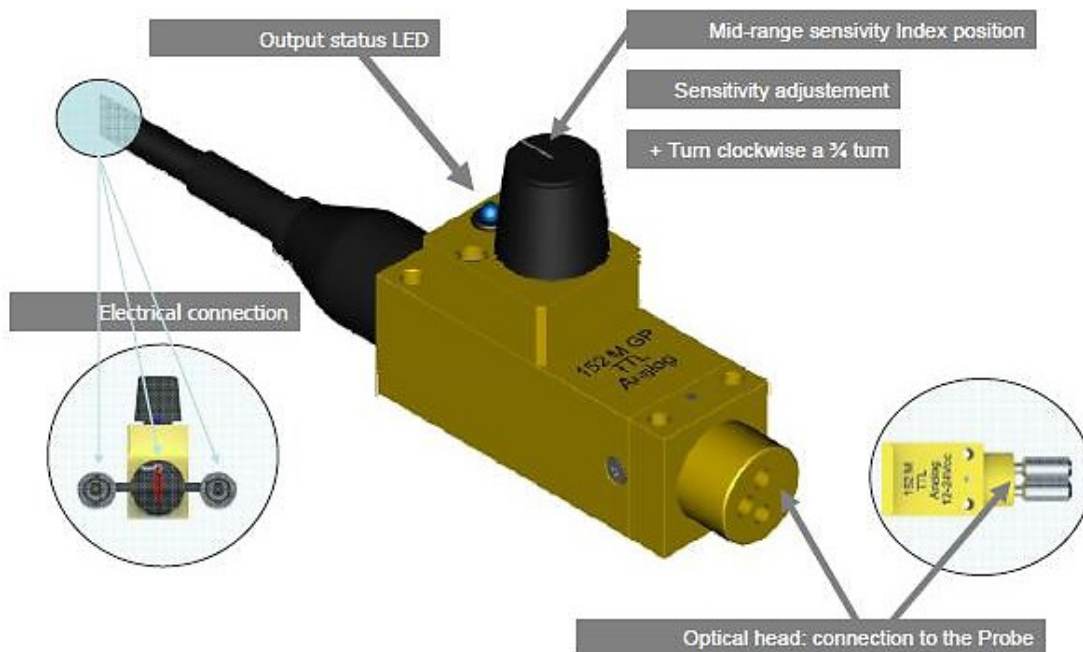


Imagen 3.24 Detalles del potenciómetro del sensor óptico

Después de haber visto en las imágenes anteriores (Imagen 3.23 e Imagen 3.24) como son dichos sensores, pasaremos a explicar su funcionamiento. El sensor se encuentra en todo momento conectado al amplificador. La función del amplificador es, por una parte, emitir un haz de luz el cual se hace pasar por una de las dos fibras que van a servir de guías para conseguir llevar ese haz de luz al lugar en el cual se desea hacer la medida. Por otra parte, el sensor consta también de dos fibras, la segunda fibra es la encargada de recoger la reflexión del haz de luz producida por la superficie que se desea medir y volverla a llevar hasta el amplificador. Es allí donde se obtiene el valor de recepción del haz de luz mediante un foto-diodo, obteniendo así el valor de medida correspondiente y la distancia a la cual se encuentra la superficie del sensor que estamos midiendo.

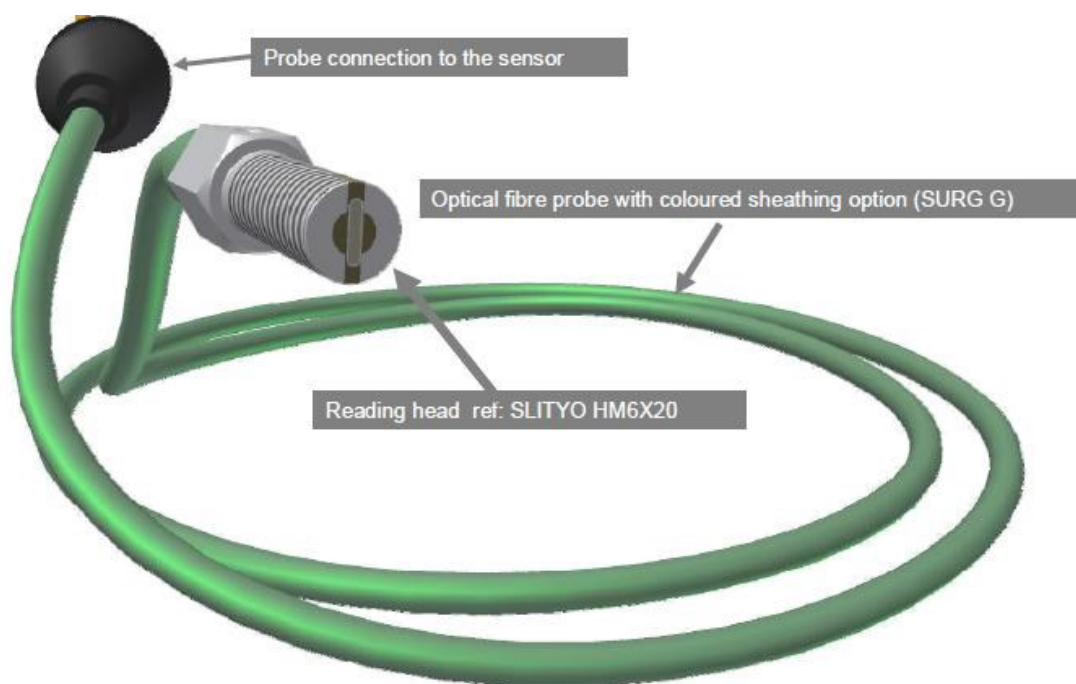


Imagen 3.25 Cabeza del sensor óptico

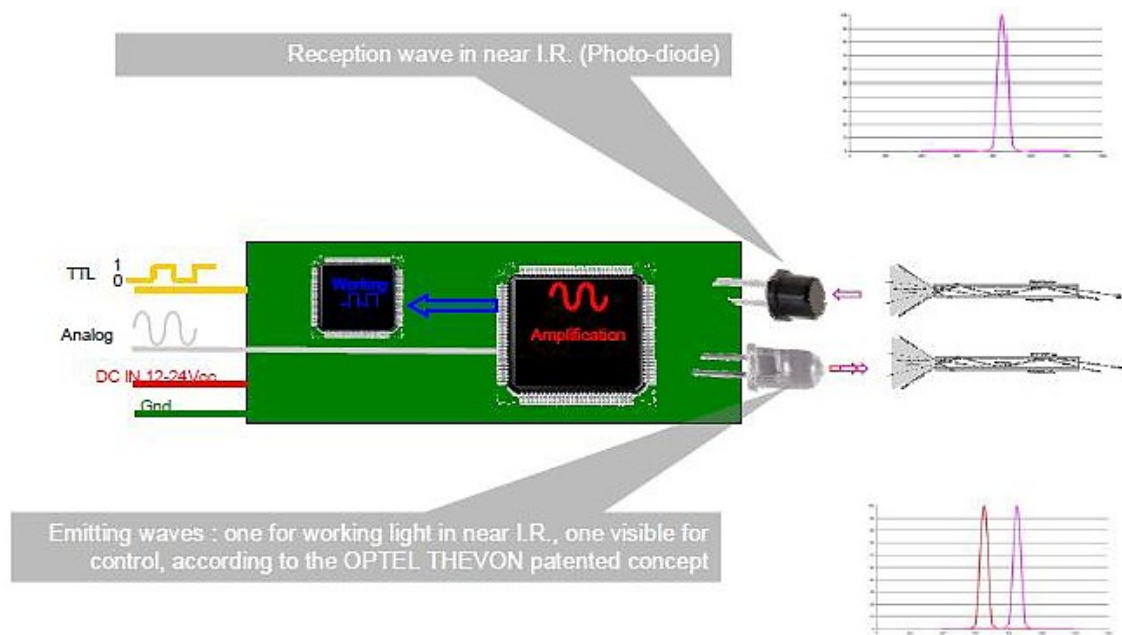


Imagen 3.26 Esquema de medida

3.5.2 Sensores de presión

Es necesario conocer y poder registrar las presiones existentes durante el ensayo en determinados puntos del motor como son: la presión ambiente, la presión del aceite a la entrada del turbogrupo, la presión del aire a la salida del compresor y la presión a la entrada de la turbina. Así se pueden obtener unos parámetros de funcionamiento del motor y del turbogrupo a ensayar. Para realizar éstas medidas contamos con unos transmisores de presión comúnmente denominados “fm-p”.

Estos transmisores están específicamente diseñados para aplicaciones calificadas en el área de la industria. Pueden medir en presiones relativas o absolutas y el rango de medida varía según el modelo de transmisor utilizado y la precisión que se desee obtener, siempre asegurándonos de que no se va a sobrepasar la presión que el sensor puede soportar.

Para la instalación se han utilizado tres transmisores de presión, uno para registrar la presión de aceite a la entrada del compresor, uno para registrar la presión del aire a la salida del compresor y otro para registrar la presión de éste a la entrada de la turbina.

Todos los transmisores nos ofrecen una señal eléctrica que varía de 0 a 10 V según la presión que estén registrando, eso sí, para aumentar en precisión, el rango de medidas de cada uno varía para dar ésta tensión:

Presión de aceite de entrada turbogrupo	0 - 10 bar	0 - 10 V
Presión aire salida compresor	0 - 2'5 bar	0 - 10 V
Presión aire entrada turbina	0 - 6 bar	0 - 10 V

Estos sensores han sido elegidos para la realización de este proyecto debido a que cumplen una serie de requisitos que los hacen muy recomendables y muy fiables, tanto para medir las presiones del motor como para realizar cualquier ensayo, puesto que según las especificaciones del fabricante, y según se ha podido comprobar, la temperatura prácticamente no afecta a los valores de medida que se van a registrar, no obstante, los sensores siempre se van a calibrar tras un cambio de temperatura brusco.

Además los sensores de presión aguantan temperaturas desde -20°C hasta 70°C de temperatura ambiente, lo cual los hace aptos para nuestro propósito. La característica lineal de los sensores proporciona una medición precisa de los resultados, y facilita su calibración en frío ya que ésta se basa en estabilizar los transmisores a varias presiones dentro de su rango de medida y adecuar la recta de calibración a la nueva recta obtenida. En éste caso, la electrónica utilizada nos ofrece una recta de 0 a 10 V para todos los rangos de presión, sea el sensor que sea.



Imagen 3.27 Sensor de presión

3.5.3 Sensores de temperatura

Como se ha visto en la Tabla 3.4, los elementos utilizados para la medición de temperatura son termopares tipo “K”. Este elemento está ilustrado en la Imagen 3.28. Son sensores de temperatura muy simples, con un bajo coste y un funcionamiento sencillo, además tiene un bajo tiempo de respuesta. Tienen una gran variedad de configuración y versatilidad, un rango de medidas bastante amplio en cuanto a las temperaturas, y no necesita alimentación exterior.



Imagen 3.28 Termopar tipo K

Su principio de funcionamiento está basado en la propiedad de los metales por la que, acoplados mediante dos uniones a distinta temperatura, generan una fuerza electromotriz. Que es lo que se conoce con el nombre de efecto termoeléctrico.

Estas dos uniones se realiza entre parejas metales de diferente naturaleza soldados, estando una en contacto con la temperatura que queremos medir (unión caliente) y otra a temperatura ambiente (unión fría) para comparar.

Dependiendo de los metales que intervienen en las uniones existen diferentes termopares, su elección dependerá tanto del rango de temperaturas como las características de la atmósfera a medir. A pesar de lo cual la unión de los metales está recubierta por un vaina que asegura una protección mecánica y química del termopar. Siendo los metales que más se utilizan, cromo-alumel (tipo K), ya que son estos generan una respuesta más lineal.

Se van a utilizar termopares tipo K de cabeza descubierta para medir temperatura en las pipas de admisión y a la salida del compresor, ya que la respuesta de este tipo de termopar es más rápida que en los de cabeza

cubierta y, además, el fluido a medir es aire “limpio”. En el caso de los líquidos, como el agua y el aceite del motor, la medida de la temperatura se va a realizar con termopares de cabeza cubierta.

Todas estas medidas van a ser registradas por un *software* de control y adquisición denominado Samaruc a una frecuencia de 100 Hz o lo que es lo mismo, 100 medidas por segundo.

3.5.4 Sensores para el caudal del aire

Una de las magnitudes que es necesario medir con gran precisión en esta instalación es el gasto másico que trasegan la turbina y el compresor del turbogrupo que se desea ensayar. Para realizar dicha medida se va a utilizar un caudalímetro de hilo caliente, el cual va instalado en el filtro de admisión del motor de serie. Así se puede conocer el caudal de aire trasegado por la instalación en todo momento y registrarlo.

Los medidores de hilo caliente están constituidos por un hilo eléctrico que atraviesa un conducto por el que circula el caudal del gas a medir. Este hilo forma parte de un circuito eléctrico con una determinada relación de tensión. Al aumentar el caudal de gas, el hilo se enfría, con lo que disminuye su temperatura y consecuentemente, su resistencia.

Éstos son los medidores más adecuados para la instalación, y se va a tomar el total del gasto trasegado por el motor en todo momento como el caudal que pase por el conducto de admisión del motor, es decir, todo el aire se va a hacer pasar previamente por el filtro de aire y posteriormente por dicho caudalímetro para así conocer en todo momento el gasto de aire trasegado por el motor. Ésta medida se va a obtener y a registrar directamente durante todo el transitorio gracias al sistema de adquisición de medida Inca.

3.5.5 Sensores para el caudal de combustible

Esta medida se va a obtener y a registrar directamente durante todo el transitorio gracias al sistema de adquisición de medida Inca, por lo que no necesitaremos ningún sensor, ni aparato de medida.

Esta medida, directamente y con los aparatos de medida de que se dispone en la instalación no se puede calcular, pero el programa Inca es capaz de controlar y de modificar tanto el grado de avance de apertura de los inyectores como el tiempo que éstos permanecen abiertos, además también controla la presión de inyección del combustible.

Por tanto, al conocer la densidad del combustible utilizado, el tiempo de inyección y la presión de rail, el sistema de adquisición interpola y directamente obtiene la cantidad de combustible inyectado en cada ciclo del motor.

3.5.6 Sensor para el régimen de giro

Para registrar el régimen de giro del turbogrupo se ha instalado un sistema de tipo inductivo que consiste en un sensor que transmite las alteraciones generadas por el paso de las palas del compresor a una bobina donde varía la impedancia, este cambio de impedancia produce una señal eléctrica que es la que se registra.



Imagen 3.29 Sensor de régimen de giro

El sensor se coloca en la carcasa del compresor, ya que en él las condiciones de presión, temperatura y composición del caudal son mucho menos severas que en la turbina. Se practica un agujero roscado y se sitúa el sensor de tal forma que su superficie sensible y las palas del compresor estén a una distancia de entre 0'1 mm y 0'5 mm, como se puede apreciar en la Imagen 3.30.

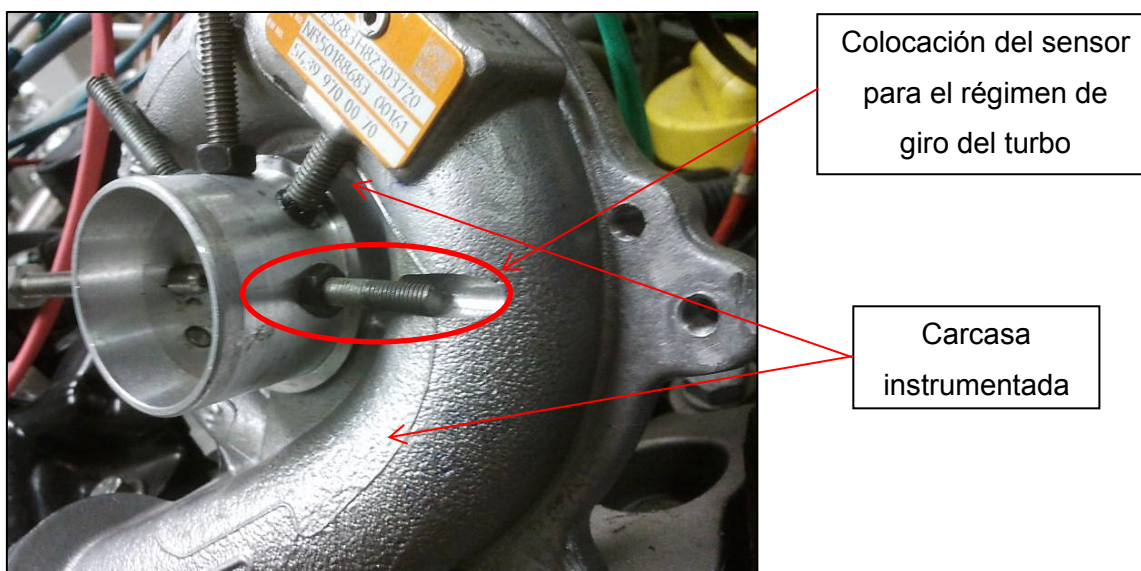


Imagen 3.30 Posición del sensor de régimen de giro en la carcasa del compresor

3.5.7 Revoluciones del motor

Esta medida se va a obtener y a registrar directamente durante todo el transitorio gracias al sistema de adquisición de medida Inca.

Todos los vehículos modernos son capaces de mostrarnos el régimen del motor directamente en el salpicadero de una forma cómoda y práctica. Generalmente, el régimen del motor se mide de la siguiente manera:

El motor consta de una rueda metálica, que gira solidaria al cigüeñal de éste, maciza toda ella salvo porque le falta material en un punto y un sensor magnético enfrentado a la misma, que es capaz de detectar esa falta de material y emitir un pulso. El sistema de adquisición en éste caso es capaz de contar el número de pulsos recibido y por lo tanto de mostrarnos el número de revoluciones del motor en cada momento de funcionamiento de éste.

3.5.8 Régimen instantáneo

Para conocer el régimen instantáneo del motor o la posición de éste en cada momento del ensayo, se utiliza el codificador angular, en nuestro caso, el codificador angular se va a usar como señal (*Trigger*) para que la cadena de medida YokoGawa detecte que el motor ha arrancado y comience a medir durante el tiempo deseado.

Los codificadores ópticos o *encoders* incrementales constan, en su forma más simple, de un disco transparente con una serie de marcas opacas colocadas radialmente y equidistantes entre sí, de un sistema de iluminación en el que la luz es colimada de forma adecuada y de un elemento fotorreceptor. El eje cuya posición se quiere medir va acoplado al disco transparente. Con esta disposición, a medida que el eje gire se irán generando pulsos en el receptor cada vez que la luz atraviese una marca, y llevando una cuenta de estos pulsos es posible conocer la posición del eje.

Sin embargo, existe el problema del desconocimiento en un momento dado de si se está realizando un giro en un sentido o en el opuesto, con el peligro que supone no estar contando adecuadamente. Una solución a este problema consiste en disponer de otra franja de marcas, desplazada de la anterior de manera que el tren de pulsos que con ella se genere esté desplazado 90° eléctricos con respecto al generado por la primera franja. De esta manera, con un circuito relativamente sencillo, es posible obtener una señal adicional que indique cuál es el sentido de giro y que actúe sobre el contador correspondiente indicándole que incremente o reduzca la cuenta que se está realizando.

Es necesario además disponer de una marca de referencia sobre el disco que indique que se ha dado una vuelta completa y que, por tanto, se ha de empezar la cuenta de nuevo. Esta marca sirve también para poder comenzar a contar tras recuperarse de una caída de tensión.

El funcionamiento básico de los codificadores o *encoders* absolutos es similar al de los incrementales. Se tiene una fuente de luz con las lentes de adaptación correspondientes, un disco graduado y unos fotorreceptores.

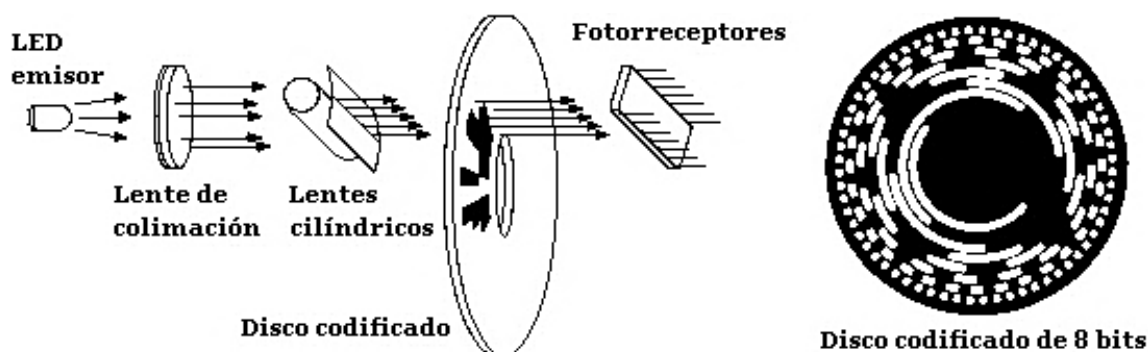


Imagen 3.31 Esquema de un encoder angular

En este caso, el disco transparente se divide en un número determinado de sectores (potencia de 2), codificándose cada uno de ellos según un código binario cíclico (normalmente código de *Gray*) que queda representado por zonas transparentes y opacas dispuestas radialmente. No es necesario ahora ningún contador o electrónica adicional para detectar el sentido del giro, pues cada posición (sector) es codificado de forma absoluta. Su resolución es fija, y vendrá dada por el número de anillos que posea el disco graduado. Las resoluciones habituales van desde 28 a 219 *bits* (desde 256 a 524.288 posiciones distintas).

Normalmente los sensores de posición se acoplan al eje del motor. Considerando que en la mayor parte de los casos entre el eje del motor y el de la articulación se sitúa un reductor de relación N , cada movimiento de la articulación se verá multiplicado por N al ser medido por el sensor. Éste aumentara así su resolución, multiplicándola por N .

En algunos *encoders* absolutos se utiliza otro *encoder* absoluto más pequeño conectado por un engranaje reductor al principal, de manera que cuando éste gire una vuelta completa, el codificado adicional avanzará una posición. Son los denominados *encoder* absolutos multivuelta.

Esta misma circunstancia originará que en el caso de los codificadores incrementales la señal de referencia o marca de cero, sea insuficiente para detectar el punto origen para la cuenta de pulsos, pues habrá N posibles puntos de referencia para un giro completo de la articulación. Para distinguir cuál de ellos es el correcto se suele utilizar un detector de presencia

denominado sincronismo, acoplado directamente al eslabón del robot que se considere. Cuando se conecta el robot desde una situación de apagado, es preciso, ejecutar un procedimiento de búsqueda de referencias para los sensores (sincronizado).

Durante su ejecución se leen los detectores de sincronismo que detectan la presencia o ausencia de eslabón del robot. Cuando se detecta la presencia o ausencia de pieza, o viceversa, se atiende al *encoder* incremental, tomándose como posición de origen la correspondiente al primer pulso de marca de cero que aquél genere. Los *encoders* pueden presentar problemas mecánicos debido a la gran precisión que se debe tener en su fabricación.

La contaminación ambiental puede ser una fuente de interferencias en la transmisión óptica. Son dispositivos particularmente sensibles a golpes y vibraciones, estando su margen de temperatura de trabajo limitado por la presencia de componentes electrónicos.

Las características del codificador angular utilizado son las siguientes:

- Tiene una vida útil mínima de 10 millones de revoluciones con las máximas vibraciones permitidas por el codificador angular
- Rango de temperatura de las superficies de montaje: -30 hasta +100°C
- Rango de temperatura ambiente: -30 hasta +60°C
- Rango de velocidades: 1 hasta 20.000 r.p.m.
- Codificador angular Kistler 2613A

3.6 Control del motor y sistemas de adquisición de datos

Los sistemas de adquisición de datos y control del motor permiten, como su propio nombre indica, tanto controlar el motor como adquirir los datos más relevantes de éste para su posterior procesado y obtener así unos resultados empíricos del ensayo realizado.

3.6.1 Rack de control del banco de ensayos

El rack de control del motor se encuentra situado entre las dos mesas. Con él se pueden controlar un máximo de dos motores simultáneamente.

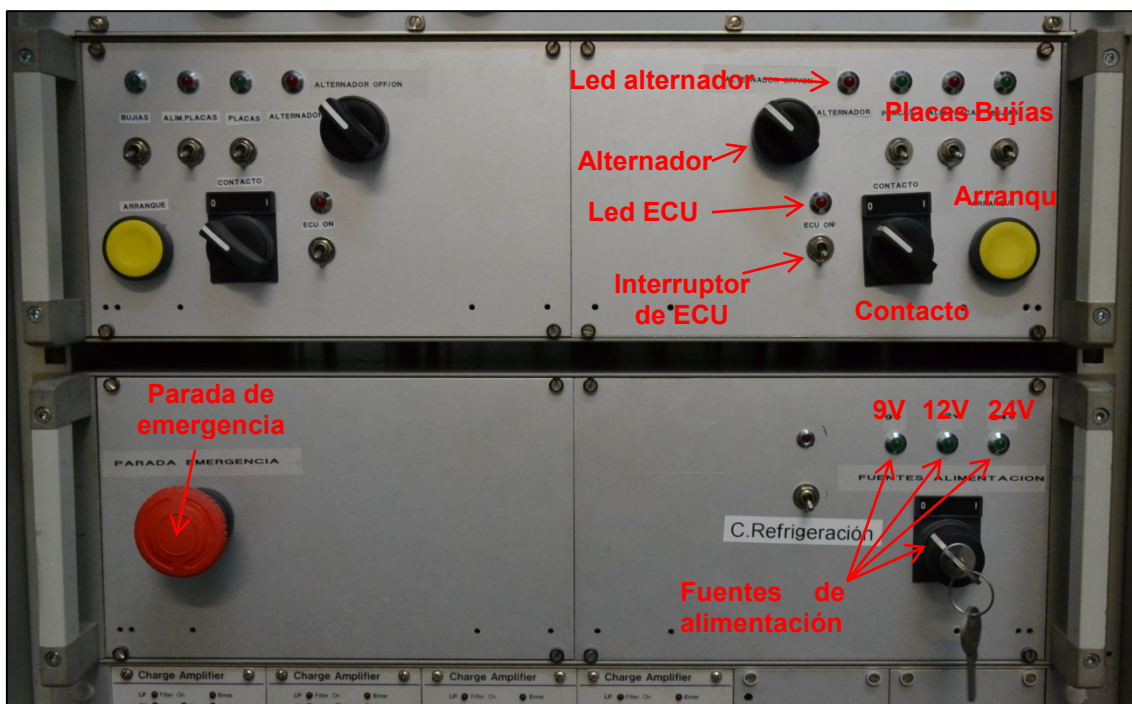


Imagen 3.32 Vista del cuadro de control del motor

En el panel de control encontramos los siguientes dispositivos:

- Leds de estado alimentación placas (On/Off) x2
- Pulsador de seguridad, parada de emergencia
- Leds de estado del alternador (On/Off) x2

- Leds de estado de la E.C.U. (On/Off) x2
- Leds de estado placas (On/Off) x2
- Leds de estado bujías (On/Off) x2
- Interruptor alimentación placas x2
- Llave de alimentación fuentes
- Pulsador de arranque x2
- Interruptor alternador x2
- Interruptor contacto x2
- Interruptor E.C.U. x2
- Interruptor bujías x2
- Interruptor placas x2

Para medir las variables con los distintos equipos es necesario que el cableado de los instrumentos de medida, así como los sistemas auxiliares estén conectados en el motor y comunicados con la sala de control.

3.6.2 Sistema de control del motor (Inca)

El comportamiento total de un vehículo viene determinado por una gran variedad de valores y factores físicos. Estos resultados causan un número enorme de parámetros de control en el *software* de unidad de control electrónico.

El programa Inca permite tanto leer como modificar algunos parámetros de la unidad de control electrónico del motor K9K. Este programa ayuda a determinar datos medidos del motor como las diferentes temperaturas durante el ensayo, el régimen de giro del motor, la cantidad de combustible inyectada en cada ciclo, el porcentaje de apertura o cierre de la T.G.V., además, puede

controlar y modificar infinidad de parámetros del motor, como por ejemplo el grado de avance de la inyección piloto y la principal, o la cantidad de combustible que se inyecta en cada una de ellas.

Aunque en principio, en este proyecto no va a ser necesario, modificar estos parámetros, si es corriente que sea necesario modificarlos para que el motor pueda llegar a arrancar en unas condiciones aceptables y realizar así los ensayos pertinentes, siempre y cuando la cartografía no esté adaptada o se busque mejorarla con los ensayos. De venta al público la unidad de control electrónico que el usuario recibe es “cerrada” lo cual quiere decir que ningún parámetro de ésta podrá ser modificado por el usuario.

En resumen, el Inca no sólo proporciona un instrumento para adaptar a una variedad de unidades de control diferentes, también es un sistema creado para optimizar los diferentes componentes del vehículo. Para poder comunicar el Inca con el motor son necesarios tres componentes: el ordenador, la conexión CAN y la unidad de control electrónico.

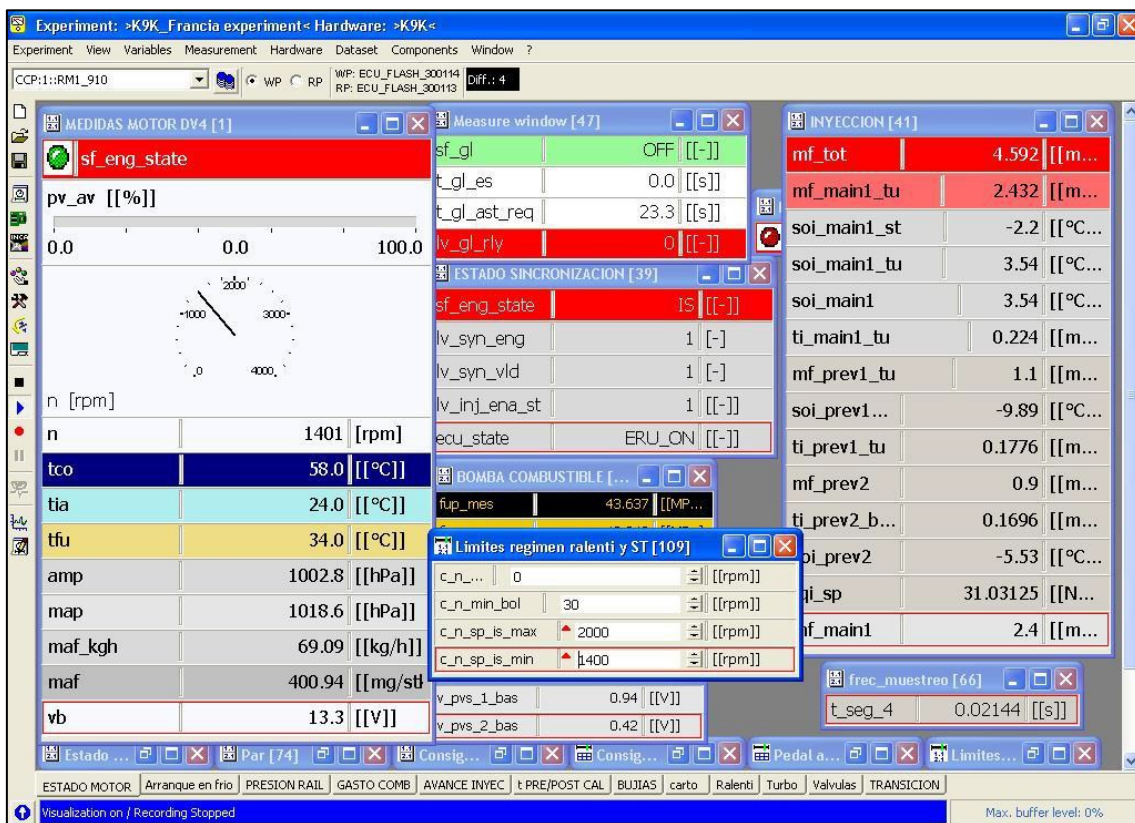


Imagen 3.33 Programa Inca

La conexión a la E.C.U. es efectuada mediante el emulador de almacenaje (el Emulador-*Tastkopf*, sonda) y/o vía K y L-line del interfaz de diagnóstico. La unión CAN al ordenador personal es establecida mediante módulos por una tarjeta PCMCIA integrada en el ordenador y una conexión CAN. Esto permite vincularse eficientemente y de forma universal a todos los ordenadores personales corrientes.

Las propiedades más destacables del *software* de aplicación Inca son las siguientes:

- Ejecutable sobre un ordenador personal Pentium con RAM de 48 MB (recomendada una RAM de 64 MB)
- Puede ser integrado en el proceso de desarrollo para el *software* de unidad de control electrónico
- Puede ser usado en el vehículo, en banco de pruebas, y en la oficina/laboratorio
- Comercializable para encajar unidades de control de alta calidad y económicas
- Sistemas de operaciones: Windows NT 4.0 Y Windows 95
- Comercializable tanto como proyecto como para su uso
- *Hardware* y *software* modular

3.6.3 Sistema de control de parámetros (Samaruc)

Para registrar las temperaturas y las presiones, debido a la gran importancia de éstas durante el proyecto, se ha desarrollado en el C.M.T. una aplicación en LabView la cual nos permite registrar estas variables. Dicha aplicación recibe el nombre de Samaruc.

El Samaruc nos permite obtener un *display* en tiempo real de un gran número de parámetros, como pueden ser: temperaturas, presiones, régimen del turbogrupo.

Además, puede ser modificado para mejorarlo y adecuarlo a las condiciones de cada proyecto. En este proyecto va a ser especialmente imprescindible ya que nos va a permitir simular un pedal y una rampa de aceleración, sin la cual sería imposible alcanzar el régimen deseado en el turbogrupo y en el tiempo estipulado por el fabricante.

Una vez explicado el *software* del Samaruc, se va a pasar a explicar el *hardware* del cual consta el sistema de adquisición. El *hardware* es un *hardware* comercial el cual se puede obtener directamente de la empresa NATIONAL INSTRUMENTS.

En nuestro caso, el *hardware* del sistema de adquisición consta de:

- Dos módulos encargados de medir las temperaturas recibidas de los termopares, descritos anteriormente en el apartado 3.5.3, el módulo tiene el nombre BNC/TC-2095 y se puede apreciar en la Imagen 3.34.



Imagen 3.34 Módulo BNC/TC-2095

Este módulo consta de 32 salidas de termopar, lo cual permite medir 32 temperaturas distintas donde se crea necesario. Contiene además una conexión directa (situada en la parte posterior) que conecta el frontal con el módulo SCXI, el cual será explicado posteriormente, y que permite procesar y obtener los datos recibidos.

- Un módulo de alta velocidad encargado de obtener la señal de los cables coaxiales finalizado con un terminal BNC, encargados de transportar las señales analógicas de bajo voltaje, denominado BNC-2095.
- Un módulo encargado de registrar los datos procedentes de los canales conectados mediante terminales BNC denominado BNC-2090. El cual consta de 22 salidas de conector BNC, preparadas tanto para señal digital como analógica.



Imagen 3.35 Módulo BNC-2090

- Toda la información registrada por los módulos anteriormente vistos, pasa directamente a un módulo SCXI, encargado de obtener la información y transportarla directamente al ordenador de adquisición.



Imagen 3.36 Módulo SCXI

Gracias a todas estos módulos de medida podemos obtener un *display* con las medidas que se desea controlar en tiempo real, también nos permite crear alarmas en caso de que, por ejemplo, la presión de aceite baje por debajo de un nivel crítico, etc.

En el ordenador de adquisición podemos ver el siguiente *display*:



Imagen 3.37 Display del Samaruc

El Samaruc cuenta con dos aplicaciones muy importantes que van a ser desarrolladas a continuación y sin las cuales el proyecto habría sido prácticamente imposible de realizar. La primera de ellas recibe el nombre de registrador y, como su propio nombre indica, es la aplicación encargada de registrar las medidas seleccionadas para su posterior procesado.

Como podemos ver en la Imagen 3.38, en dicha aplicación podemos seleccionar tanto el tiempo que se desea medir, como el nombre y código del ensayo el cual se va a realizar, así como la dirección donde éste va a ser almacenado. Además, permite visualizar las medidas que van a ser registradas, que han sido previamente definidas, independientemente de las que se muestren en el *display* anteriormente explicado.

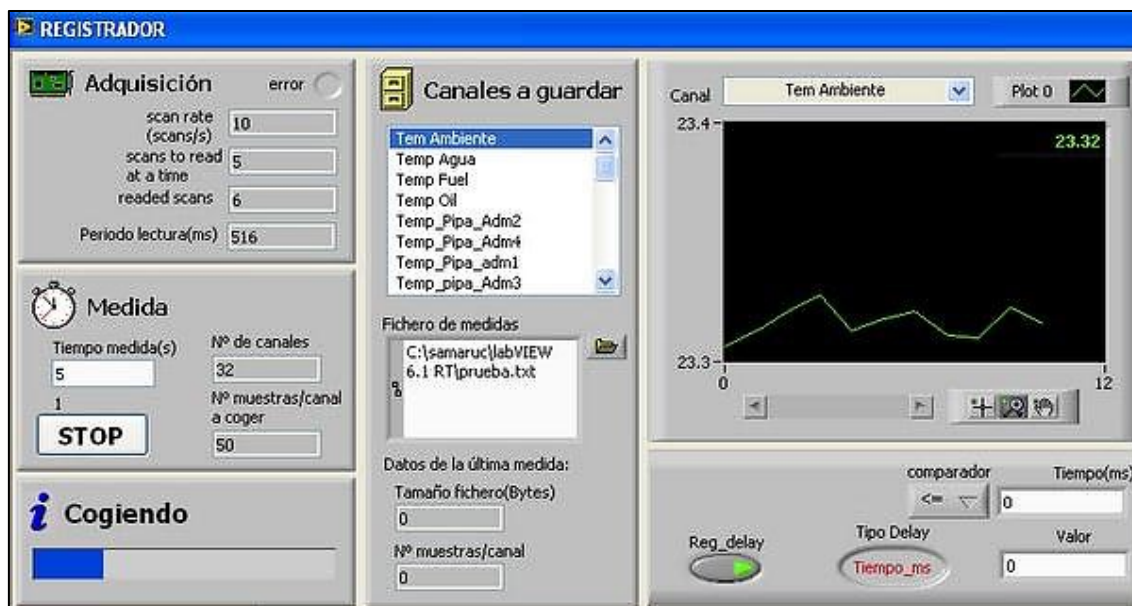


Imagen 3.38 Registrador

En la parte superior izquierda de la imagen se puede observar la información referente a la frecuencia de muestreo a la cual se va a realizar el ensayo, que también ha debido ser previamente definida. Una vez comprobados todos los parámetros, se procede a darle al botón inferior de *Start/Stop* para que el sistema comience a registrar las medidas seleccionadas.

La siguiente aplicación, sin la cual la realización del proyecto probablemente no hubiese sido posible, ha sido desarrollada específicamente por el Centro de Motores Térmicos (C.M.T.) mediante el programa LabView.

La necesidad de crear esta aplicación surge debido a que, como se ha dicho anteriormente, durante la realización de los ensayos es necesario realizar una serie de transitorios, además, una de las condiciones necesarias para estos ensayos consiste en la repetitividad de los mismos, es decir, debemos poder ser repetitivos. Para ello, y puesto que la instalación no consta de un freno motor, es básico controlar cada parámetro durante la realización de los transitorios, y sobretodo controlar que la demanda de pedal que el motor recibe sea la misma en cada ensayo, para asegurarnos la repetitividad del mismo.

Con un accionador mecánico, ya sea un motor eléctrico o aceleradores normalmente usados en salas de ensayo, no se puede asegurar la repetitividad en el porcentaje de pedal mandado al motor.

Por todo esto se ha decidido que la mejor manera de garantizar la repetitividad de los transitorios y la repetitividad del pedal del acelerador es la de actuar, mediante el Samaruc sobre el circuito o esquema eléctrico simulando las resistencias existentes mediante la aplicación LabView.

El esquema eléctrico, que será explicado posteriormente, es el que se puede apreciar en la Imagen 3.39:

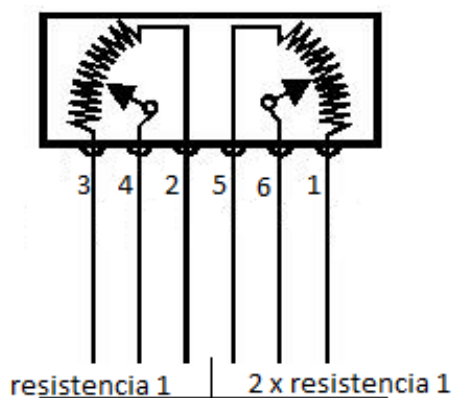


Imagen 3.39 Esquema eléctrico del pedal del acelerador

Como se puede ver en la imagen anterior, el pedal del acelerador del motor está compuesto por un doble circuito, así se garantiza la seguridad del usuario en caso de que uno de los dos circuitos se estropee, pudiendo falsear la medida y el coche acelerar o frenar a su antojo, con el peligro que esto conlleva para el usuario.

La E.C.U., a través de una curva de linealización implementada en la cartografía, transforma la caída de tensión existente entre los bornes de los conectores 4-2 y 6-1 en un porcentaje de pedal de aceleración determinado.

Por tanto, lo que se ha buscado y se ha conseguido, es crear una variación de tensión entre ambos bornes, con la condición de que entre los bornes 6-1 la variación debe ser el doble que entre 4-2 en todo momento, para crear así la simulación del pedal de aceleración físico.

Por lo que, únicamente variando la diferencia de tensión existente entre los bornes de los conectores con dicha aplicación, se puede controlar de un modo rápido, sencillo y fiable el porcentaje de pedal que el motor va a recibir. En la Imagen 3.40 se puede ver la aplicación desarrollada tal y como el usuario la utilizaría.



Imagen 3.40 Aplicación de control del pedal

Se puede observar que la aplicación permite controlar el pedal de aceleración de dos maneras distintas. La primera consiste en subir manualmente el porcentaje de pedal hasta un valor establecido previamente en el tiempo deseado por el usuario, y mantenerse constante en dicho valor indefinidamente como se puede ver en la parte central de la imagen anterior. También se puede elegir, si vemos la parte derecha de la imagen, una rampa anteriormente diseñada y cargarla en la aplicación, con lo cual el pedal del acelerador está totalmente controlado durante el ensayo, tanto en tiempo como en porcentaje, evitando así el error humano, además, esta segunda opción permite la realización y repetitividad de los transitorios, necesaria durante la realización de este proyecto.

3.6.4 Cadena de medida YokoGawa

La cadena de adquisición de datos que se utiliza durante el proyecto es una YokoGawa DL750 de 16 canales. Al elemento en cuestión le llega una señal de positivo y una de negativo como por ejemplo la tensión en el motor de arranque la cual se puede considerar medida directa o la medida de intensidad en las placas que se puede considerar indirecta (medida con la pinza gris).

A continuación en la Imagen 3.41 vemos la cadena de medida que hemos utilizado:

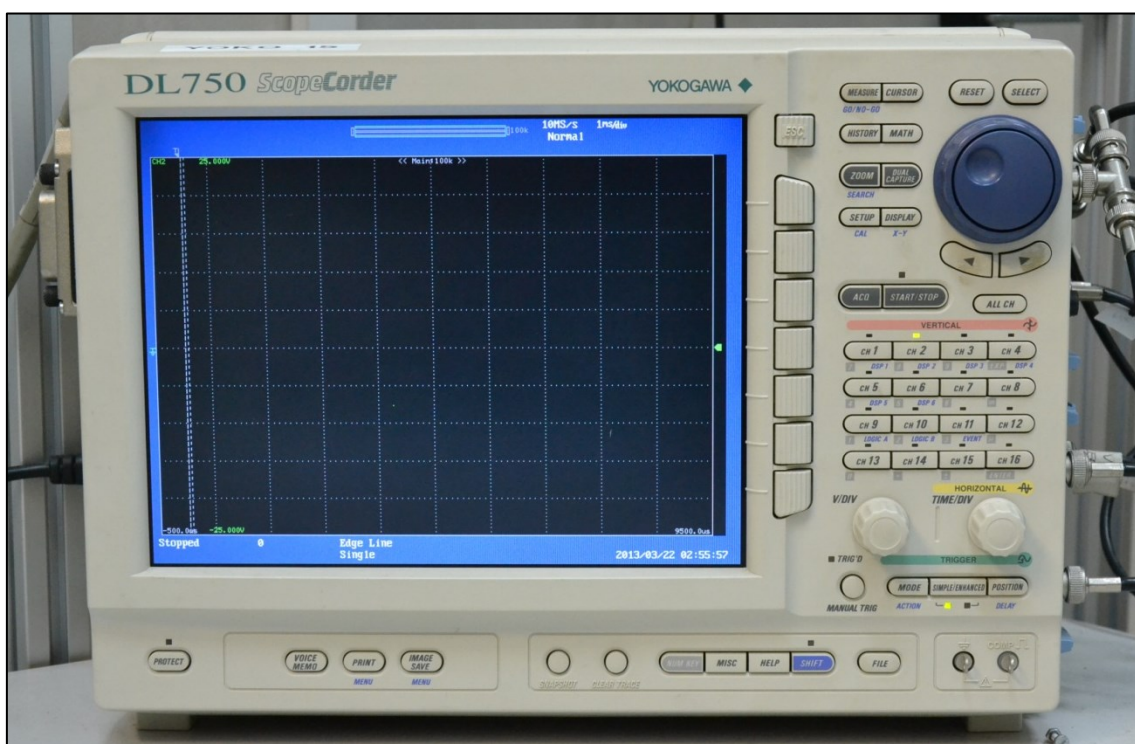


Imagen 3.41 Cadena de medida YokoGawa

En ella se realizan medidas de tensiones, intensidades, presiones, desplazamiento del eje, uno por vuelta, gasto másico de aire, y demás medidas. Es necesario para poder registrar las distintas señales, tomar la señal y llevarla a la cadena de medida YokoGawa, mediante unos cables denominados cables coaxiales o BNC, además es necesario disponer del *software* específico Yoko, versión 2.0.179, desarrollado en la C.M.T. específicamente para esto.

La cadena de medida YokoGawa únicamente permite medir señales que vengan expresadas en forma de tensión eléctrica. Es necesario configurar antes, en el menú General, la frecuencia de muestreo del equipo, la memoria del canal y el número de bloques. La frecuencia de muestreo puede elegirse entre los valores de 10 Hz hasta 10 MHz. Para los ensayos, el valor con que trabajamos fue 100 kHz. La memoria del canal permite valores desde los 1.000 puntos hasta los 16.000.000 de puntos siendo, en nuestro caso 2.000.000 de puntos. De esta manera, el tiempo de grabación del equipo es de:

$$\frac{2.000.000}{100.000} = 20s$$

3.1

Aunque comúnmente éste no es el sistema utilizado para obtener el número de puntos necesarios, de normal se establece en primer lugar la frecuencia de muestreo, una vez tenemos clara la frecuencia de muestreo se establece el tiempo que va a llevar a cabo realizar el ensayo, y con éstas dos variables se obtiene el número de puntos necesarios para tener registrados todos los parámetros durante la duración del ensayo.

El siguiente menú a configurar es el de los Canales. En esta parte se pueden variar el rango de cada canal, así como el modo en que medirá el mismo. El rango a elegir varía discretamente entre los 200 mV y los 800 V; pudiendo medirse en los modos AC (corriente alterna), DC (corriente directa o continua), o Temp (tiempo) o incluso encenderlos o apagarlos a conveniencia si hay algunos canales que no necesitamos, para que el ensayo sea lo más cómodo de procesar posible posteriormente y evitar gran cantidad de datos innecesarios.

En la pestaña Detalles de cada canal se pueden modificar otros parámetros del canal como son:

- La etiqueta
- Número de ciclos
- Número de puntos por ciclo
- Desfase
- Incremento
- Tratamiento
 - Promediar
 - Expandir
- Separador
 - Tab
 - ,
 - ;
 - Espacio
- Precisión
 - Simple
 - Doble
- Coeficientes multiplicativos

Todos estos parámetros tienen como objetivo adecuar las medidas al uso que nos interese en cada caso.

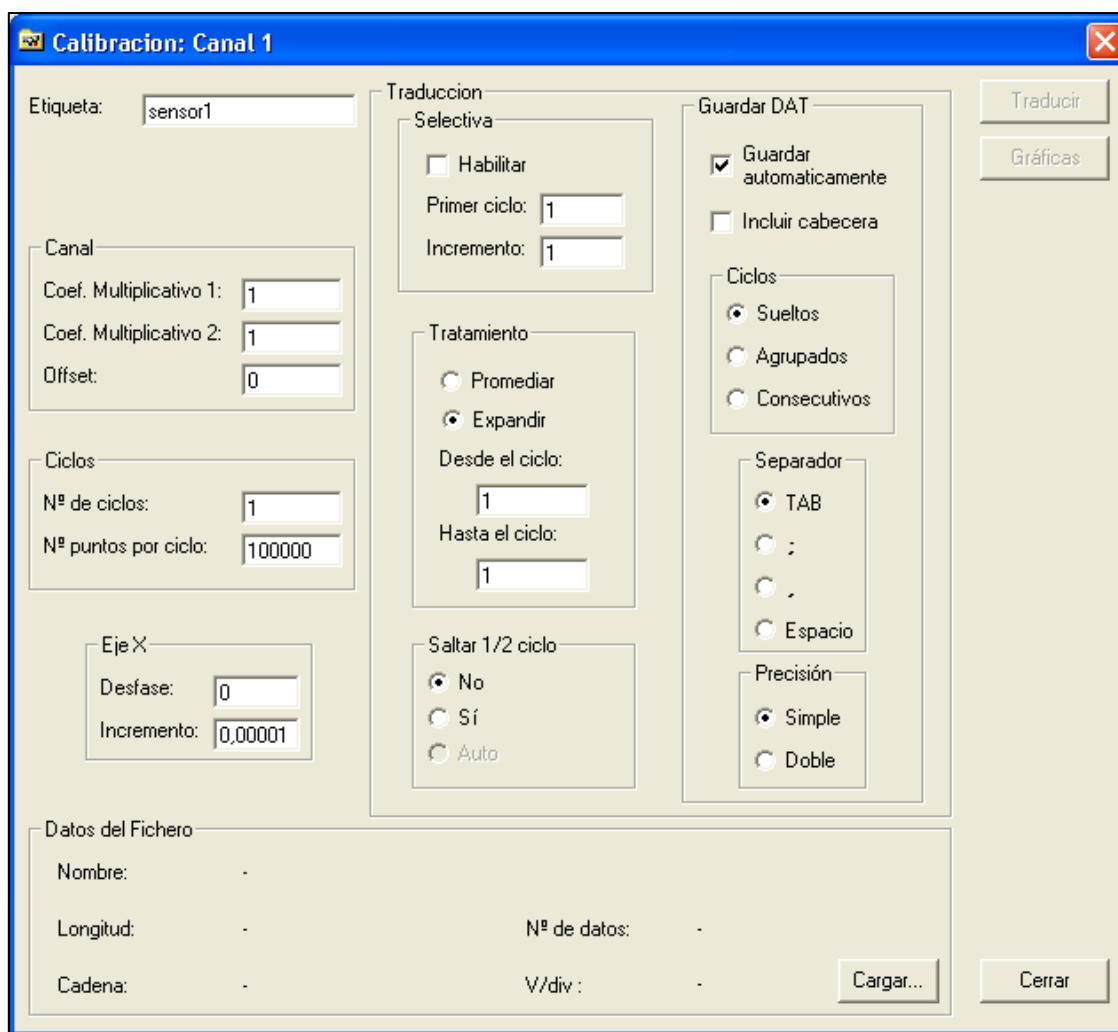


Imagen 3.42 Pantalla de configuración de un canal

Por último está el menú *Trigger*, donde se selecciona el canal que queremos que actúe como disparador de la grabación de la medida (tipo de *trigger*), y el modo de *trigger* que puede ser Normal, Auto o Alevel. La grabación de datos en la cadena YokoGawa se realiza con un retardo o *delay* de 1 segundo, para que de ese modo se pueda apreciar con claridad todas las medidas desde el principio y ver claramente el arranque del motor.

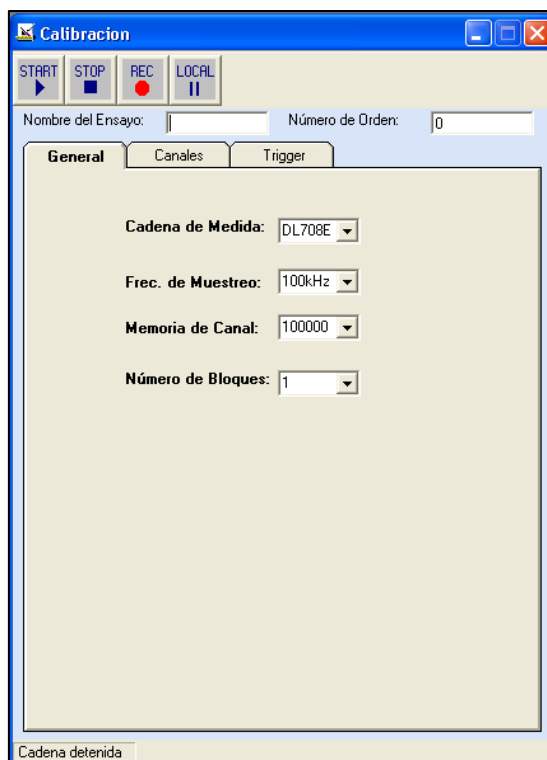


Imagen 3.43 Configuración de la Yoko-General

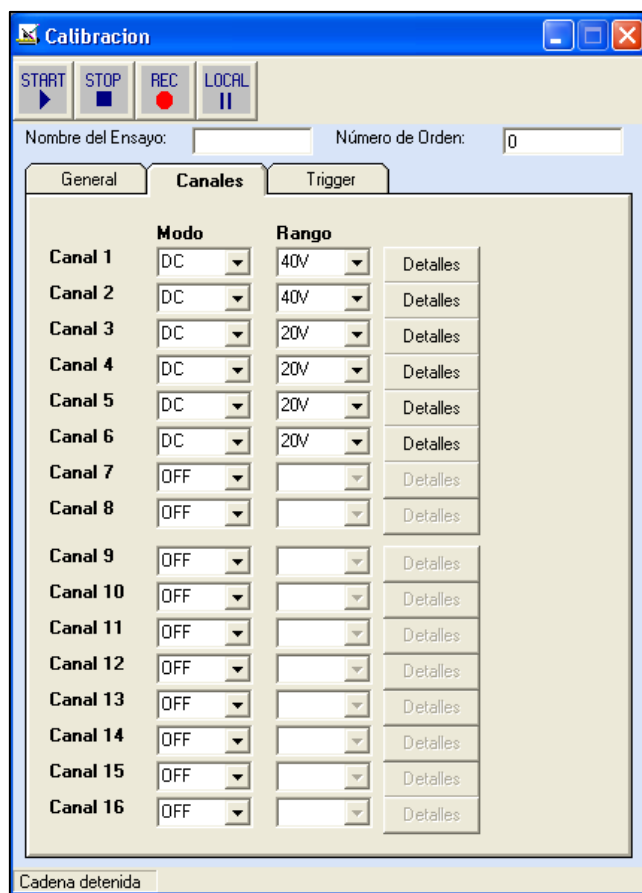


Imagen 3.44 Configuración de la Yoko-Canales

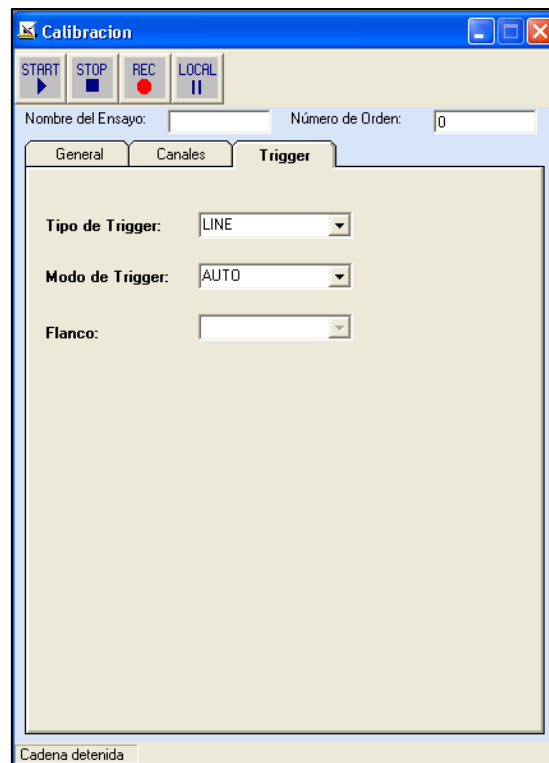


Imagen 3.45 Configuración de la Yoko-Trigger

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA DE ENSAYO

Contenido

4	Metodología de ensayo _____	135
4.1	Introducción _____	135
4.2	Técnica de medida _____	135
4.3	Rutinas _____	139
4.4	Material para ensayar _____	141
4.5	Tareas en el laboratorio _____	143
4.5.1	Calibración de los sensores de proximidad _____	144
4.5.2	Calculo de la máxima excentricidad _____	150
4.6	Tareas en el ensayo _____	155
4.7	Procesado de datos _____	160
4.7.1	Ficheros de entrada _____	161
4.7.2	Ficheros de salida _____	163
4.8	Recomendaciones _____	167

4 Metodología de ensayo

4.1 Introducción

Para la realización de este proyecto, ha sido necesario en primer lugar definir una metodología, la cual abarca desde la calibración de los sensores de medida, hasta el tratamiento de datos final, pasando por definir toda la rutina que se expone a continuación. Por lo tanto en este capítulo de la Memoria descriptiva tenemos por objetivo describir todo el trabajo previo y posterior para el análisis en el movimiento del eje.

Será explicado en este capítulo los diferentes tipos de ensayos que se han realizado durante la realización de este proyecto (para indagar en el comportamiento ante distintas situaciones) y como estos ensayos han sido almacenados y posteriormente procesados con los programas oportunos para poder manejar todos los parámetros y variables que nos han interesado.

El motivo es hacer una guía sencilla de procedimiento para facilitar el trabajo al técnico que ejecuta los ensayos, y comprender de una manera rápida el por qué se han realizado de determinada manera las tareas.

4.2 Técnica de medida

La técnica utilizada consiste en colocar sensores para ver el movimiento del eje turbo. Siempre requeriremos al menos dos sensores para ver el movimiento en dos dimensiones o ejes, colocados a un ángulo de 90° entre sí, y en perpendicularidad con el eje del turbo. Existen muchos parámetros que nos hacen variar diversos parámetros: la colocación de los sensores, la zona de medición, el número de sensores.

Para la colocación de los sensores se intenta utilizar la zona del compresor, ya que en la zona de la turbina, la temperatura es bastante alta (en torno a 950°C), y los sensores no soportarían esa temperatura. Por tanto si medimos en el compresor evitaremos este problema.

Al medir en la zona del compresor podemos utilizar, varias zonas de medida. Una zona sobre la cual podemos hacer que los sensores midan es sobre la rueda del compresor (por encima de los alabes), procurando que quepan los sensores. En la Imagen 4.1 se puede comprobar que el espacio para que mida el sensor es muy reducido, vemos como el espacio entre los alabes y el sensor es muy justo, por lo que en determinados turbos grandes podríamos medir de esta manera, pero no en turbos de tamaño más reducido.

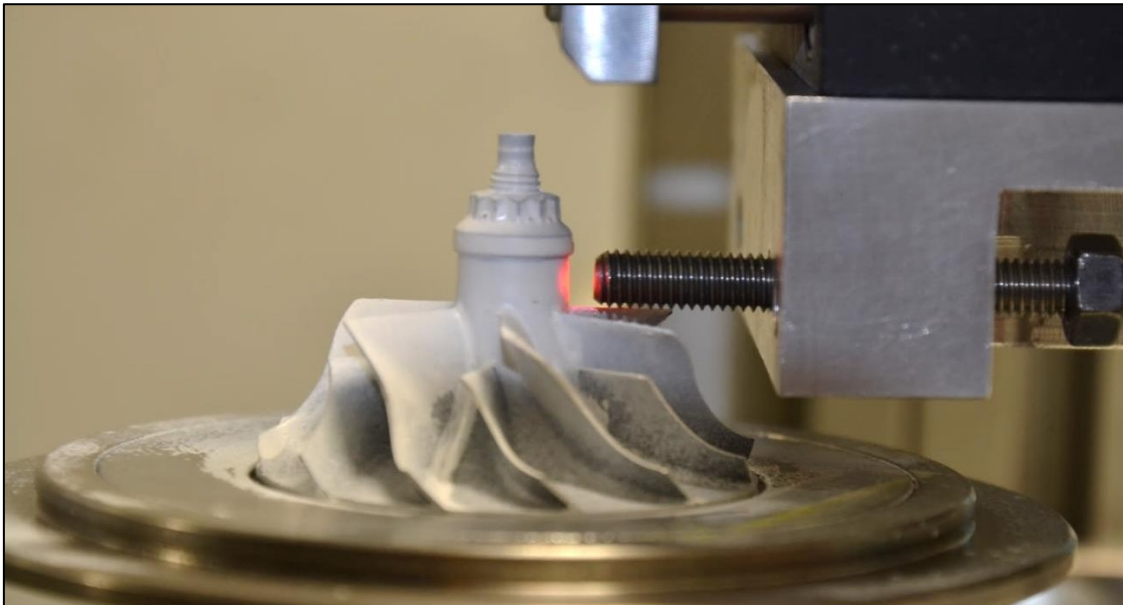


Imagen 4.1 Sensor óptico midiendo sobre la rueda del compresor

Otra zona de medida que podemos utilizar, es sobre una tuerca que podemos añadir a la rueda del compresor. La desventaja de esta solución es que podemos perder el equilibrado que tenía el eje al ser fabricado por la empresa, por lo que tendríamos que volver a equilibrarlo, esta vez con la tuerca incorporada.

Las tuercas han de estar fabricadas en un material ligero para no perturbar el movimiento del eje, por lo que podrían hacerse de aluminio o titanio. Estas tuercas están realizadas en titanio porque si se quiere medir con sensores inductivos, el sensor no mide de manera correcta sobre aluminio, por la naturaleza del sensor, por lo que se decidió que estas tuercas fueran de titanio, para que le afectase la inducción de la tuerca.

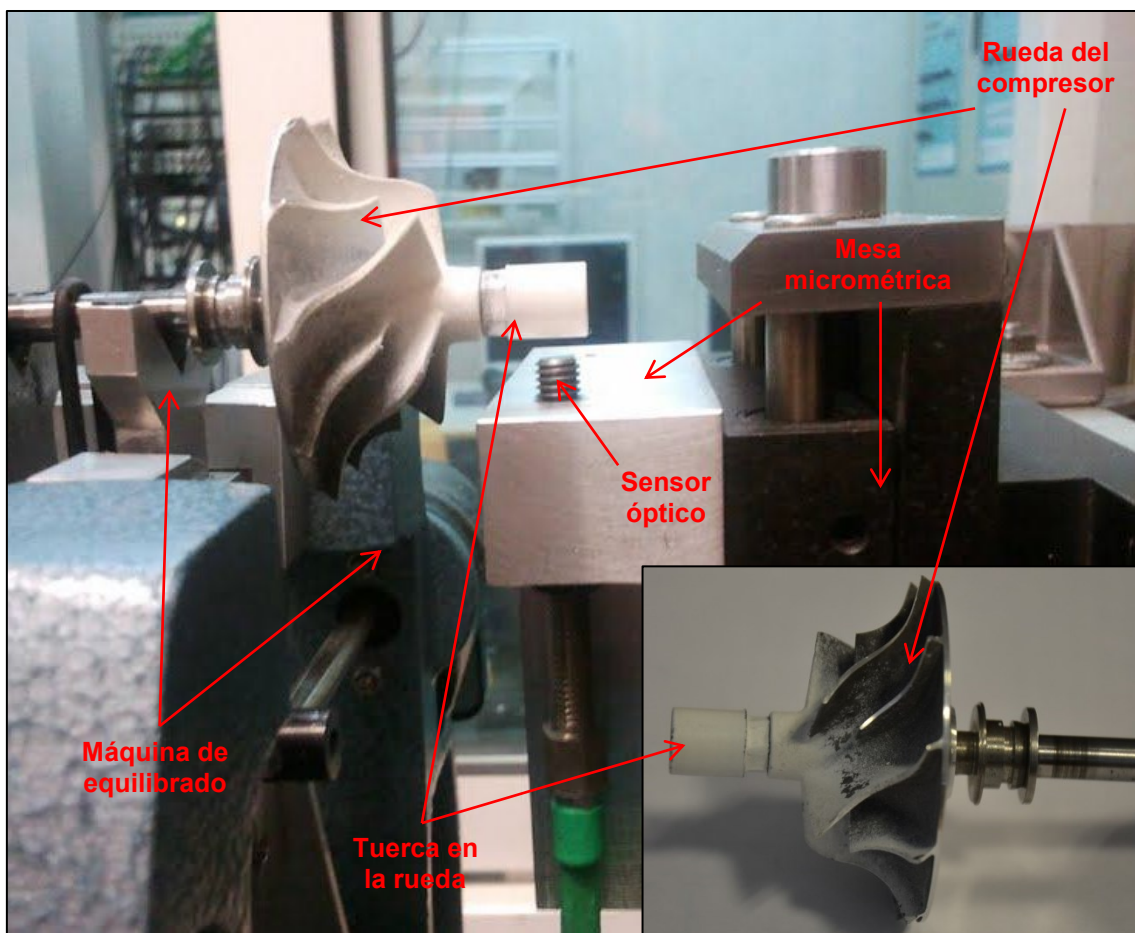


Imagen 4.2 Sensor óptico midiendo sobre la tuerca incorporada a la rueda del compresor

Existen dos tipos de tuerca las que poseen una superficie de medida con un diámetro de 12 mm y las de 9 mm. El sensor óptico como se ha explicado en el capítulo anterior mide de mejor manera si la superficie es plana debido a que mide la reflexión de la luz, por lo que cuanto mayor diámetro mejor. Pero esto no es del todo posible o recomendable en todos los turbos, ya que existen turbos que tiene un tamaño muy pequeño, y necesitaremos colocar la tuerca del 9 mm.

Para el posterior procesado es recomendable que los sensores se instalen horizontal y verticalmente al suelo.

Cuando se realicen los agujeros con rosca, para la inserción de los sensores (proceso denominado instrumentación), se colocaran los sensores a

una distancia determinada y a partir de ahí podremos ver cuánto se acerca o se aleja la rueda del compresor o la tuerca al sensor.

Una vez montados es necesaria la calibración de los sensores (explicado en el apartado 4.5.1). Por lo que después de hacer la calibración, ya podríamos medir.

4.3 Rutinas

Para tener un control y comprobar la evolución de todo el proceso es necesario establecer unos pasos que nos ayuden a la ejecución del proyecto:

1. Se debe de establecer a que situaciones se quiere someter el turbogrupo (baja presión en el circuito de aceite, distintas temperaturas en el aceite, alto régimen, etc).
2. Una vez definidas la situación de ensayos, empezaremos realizando una lista del material que necesitamos.
3. Preparación del material que es necesario en el ensayo. Se incluyen tareas como limpieza, colocación de los sensores, calibración de los mismos en cada ensayo, ya que la calibración varía con el tiempo.
4. Una vez tengamos el material listo, es el momento del montaje en la sala de ensayos. La colocación del turbo como la de los elementos se ha de realizar teniendo en cuenta que no sufran los elementos y de que el turbo esté en funcionamiento de la manera más realista a como lo haría en la realidad.
5. Ajustar previamente la toma de medidas (configurar cadena de medida YokoGawa mediante el programa Yoko y ajustar los parámetros en el Samaruc e Inca).
6. El técnico será el encargado de realizar el ensayo. Ejecutará las ordenes que le habremos comunicado, e intentara recrear las situaciones que hayamos decidido en el paso 1.
7. Desmontaje del material y del turbogrupo ensayado.
8. Análisis del material y del turbo. Comprobar en qué estado está el turbo, si ha sufrido desgastes anormales, si el funcionamiento de los aparatos ha sido el correcto, en caso negativo averiguar su causa.

9. Procesado de datos y sus conclusiones. Con este apartado acaba todo el proceso de la rutina ya que es nuestro objetivo. Esta labor se efectuara mediante el programa MatLab, y nos ayudara a resumir y concentrar los datos del ensayo y elaborar nuestras propias conclusiones, de manera más eficiente.

4.4 Material para ensayar

Para ensayar necesitamos cierto material que nos es suministrado por la propia marca interesada en el estudio de sus productos, como los turbogrupos en este caso, o bien suministrada por el departamento, como es el caso de sensores varios. A parte de esto necesitaremos elementos que tendremos que fabricar nosotros como puedan ser los elementos que hacen acoplar el turbo al motor.

- Comenzando con los turbogrupos, cabe decir que son turbos utilizados comúnmente en vehículos de venta al público.
- Los sensores que se han utilizado han sido dos sensores ópticos, y también dos sensores inductivos. Ambos sensores tienen distinto tipo de construcción pero a modo de funcionamiento son similares.
- También requeriremos una tuerca como la que hemos mencionado en el apartado 4.2 y la Imagen 4.2, pero solo dependiendo del tamaño y las características del turbo.
- Válvula de caudal en determinados ensayos (que veremos más adelante). Esta válvula puede ser vista en la Imagen 4.3.

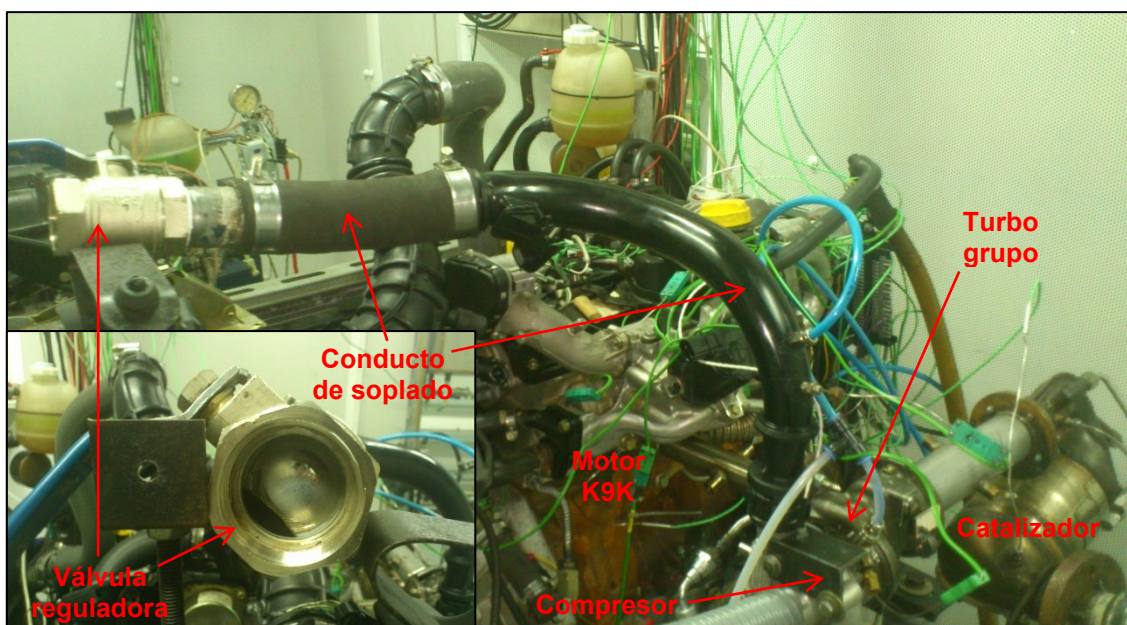


Imagen 4.3 Válvula para regular el caudal suministrado por el compresor

- Cables varios como coaxiales, de alimentación, alargadores de corriente o enchufes múltiples para que llevar la electricidad a todos los elementos que se necesiten.
- Circuito externo de lubricación para generar distintas presiones y distintas temperaturas por medio de distintos *by-pass*, en este circuito se incorporara un filtro de aceite.
- Acoples del turbo al motor mediante tubos hechos a medida, con sus juntas y su tornillería, además de piezas que pueda requerir.
- Fuentes de alimentación de 12 V o 24 V, según requiera el sensor.

4.5 Tareas en el laboratorio

En primer lugar necesitamos estudiar como es el turbo grupo. Nos tenemos que fijar primero donde pueden ir los sensores en la carcasa del compresor. Hay que tener en cuenta que la mayoría de ejes de turbos vienen equilibrados con una muesca como la que se muestra en la Imagen 4.5. Con esta muesca de equilibrado los sensores harán una mala medición, ya que estarán midiendo una distancia que no corresponde con el movimiento del turbo. La superficie debe de ser lo más estable posible para que los únicos movimientos que mida el sensor sean debidos a su propia rotación. Una vez decididos, calculamos la distancia y hacemos un plano para indicar la distancia a la que se tiene que hacer el roscado.

La instrumentación consistirá en operaciones tales como: eliminar material que impida la colocación del sensor, aplanar la superficie donde estará colocada la tuerca y realizar la rosca a la métrica que corresponda. Las carcasas suelen ser de aluminio, por lo que habrá que tener cuidado a la hora de realizar el mecanizado, ya que puede derretirse el material. Todo esto estas operaciones deben de ser suministradas al tornero en el taller de una forma clara y ordenada. La Imagen 4.4 es un buen ejemplo de una carcasa instrumentada.

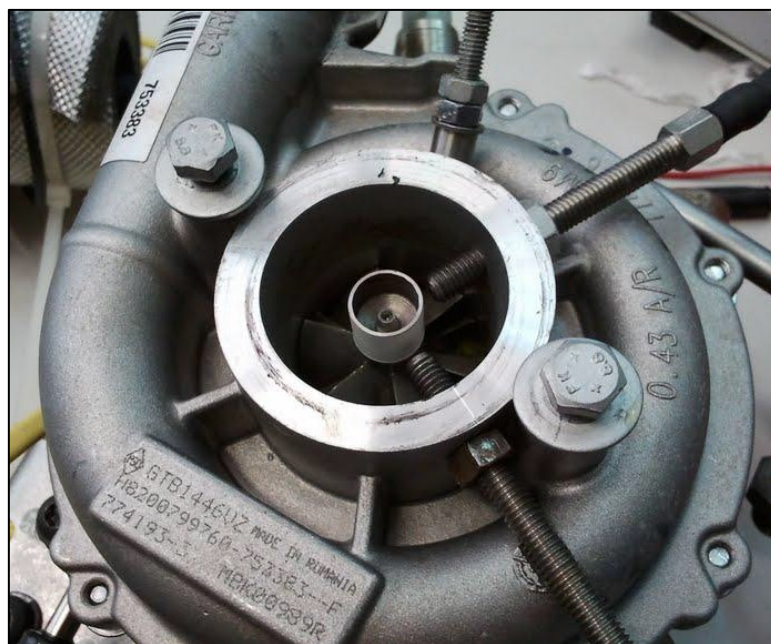


Imagen 4.4 Carcasa instrumentada

Otra tarea que es muy recomendable, es pintar de color blanco la superficie de medida del sensor óptico, ya que debido a su manera de funcionar necesita una superficie que reflecte la máxima luz posible. Esto queda representado en la Imagen 4.5.



Imagen 4.5 Rueda del compresor con una muesca de equilibrado pintada de blanco

Otra tarea a realizar que debemos hacer siempre es la realización de juntas de grafito para unir el turbo a los acoples con una mayor estanqueidad. Nunca será recomendable reutilizar las juntas, ya que pueden estar deterioradas y no tenemos la certeza de que sean estancas.

4.5.1 Calibración de los sensores de proximidad

Para poder obtener medidas de desplazamiento en un eje, es necesario realizar una calibración de los sensores. La calibración se define como el procedimiento de comparación entre lo que indica un instrumento y lo que debiera indicar de acuerdo a un patrón de referencia con valor conocido. Cabe decir que es aconsejable una calibración por ensayo y por sensor.

El principio de los sensores es que ofrece una señal en voltaje por una distancia dada y mediante una calibración la tenemos que pasar a una

determinada distancia en milímetros. Para ello roscamos el sensor en la mesa micrométrica. A continuación en la Imagen 4.6 se muestra el esquema de montaje del sensor.

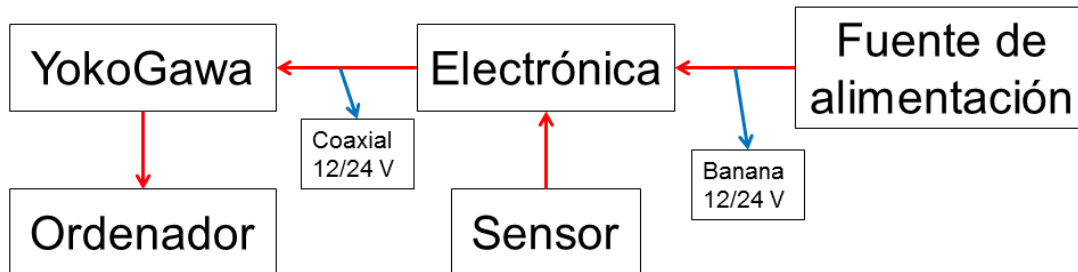


Imagen 4.6 Esquema de montaje de un sensor

Una vez hayamos realizado estos pasos es necesario establecer la cabeza del sensor a una distancia conocida que sepamos. Estas distancias varían dependiendo del tipo de sensor por lo que es necesario leerse el manual o conocer los intervalos de funcionamiento de dichos sensores. El tipo de calibración que hemos realizado ha consistido en referenciar distancia a voltaje. Con la Imagen 4.7 entenderemos mejor lo explicado con anterioridad.

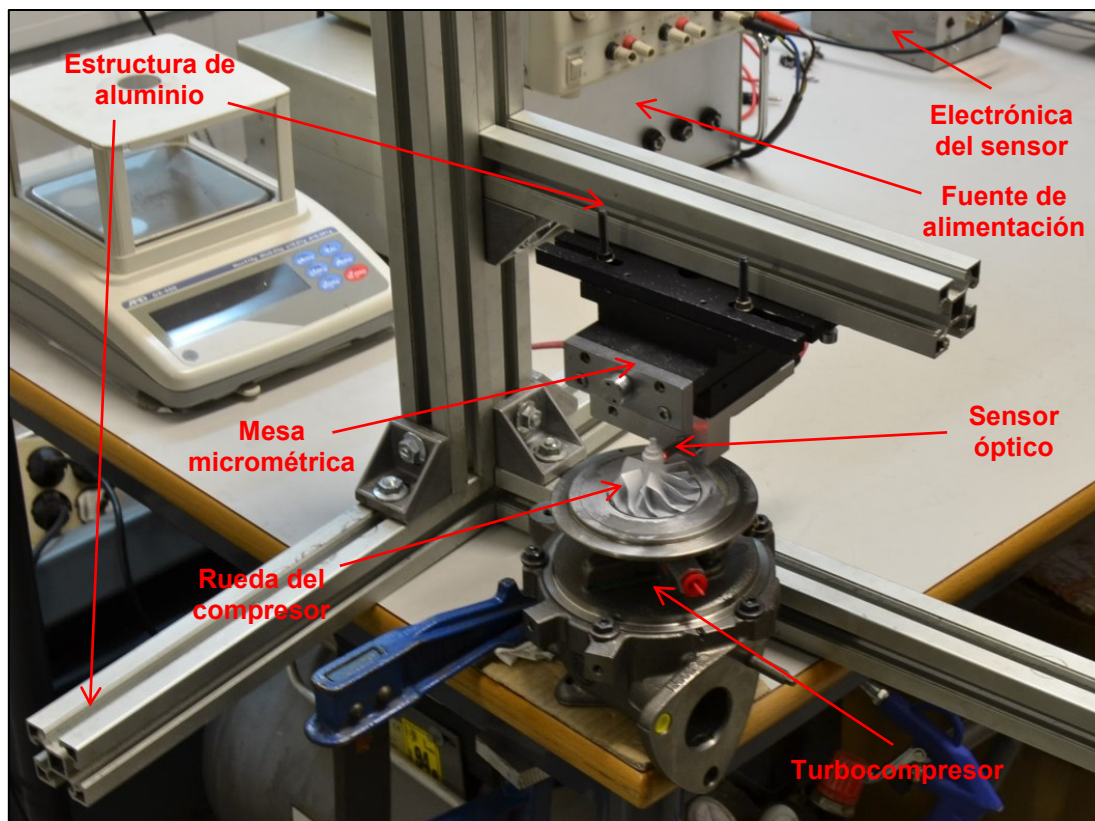


Imagen 4.7 Colocación de elementos en el momento de calibrar

En ese momento con el ordenador y el programa Yoko tomamos el valor de medida del voltaje del sensor a la distancia marcada y obtenemos la media. Con la Imagen 4.8 que se muestra a continuación el proceso se entenderá con mayor facilidad.

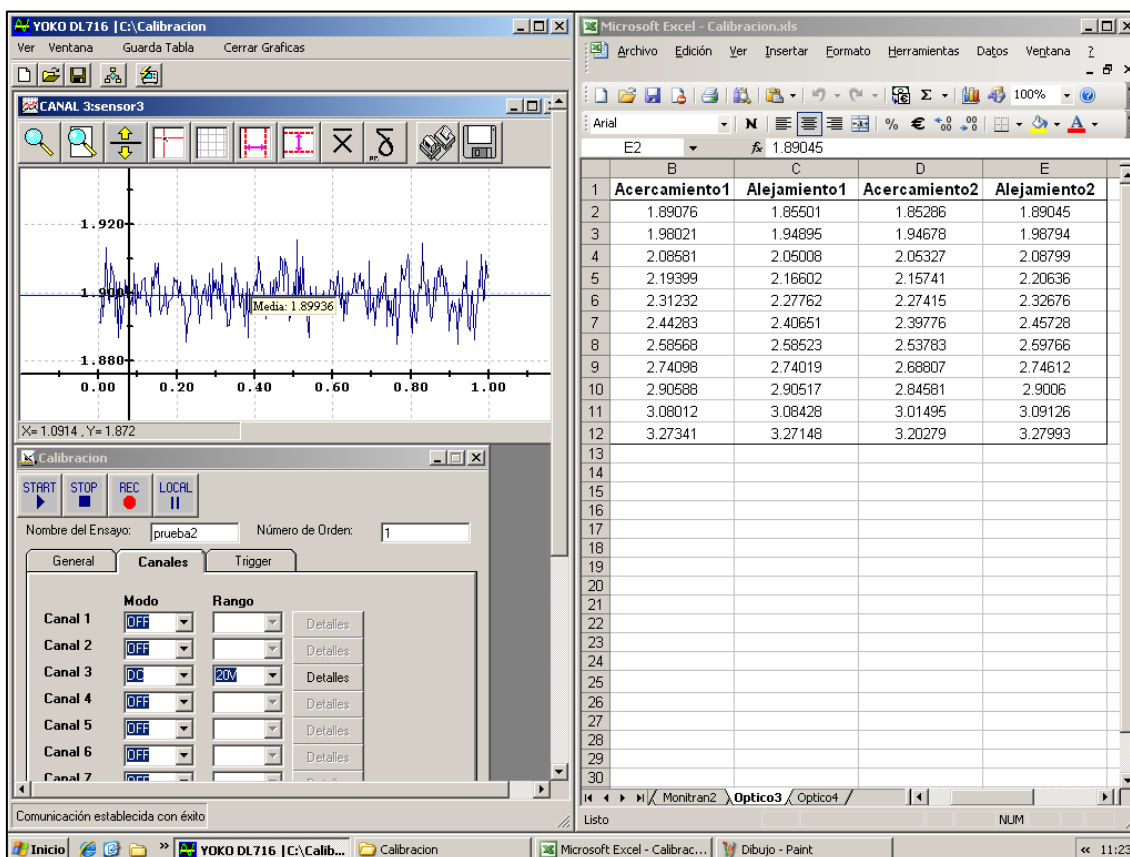


Imagen 4.8 Obtención de un valor de voltaje a una determinada distancia

En la parte de la izquierda de la Imagen 4.8 se muestra como el programa ha obtenido un valor de voltaje correspondiente a una distancia que hemos establecido mediante la mesa micrométrica. A continuación en la Imagen 4.9 se muestra como no debe ser tomada por correcta una medida.

En la parte izquierda de ambas imágenes (Imagen 4.8 e Imagen 4.9), se puede comprobar como los dos valores de voltajes son distintos. En la primera imagen vemos la forma correcta de tomar un valor correcto de voltaje, este valor es constante y carece de ondulación en torno a su media. En cambio en la Imagen 4.9 sí que hace una pequeña ondulación. Por tanto intentaremos que la toma de valores sea lo más estable posible y no exista fluctuación.

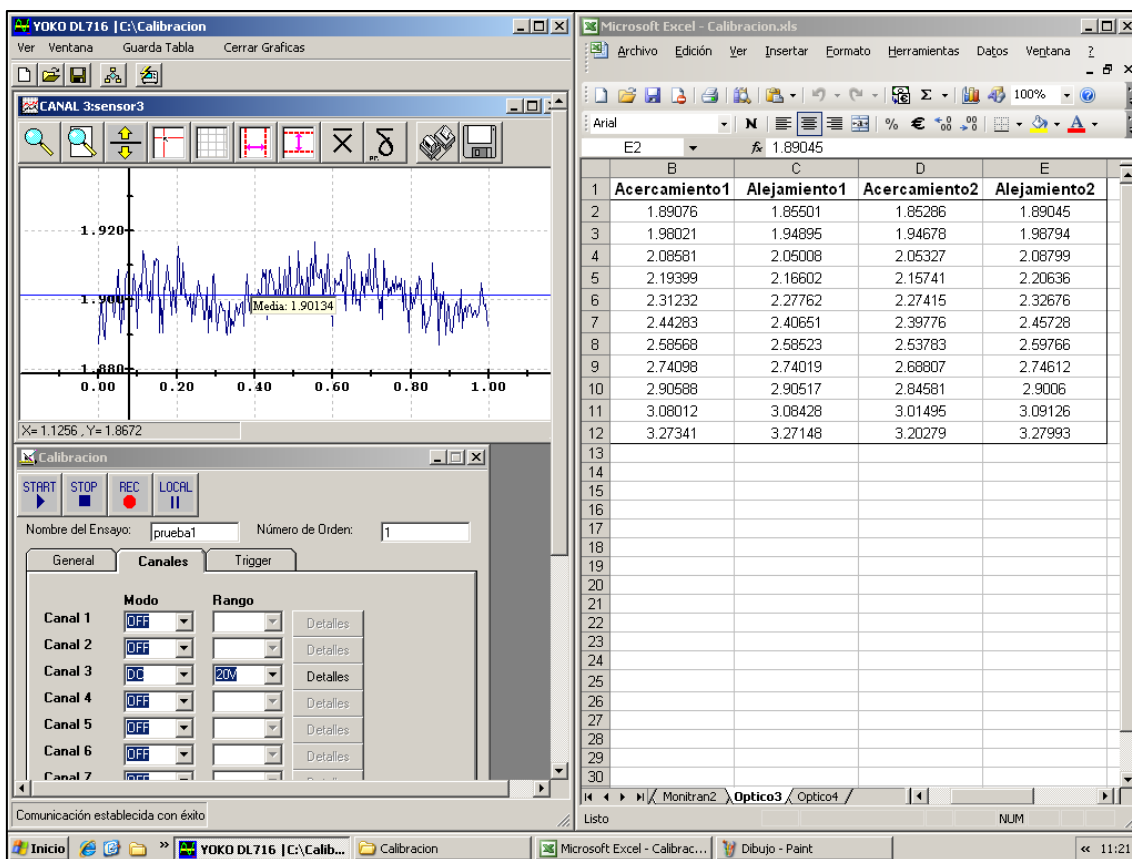


Imagen 4.9 Obtención de un valor de voltaje con ligera fluctuación

Una vez obtenido todos los valores medidos con el programa Yoko, utilizaremos a partir de ahora el programa Excel. En la parte de la derecha de la Imagen 4.8 tendremos que rellenar una tabla, que se ilustra a continuación.

Sensor 3	Acercamiento1	Alejamiento1	Acercamiento2	Alejamiento2
3,5 mm	1,89076	1,85501	1,85286	1,89045
3,4 mm	1,98021	1,94895	1,94678	1,98794
3,3 mm	2,08581	2,05008	2,05327	2,08799
3,2 mm	2,19399	2,16602	2,15741	2,20636
3,1 mm	2,31232	2,27762	2,27415	2,32676
3 mm	2,44283	2,40651	2,39776	2,45728
2,9 mm	2,58568	2,58523	2,53783	2,59766
2,8 mm	2,74098	2,74019	2,68807	2,74612
2,7 mm	2,90588	2,90517	2,84581	2,9006
2,6 mm	3,08012	3,08428	3,01495	3,09126
2,5 mm	3,27341	3,27148	3,20279	3,27993

Tabla 4.1 Tabla de calibración

En la Tabla 4.1 se rellena las columnas con la media del voltaje correspondiente a la distancia que indica la fila. En ese momento obtendremos una tabla que relaciones voltaje con distancia. Se realiza dos acercamientos y dos alejamientos para tener una mayor seguridad en la medida, haciendo hincapié con la repetibilidad.

En el siguiente paso realizaremos la gráfica de todos los puntos como se muestra después en la Imagen 4.10.

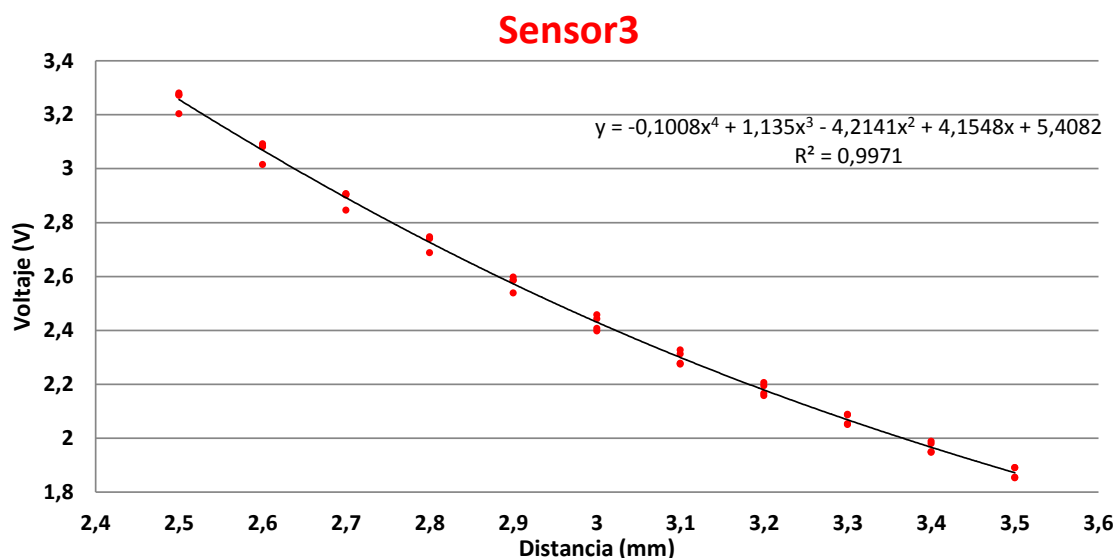


Imagen 4.10 Curva de calibración

Observamos que en el eje Y esta la escala de voltajes, y en el eje de las X aparecen las distancias. En la parte de la derecha de la curva vemos una ecuación polinómica de cuarto grado que se aproxima a todos los puntos rojos graficados. Además en la parte inferior de la ecuación figura la dispersión (representado con el valor R) con la que se relaciona los puntos graficados y la curva obtenida (el valor máximo es 1, en ese caso no habrá diferencia entre los puntos graficados y la curva).

Al acabar de obtener la curva de calibración, debemos observar como es la curva, es decir si, describe una trayectoria uniforme como la mostrada en la Imagen 4.10, o sin embargo se caracteriza por dos zonas de medida. Esto puede ser ejemplificado en la Imagen 4.11, que aparece a continuación.

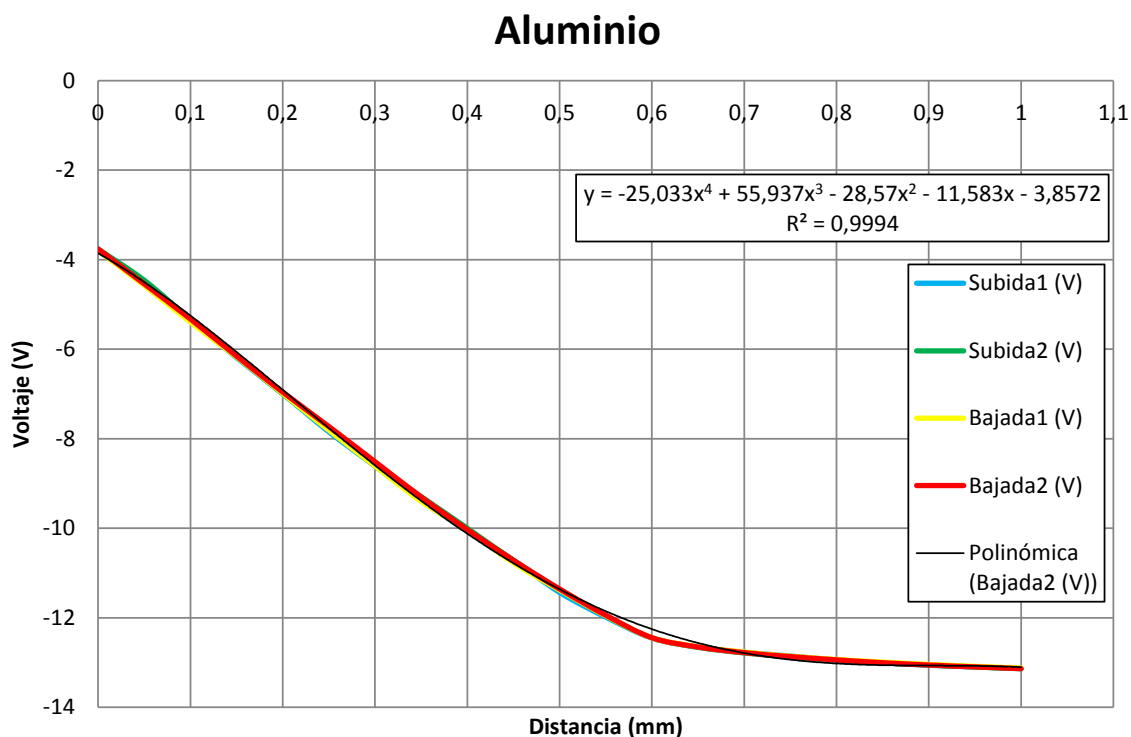


Imagen 4.11 Curva de calibración con distintas zonas de comportamiento

En la imagen superior vemos como la zona de medición del sensor tiene dos comportamientos claramente diferenciables. La primera zona describe una recta desde 0 mm hasta 0`6 mm aproximadamente, seguidamente sigue una recta desde 0`6 mm hasta 1 mm.

En este ejemplo también podemos comprobar que la segunda zona no mide con tanta precisión como la primera. Esto es debido a que para un rango de determinado de distancia, apenas varía el voltaje. En cambio en el primer tramo la recta nos demuestra que existe una relación entre la distancia y el voltaje más fiable, debido a que existe más variación en el voltaje.

Independientemente del tipo de curva existe una zona de medida óptima a la que debemos colocar los sensores. Para colocarlos a la zona que deseemos, necesitamos conocer el voltaje de esa distancia (esto puede ser obtenido mediante la curva de calibración). Con lo cual necesitamos mediante el roscado del sensor a la carcasa dejarlo aproximadamente marcando el voltaje deseado en esa distancia establecida previamente.

Realizando todos los pasos anteriores podemos concluir la calibración y el montaje que necesitamos para poder medir de manera correcta.

4.5.2 Cálculo de la máxima excentricidad

Una vez obtenidas las curvas de calibración para los sensores se procede a realizar un ensayo para calcular la máxima excentricidad del turbogrupo que posteriormente va a ser colocado en el motor mediante los acoples pertinentes.

El ensayo de máxima excentricidad consiste en obtener, para cada turbogrupo, el valor máximo de movimiento del eje que éste puede tener, es decir la holgura existente entre el eje y el turbo. Esto se hace forzando el eje del turbogrupo hacia una posición conocida y registrando la medida con los sensores. De esta manera hallaremos el desplazamiento máximo que el eje del turbogrupo puede sufrir en condiciones normales de funcionamiento y comprobar así que la holgura del turbo no va a aumentar durante la realización del ensayo, lo cual sería un claro síntoma de desgaste o rotura del turbogrupo.

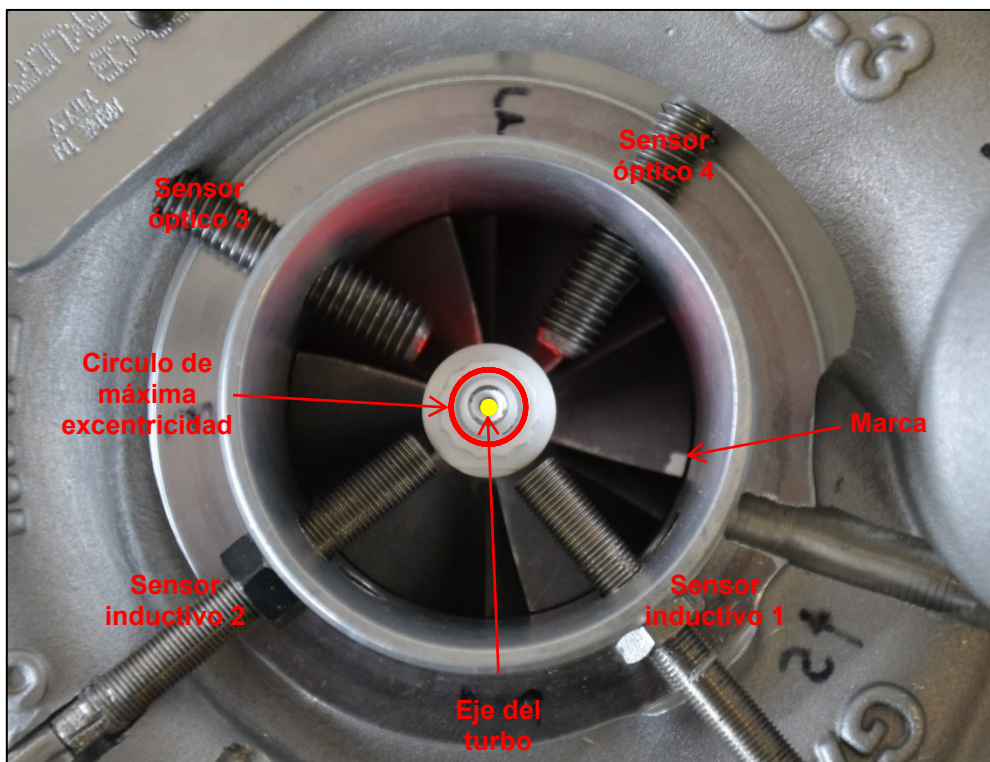


Imagen 4.12 Máxima excentricidad

Para empezar unimos la carcasa (con los sensores ajustados a la distancia que queremos) con el turbogrupo. Después realizamos sin que el eje gire, una vuelta completa forzando el eje con el dedo para comprobar la holgura que existe entre el *housing* y el eje (esto queda ilustrado en la Imagen 4.12), acción que deberemos de medir mediante el programa Yoko. En otras palabras y viendo la imagen anterior, debemos hacer pasar el eje del turbo (punto amarillo) por la máxima excentricidad (círculo rojo), sin girar el eje del turbo (manteniendo la posición de la marca sin moverse).

A continuación giraremos el eje 45° (para ello tomaremos referencia de una marca que existe en unos de los alabes) y volveremos a realizar la misma operación, y tomaremos la medida, así hasta completar una vuelta. En la Imagen 4.13 se muestra como es una medida de máxima excentricidad.

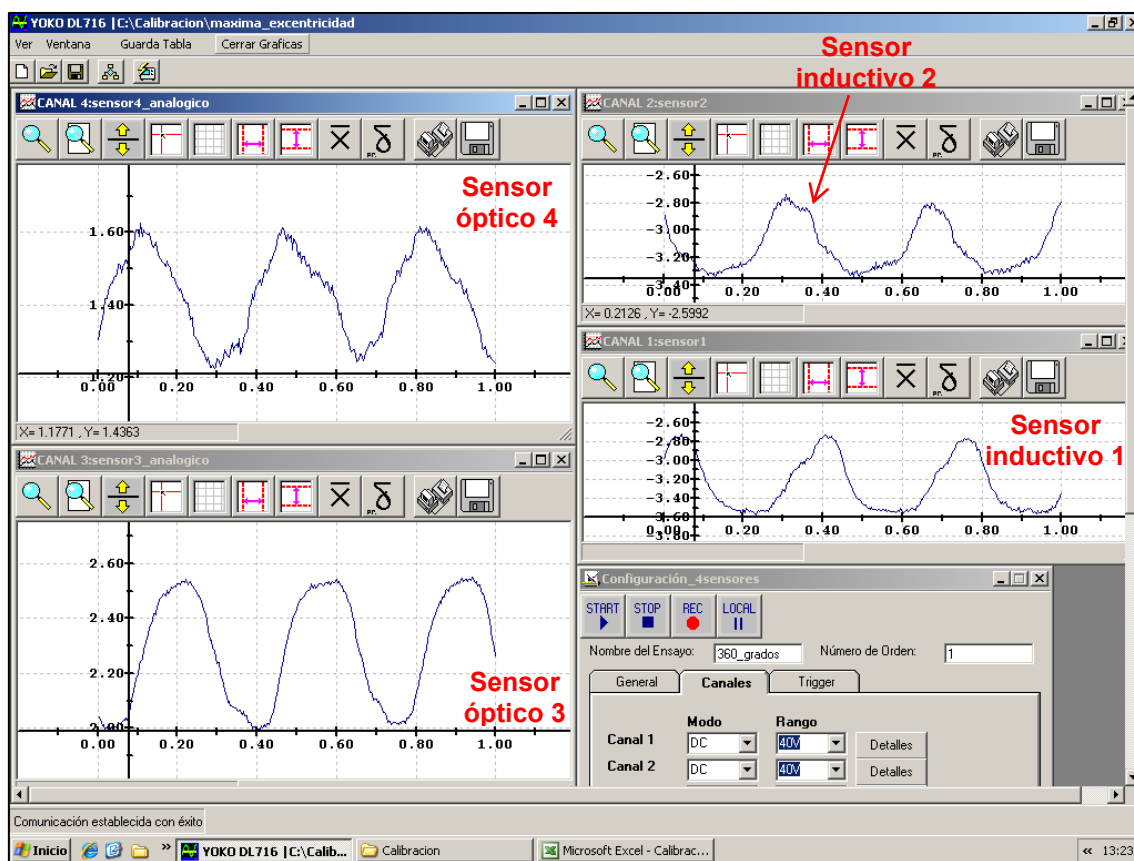


Imagen 4.13 Medida de máxima excentricidad

Las ondulaciones indican como se está alejando o acercando el eje al sensor. En este ejemplo (Imagen 4.12 e Imagen 4.13), observamos que el sensor 2 está indicando que el eje está lejos, por tanto el sensor enfrentado, el sensor 4 indica que el sensor está cerca, por tanto la medida es coherente, también sucede lo mismo para el sensor 1 y 3.

Una vez tenemos todas las medidas las graficamos en el programa Excel. En la Imagen 4.14 se puede ver un ejemplo de ello.

Máxima excentricidad

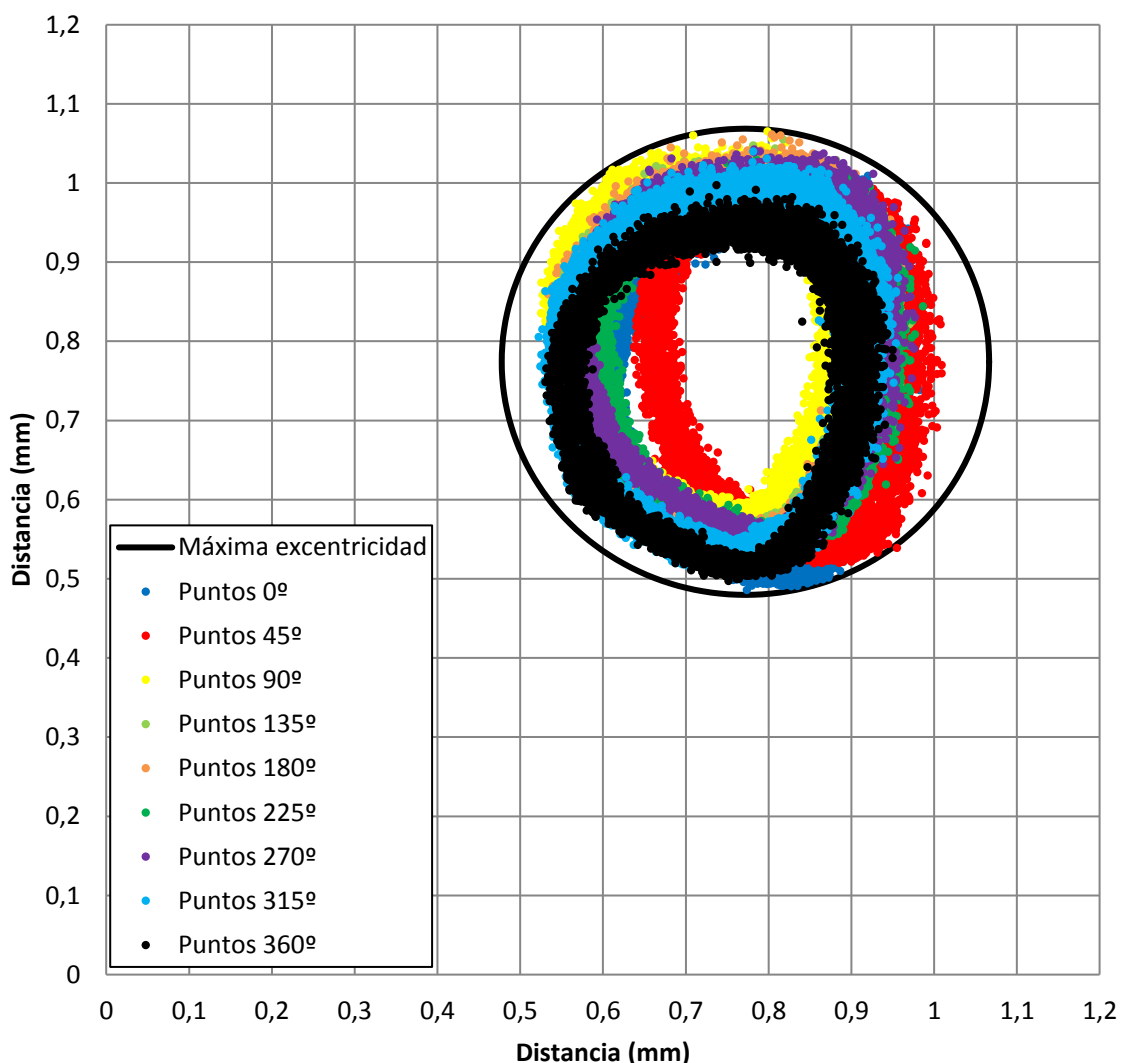


Imagen 4.14 Máxima excentricidad calculada

Una vez graficados los puntos de todos los ángulos, aproximamos una circunferencia (como la que se muestra de color negro en la imagen) que contenga a todos los puntos.

Esta circunferencia se ha obtenido calculando el máximo y el mínimo valor en el eje X y a continuación sacando el valor medio, y de forma idéntica para el eje Y. Una vez calculados los valores medios (x_m e y_m), se obtiene el centro de la circunferencia de máxima excentricidad. Se calcula la distancia de todos los puntos graficados anteriormente (puede verse un ejemplo en la Imagen 4.14) con dicho centro, y se puede averiguar con Excel cual es la distancia máxima del punto más alejado con respecto al centro. Una vez se tiene el centro y la distancia máxima, la circunferencia de máxima excentricidad puede ser graficada. A continuación se exponen las ecuaciones paramétricas para cada eje, que se han usado para el cálculo:

$$X = x_m + d \cdot \cos(\alpha)$$

4.1

$$Y = y_m + d \cdot \text{sen}(\alpha)$$

4.2

Donde x_m e y_m es el valor del centro, d es el valor de la distancia y α es el ángulo que se necesita para barrer toda la circunferencia. Una vez hayamos dado valores al ángulo para cubrir una vuelta, esto nos generara unas coordenadas en X e Y con las ecuaciones 4.1 y 4.2, donde estos puntos representan la circunferencia de máxima excentricidad que pueden ser graficadas.

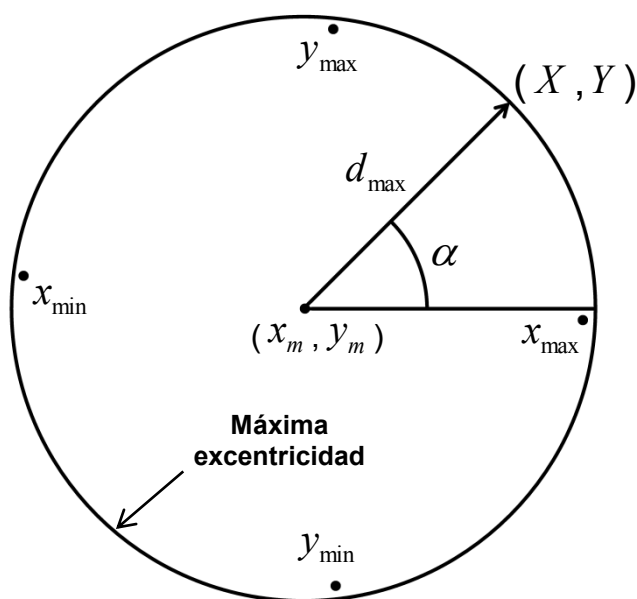


Imagen 4.15 Esquema de los parámetros para el cálculo de la máxima excentricidad

Es en ese momento donde ya se habrá realizado la circunferencia correspondiente a la máxima excentricidad. En la Imagen 4.15 puede verse un esquema de la máxima excentricidad con los parámetros anteriores.

4.6 Tareas en el ensayo

En las siguientes líneas se describe todas las tareas necesarias que se deben realizar en el momento del ensayo. Este apartado nos ayudará a tener un control sobre que es necesario tener en cuenta en la sala de ensayos para que nuestras pruebas sean consideradas como válidas.

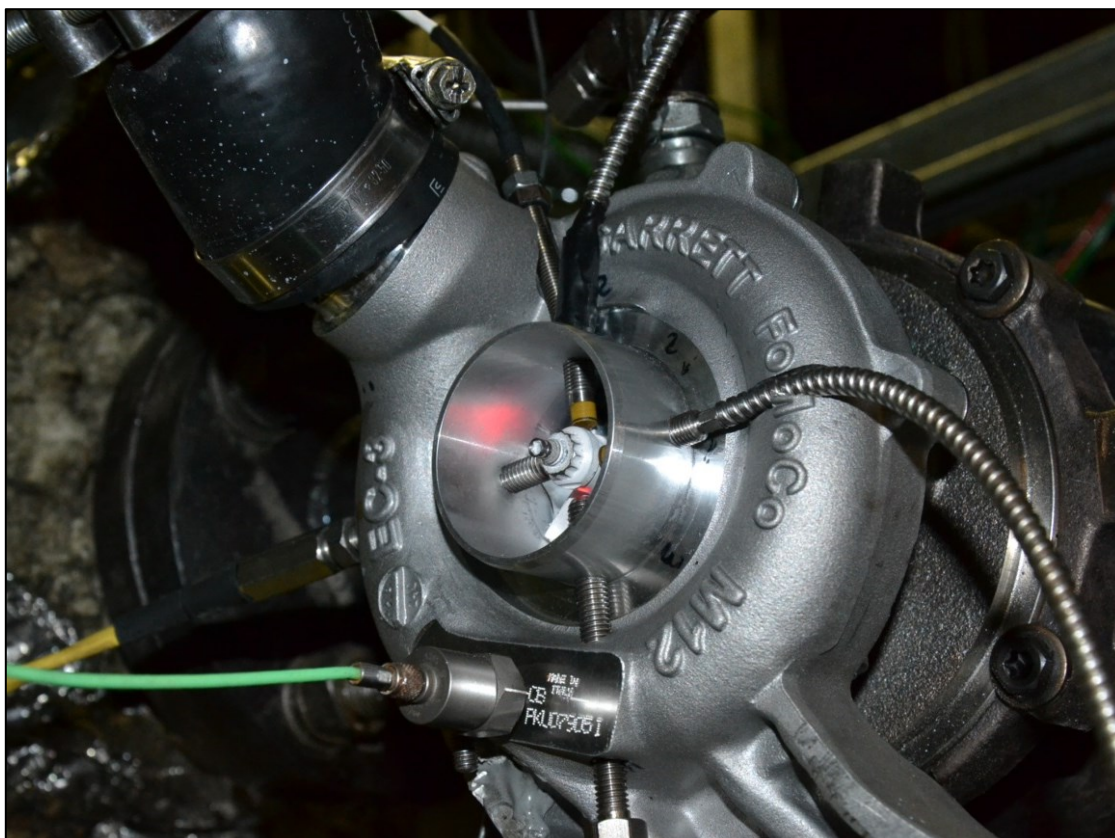


Imagen 4.16 Turbo instalado con los sensores

Empezaremos colocando el turbo en dicha instalación. A la hora de realizar la colocación en el motor K9K, hemos de estar seguros de dos cosas. La primera es que se debe tener unas juntas sellantes: una es para la entrada de la turbina, y la otra es para la salida a turbina. La segunda es que la junta debe ser totalmente hermética, si no llega a ser de esta manera se debe de utilizar algún sellante, como pudiese ser silicona negra o grasa, y atornillar todas las juntas con la fuerza necesaria. En cuando al compresor deben de fijarse con abrazaderas y dejarlas igualmente con la fuerza necesaria. En la Imagen 4.17 se puede ver un ejemplo de todo ello.

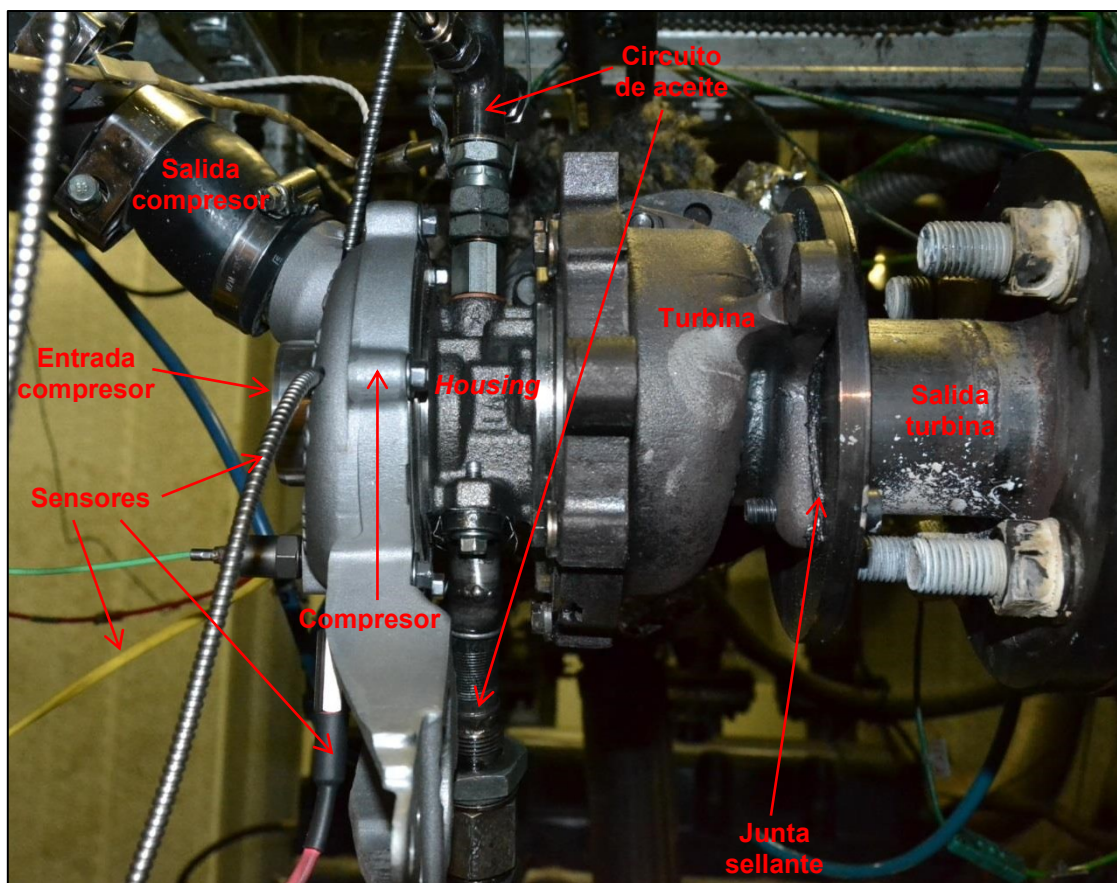


Imagen 4.17 Turbo instalado

Una vez finalizado el acople del turbo al motor, insertaremos los sensores y se ajustarán a la distancia que se requiera, si no han sido colocados en el laboratorio. Siempre es recomendable realizar esta tarea en el laboratorio, sobre todo para tener una idea mejor de los *offsets*.

- Offsets. Los *offsets* son unos valores de medida de los sensores que se toman con el turbo sin funcionar, para saber en distintos momentos que está midiendo. La finalidad básica es saber si el sensor está midiendo correctamente y cómo afectan los cambios de temperatura a lo que está registrando el sensor, para posteriormente ajustar los valores de medida al procesado de datos.

En nuestro caso hemos realizado estas medidas en varios momentos. Cuando ajustamos los sensores en el laboratorio para dejar los sensores a la distancia que correspondía. También antes de realizar el ensayo y al finalizar, para comprobar como varía la medida con el aumento de temperatura, para

posteriormente, corregir esa variación de medidas correspondiente al incremento de temperaturas en el procesado.

Conectaremos mediante cables coaxiales los sensores con la YokoGawa. Se deberá de configurar la YokoGawa para poder tomar las medidas de manera correcta. Se debe ajustar los valores de:

- Los canales que vamos a usar, el nombre que deben de llevar cada uno de los canales utilizados
- Número de puntos, y por consiguiente el tiempo de medida
- Configuración de los archivos de salida
- Las etiquetas correspondientes
- Rango de voltaje de la señal
- Frecuencia de ensayo
- Tipo de *trigger*

Debemos de generar unos ficheros con las mediciones realizadas, las variables que debemos de guardar deben de ser todas las que sea capaz de registrar la instalación mediante los sensores que hayan sido colocados. Se debe tener en cuenta que debemos de fijarnos con especial cautela a las mediciones que la YokoGawa adquiere, por si no mide, o por si está midiendo cosas que no proceden en el ensayo. De especial cuidado requiere que prestemos atención a los ficheros de datos de los sensores del movimiento del eje o *shaft-motion* para asegurarnos que está generando dichos ficheros de manera correcta, ya que es el objetivo principal del proyecto.

En el momento del ensayo se debe tomar las medidas cuanto más cerca se esté del punto que queremos medir. Durante el ensayo se debe de estar prestando atención al panel que muestra todos los parámetros del motor, para parar el ensayo si algo está funcionando de manera anormal o no está trabajando dentro de los parámetros acotados.

Una vez realizado el ensayo nos encargaremos de desconectar todos los elementos que han intervenido en la instalación, dejando un tiempo para que la instalación alcance una temperatura óptima para la extracción de los elementos. Así pues a la hora de desmontar todos los elementos han de realizarse con sumo cuidado.

Lo primero que tenemos que desmontar son los sensores, deben de desconectarse y después extraerlos de la carcasa del compresor, como son muy delicados, no deben de sufrir ni flexión ni torsión. Una vez desmontados los sensores, debemos de quitar el circuito de lubricación del turbogrupo (véase Imagen 4.17).

A continuación se procede a desmontar el turbo, empezamos por quitar la abrazadera que conecta el tubo de salida del compresor con el compresor. Posteriormente se procede a aflojar los tornillos que sujetan el turbo con los acoples: primero soltaremos el turbo por la salida de la turbina y seguidamente se procede a desmontar por la parte de la entrada a la turbina. Esto debe de hacerse aflojando progresivamente todos los tornillos a la vez, es decir, repartiendo el par progresivamente a todos los tornillos y no desenroscar un tornillo sin aflojar los otros previamente, se debe conseguir que todos tengan la misma fuerza de apriete.

Cuando ya se tenga todos los elementos desmontados se procederá a su estudio. Empezaremos desmontando el turbo: extraeremos la carcasa del compresor, el *housing* y la turbina. En el compresor nos deberemos fijar si ha existido rozamiento entre los alabes de la rueda del compresor y la carcasa del compresor. Pueden darse dos posibilidades que existan ralladuras leves en la carcasa, o que existan unas ralladuras de mayor importancia con un desgaste excesivo de los alabes.

Esto puede ser debido a una lubricación escasa, o una baja presión en el circuito de lubricación. A continuación en la Imagen 4.18 se expone lo anteriormente mencionado.

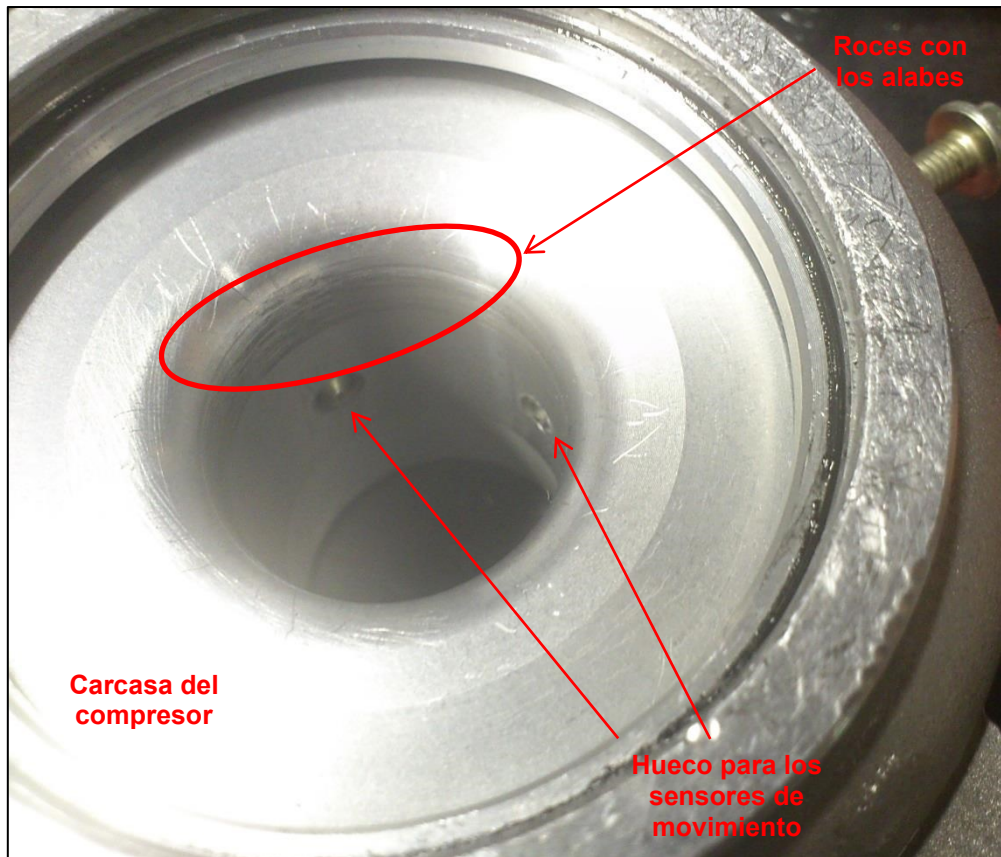


Imagen 4.18 Roces de los alabes con la carcasa del compresor

También existe la posibilidad de que se genere un taponamiento en el interior del circuito de lubricación. Para ello se instalará en el circuito un filtro de aceite. Pero aun así se debe comprobar cómo afecta los taponamientos por partículas en el interior del circuito de aceite asociado al *housing*.

Dentro del *housing* deberemos de fijarnos en si existe rozamiento entre los cojinetes, si ha habido ralladuras o si se ha generado una holgura mayor de la esperada. En el caso de holgura en el eje con respecto a los cojinetes puede ocasionar un aumento en la máxima excentricidad. Estos análisis son muy importantes para entender como se ha comportado el turbo, sobre todo para comprobar, comparar y tener una idea de los datos que se obtendrán del procesado de datos.

4.7 Procesado de datos

Cuando ya hemos realizado el ensayo y se ha guardado los datos, es necesario trabajar con estos archivos para sintetizar y esquematizar la información. Hemos elegido dos programas para trabajar con los datos. Uno de ellos es el programa para hojas de cálculo Excel 2010, perteneciente a la *suit* ofimática Microsoft Office. El otro programa es Matlab R2012b, es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (I.D.E.) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M), se puede ver como es el entorno de este programa en la Imagen 4.19.

El procesado de datos es la técnica que consiste en la recolección de los datos primarios de entrada, que son evaluados y ordenados, para obtener información útil, que luego serán analizados por el usuario final, para que pueda tomar las decisiones o realizar las acciones que estime conveniente. Para esta labor hemos utilizado el programa de MatLab.

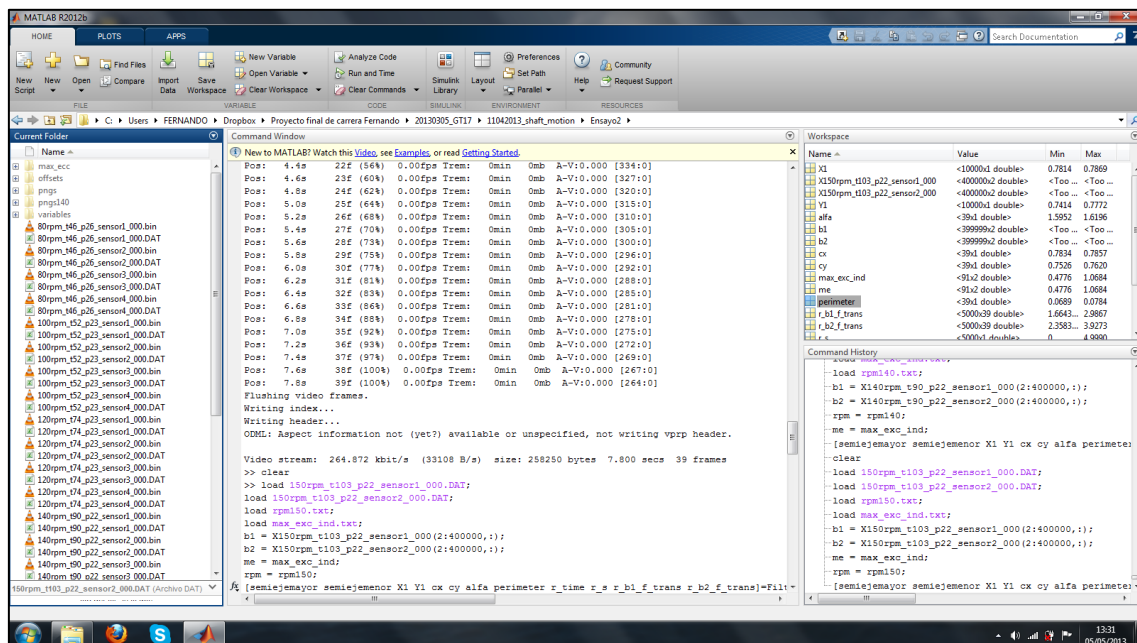


Imagen 4.19 Entorno de trabajo de MatLab R2012b

Se ha creado un programa que nos procesa los datos (este programa puede ser visto en el anexo, y en dicho programa necesitaremos insertar unos valores de entrada, una vez procesada la información que se ha suministrado,

generará unos datos de salida. Todo lo mencionado será analizado mediante una rutina con el programa MatLab.

4.7.1 Ficheros de entrada

Existen dos tipos de datos de entrada, los que se han medido con los sensores en la sala de ensayo, y los que se han generado a posteriori, como pudiese ser la máxima excentricidad.

Para la introducción de datos en el programa MatLab primero se cargaran los datos, y a continuación, se crearán y se asignarán las variables y los valores necesarios para esta tarea. A continuación se expone las líneas de código para la introducción de datos, la asignación a las variables y la ejecución del programa.

```
load 150rpm_t103_p22_sensor1_000.DAT;
load 150rpm_t103_p22_sensor2_000.DAT;
load rpm150.txt;
load max_exc_ind.txt;
b1 = X150rpm_t103_p22_sensor1_000(2:400000,:);
b2 = X150rpm_t103_p22_sensor2_000(2:400000,:);
rpm = rpm150;
me = max_exc_ind;
[semiejemayor semiejemenor X1 Y1 cx cy alfa perimeter r_time r_s
r_b1_f_trans
r_b2_f_trans]=Filtro_pb_fft_trans_sinYsub_v4_p02_fases_2sub_datawindow
_ejes(me,rpm,b1,b2);
```

Los datos de entrada son los siguientes:

- Voltaje medido por el sensor que mide primero. Consiste en un fichero *.DAT en el que existen dos columnas. La primera corresponde al tiempo (el incremento viene definido mediante la frecuencia de adquisición de datos) y la segunda al voltaje. Este fichero será cargado en el programa con la variable b1.
- Voltaje medido por el sensor que mide en segundo lugar. Consiste en un fichero *.DAT en el que existen dos columnas. La primera corresponde al tiempo (el incremento viene definido

mediante la frecuencia de adquisición de datos) y la segunda al voltaje, al igual que el fichero anterior. Este fichero será cargado en el programa con la variable `b2`.

- Régimen de giro del eje del turbo. Consiste en un fichero *.DAT o *.txt que registra el régimen del motor. Al abrir este archivo encontraremos dos columnas, en la primera se encuentra el tiempo (el incremento depende de la frecuencia) y en la segunda encontramos la velocidad con las unidades en revoluciones por minuto. Este fichero será cargado en el programa con la variable `rpm`.
- Circunferencia de máxima excentricidad. Se ha generado un fichero *.txt con los puntos que corresponden a la circunferencia de máxima excentricidad. Este fichero contiene dos columnas separadas mediante tabulación que corresponden a la coordenada X y otro a la coordenada Y con los datos en milímetros. La variable en la que cargaremos este fichero se denomina `me`. Este fichero ha sido generado como indica el apartado 4.5.2 y la Imagen 4.15.

Una vez se ha asociado las variables a los datos de entrada en el programa, procederemos a ejecutar el programa que se ha creado para analizar el movimiento del eje. Una vez finalizado el procesado de datos el programa nos proporciona unos ficheros y unas variables.

4.7.2 Ficheros de salida

Existen distintos tipos de ficheros de salida, a continuación se exponen los cuatro tipos:

- Las imágenes. El programa al ejecutarse genera unas imágenes en formato *.png como la Imagen 4.20 que se expone a continuación. Esta imagen está compuesta de 4 subventanas y se ha generado cogiendo un pequeño intervalos de los datos de entrada, es decir, si por ejemplo los datos tienen una extensión de 200.000 puntos cada imagen ha analizado 10.000 puntos. El orden de explicación para las subventanas será el de lectura (de izquierda a derecha y en sentido descendente).

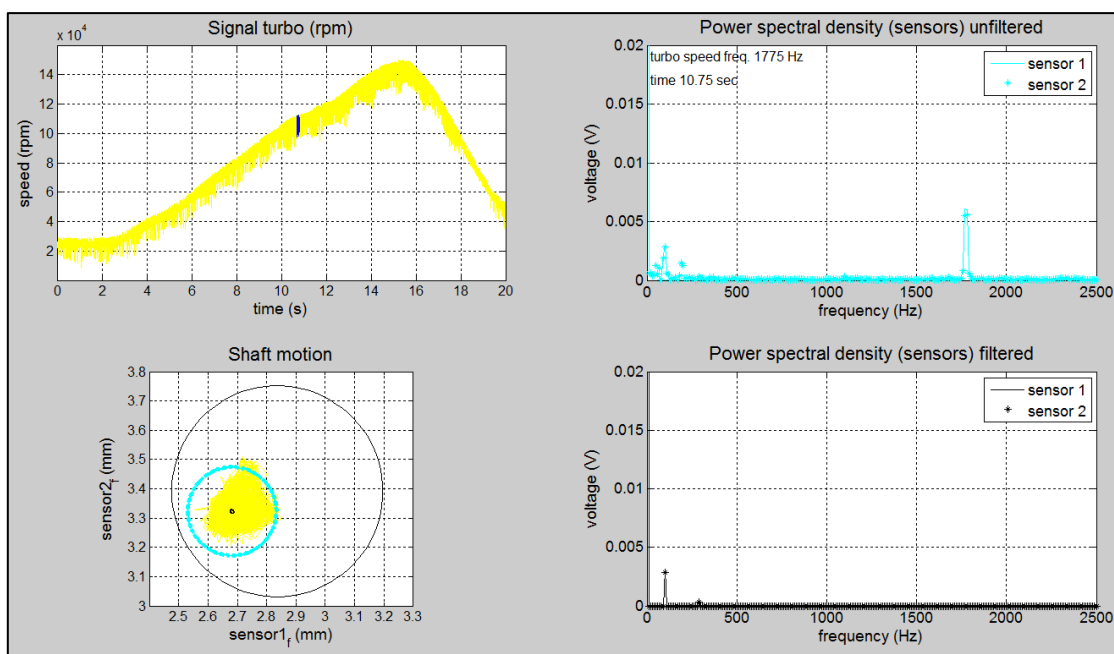


Imagen 4.20 Imagen correspondiente al procesado

- La primera subventana corresponde al régimen de giro que se ha realizado en el ensayo, con la posición instantánea señalada.
- La segunda subventana corresponde a las frecuencias sincronicas y subsincronicas sin filtrar, de ambos sensores, el eje Y muestra la amplitud de las frecuencias en voltios (V) y el eje X muestra la frecuencia en hercios (Hz) a la que se producen las oscilaciones en el eje del turbo.

- La tercera subventana corresponde a el movimiento del eje del turbo. En esta subventana, con los ejes X e Y en milímetros (mm), se muestra la nube de puntos (filtrada y sin filtrar) que ha medido el sensor. También se muestra la circunferencia de máxima excentricidad.
- La cuarta subventana corresponde a las frecuencias síncronas y subsíncronas filtradas, de ambos sensores, el eje Y muestra la amplitud de las frecuencias en voltios (V) y el eje X muestra la frecuencia en hercios (Hz) a la que se producen las oscilaciones en el eje del turbo.
- Video. Se ha generado un video en formato *.mpg inmediatamente al crear las imágenes. La rutina que tiene el programa, es la de generar un video con los fotogramas de las imágenes creadas, por tanto en este video se mostrará la evolución de los datos del propio ensayo.
- Diameter y dimensionless. El programa MatLab al finalizar la ejecución del programa, genera unos archivos *.fig que nos indican la relación de la posición del eje en ese momento con respecto a la máxima excentricidad. La diferencia entre *diameter* y *dimensionless* es que *diameter* muestra la relación en milímetros y *dimensionless* lo muestra de manera adimensional. En la Imagen 4.21 e Imagen 4.22 se muestra como es este tipo de archivo.

En cuanto a la diferencia de la señal filtrada y sin filtrar en las frecuencias, se debe decir que el filtrado consiste en eliminar el ruido que puede existir en la adquisición de datos. También se eliminan los giros supersíncronos, ya que no puede existir una frecuencia más alta en el turbogruppo que el giro del eje del turbo. A parte, se tiene en cuenta la rugosidad de la tuerca.

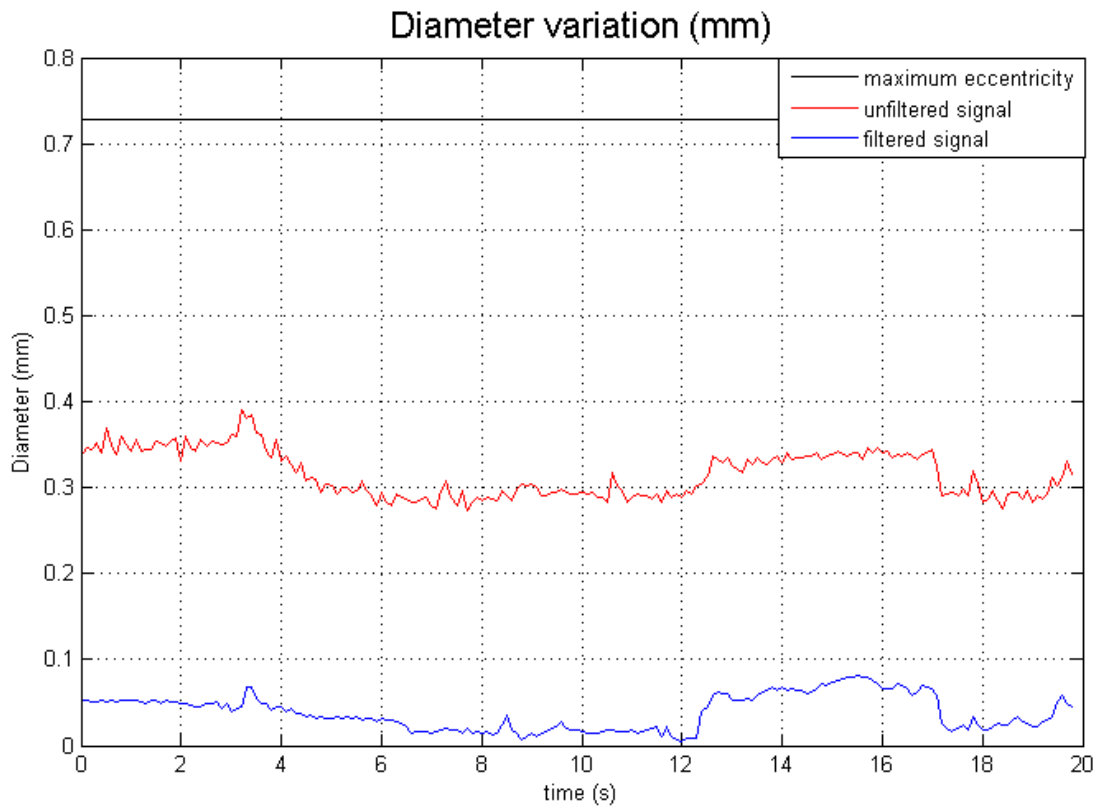


Imagen 4.21 Figura correspondiente al diámetro

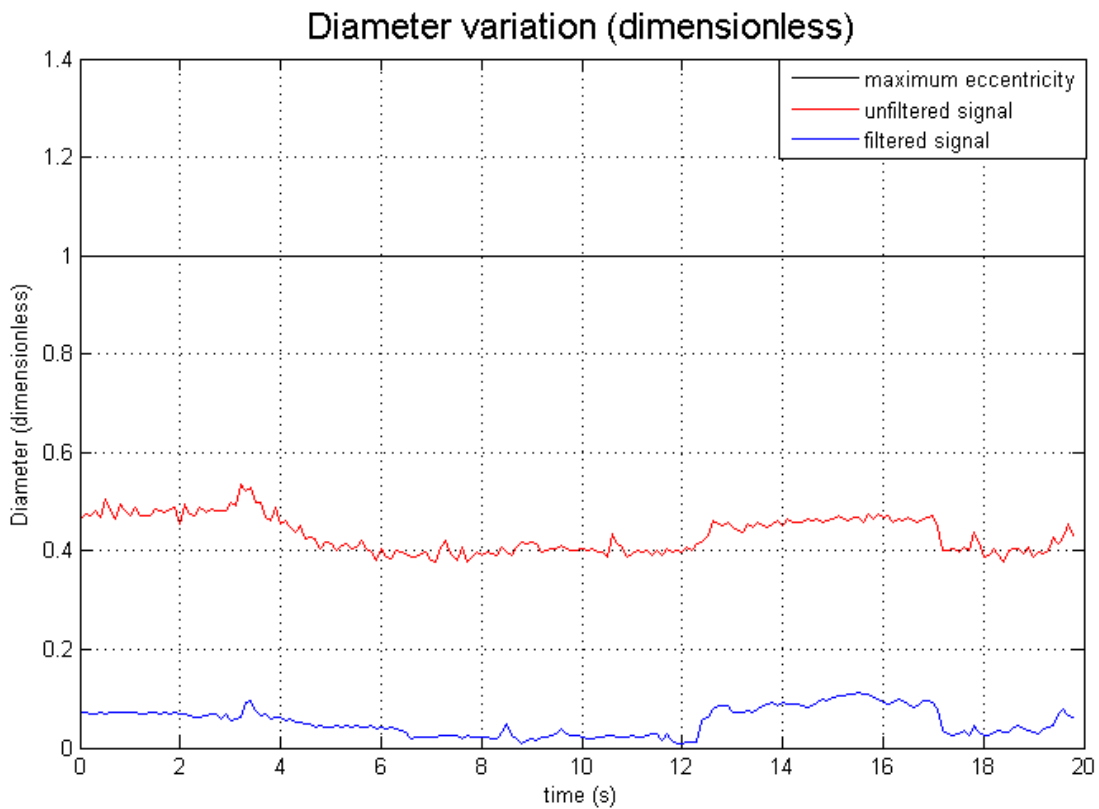


Imagen 4.22 Figura correspondiente al dimensionless

Aparte de los ficheros de salida, el programa para su cálculo necesita crear unas variables adicionales internas, estas son las que se muestran en la parte superior izquierda de la Imagen 4.19. Tales variables son almacenadas en Excel para su análisis, estos datos suelen ser: semieje mayor, semieje menor, perímetro, etc.

4.8 Recomendaciones

En lo que se expone seguidamente se habla de cómo se debe realizar el trabajo para dar por bueno el ensayo y facilitar las operaciones que tienen que ser llevadas a cabo.

- Se debe de ajustar los sensores en el banco de equilibrado y también en el momento del ensayo para que tengan el mismo voltaje, aparte de tomar las medidas con la misma posición de los alabes.
- A la hora de desmontar el turbo de la instalación, se debe de desmontar el mayor número posible de piezas del turbo, a excepción del *housing*.
- Comprobar que los *offsets* antes y después del ensayo son los mismos.
- Tener precaución en el momento de ajustar el turbo a la instalación, esta tarea debe ser llevada con sumo cuidado.
- No forzar los tornillos, es decir no someterlos a cizalladura, ni a excesiva torsión.
- Tener especial cuidado en las variables guardadas en el tema de formato (puntos y comas).
- Ser lo más ordenado y claro en el almacenamiento de archivos de ensayo y nombrar a dichos archivos de forma lo más clara posible.
- La instalación y desmontaje de los sensores en el turbo debe de hacerse con el mayor cuidado, puesto que son muy delicados. Si forzamos por excesiva flexión torsión dichos sensores se podrían romper sus fibras y se tendría que calibrar de nuevo debido a que ha cambiado la sensibilidad del sensor.

- A la hora de ejecutar la rutina de procesado en el programa MatLab, se debe de ajustar todos los parámetros gráficos para que el resultado del procesado sea lo más claro posible.
- Se debe de pintar siempre la zona donde miden los sensores ópticos de la mejor manera posible, sin que exista grumos y que quede lo más blanca posible.
- Intentar tener en archivos grandes la máxima cantidad de información para facilitar el análisis y la esquematización de los valores.

CAPÍTULO 5

ENSAYOS

REALIZADOS

Contenido

5	Ensayos realizados	173
5.1	Turbos ensayados	173
5.1.1	Ensayo con el F9Q 134	173
5.1.2	Ensayo con el F9Q 138	173
5.1.3	Ensayo con el D4FT MB2	174
5.1.4	Ensayo con el Garret GT17	174
5.2	Resultados	175
5.2.1	Resultados en estacionarios	175
5.2.1.1	Picos de frecuencia	175
5.2.1.2	Detalles de las orbitas	177
5.2.1.3	Evolución de la dimensionalidad	179
5.2.1.4	Variación de la posición centro de la órbita	180
5.2.2	Resultados en transitorios.	182
5.2.2.1	Evolución de la orbita	182
5.2.2.2	<i>Diameter y dimensionless</i>	186
5.2.3	Turbo GT17	189

5 Ensayos realizados

5.1 Turbos ensayados

Como bien define el capítulo de la Introducción, este proyecto tiene por objetivo, averiguar el comportamiento del eje en el turbo. Los turbos que han sido analizados han sido modelos estándar de automóviles actuales como: el F9Q, D4FT y GT17. Hay que destacar que de todos los resultados obtenidos y debido a la confidencialidad de los mismos, únicamente se van a mostrar una parte de ellos, los más representativos.

5.1.1 Ensayo con el F9Q 134

En este ensayo medimos con el turbo F9Q de la marca *Honey Well*, unas pruebas que consistían en realizar medidas en todos los parámetros a distintos regímenes de giro sin incrementos de velocidades, es decir, a velocidades constantes o estacionarios. También realizamos dos rampas de aceleración de que comprendían todo el rango de velocidades esta vez sí, con aceleración, es decir con régimen transitorio. Todos los ensayos fueron con el turbo en condiciones óptimas, es decir sin variar su comportamiento, mediante cambios de temperatura, ni cambios en la presión del circuito de lubricación.

5.1.2 Ensayo con el F9Q 138

El ensayo consistió en ver el comportamiento del eje con distintas situaciones en la lubricación en regímenes estacionarios. En este ensayo se realizaron varias medidas con el aceite a 90°C y 130°C y distintas presiones en el circuito del aceite como: 1'1 bar, 1'3 bar, 1'5 bar y 2 bar

5.1.3 Ensayo con el D4FT MB2

En este ensayo fue reducido un alabe en la turbina para averiguar que presión era capaz de generar el compresor. También se instaló en el turbo una válvula que limitaba el paso del aire y se tomaron medidas con la válvula abierta al 25%, 50% y 100%. La marca de este turbo es Mitsubishi.

5.1.4 Ensayo con el Garret GT17

A este turbo se le ha sometido a diferentes regímenes, se le colocaron 4 sensores, dos de ellos son inductivos y dos ópticos, con el objetivo de comprobar si miden lo mismo. Este turbo fue realizado por el fabricante americano de turbos Garrett. En la Imagen 5.1 se ilustra el turbogrupo empleado.

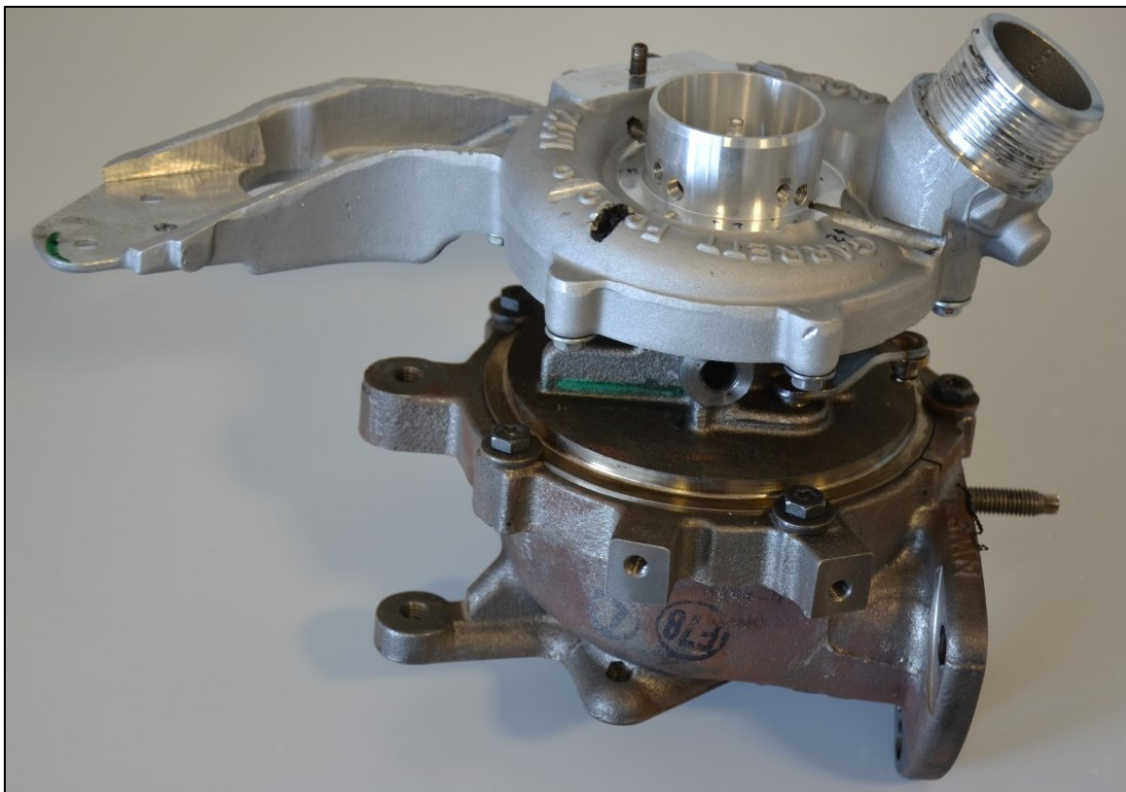


Imagen 5.1 Turbo GT17

5.2 Resultados

Empezaremos enumerando los datos obtenidos referentes al F9Q 134.

5.2.1 Resultados en estacionarios

Se hicieron estacionarios desde 20.000 r.p.m. hasta 150.000 r.p.m. con intervalos de 10.000 r.p.m., con un tiempo en cada una de las medidas de tres segundos

5.2.1.1 Picos de frecuencia

En las Imagen 5.2 e Imagen 5.3 se muestra un resumen de los picos síncronos y subsíncronos de todos los estacionarios. Los círculos azules representan la frecuencia de los giros síncronos, y el rojo corresponde al primer subsíncronos y el verde al segundo subsíncronos. Cabe decir que no tiene por qué existir un segundo subsíncrono.

En los círculos está representada la amplitud de la frecuencia mediante el tamaño del círculo (existe una muestra en las imágenes de cómo es un círculo de amplitud 0'005 V). También se muestra el valor de la frecuencia en el eje Y. Por ultimo en el eje X relaciona la frecuencia que se ha obtenido del estacionario correspondiente.

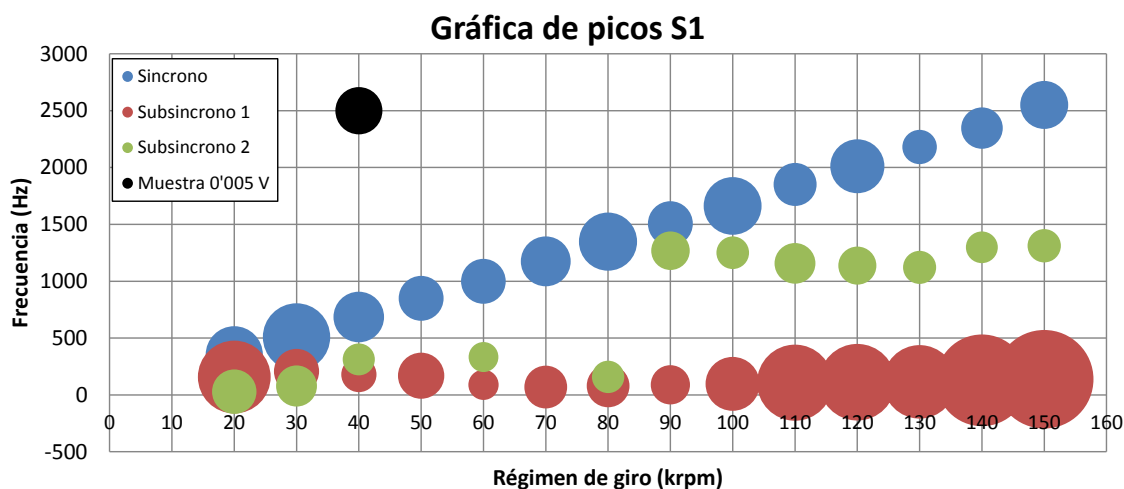


Imagen 5.2 Resumen de picos de frecuencia del sensor 1

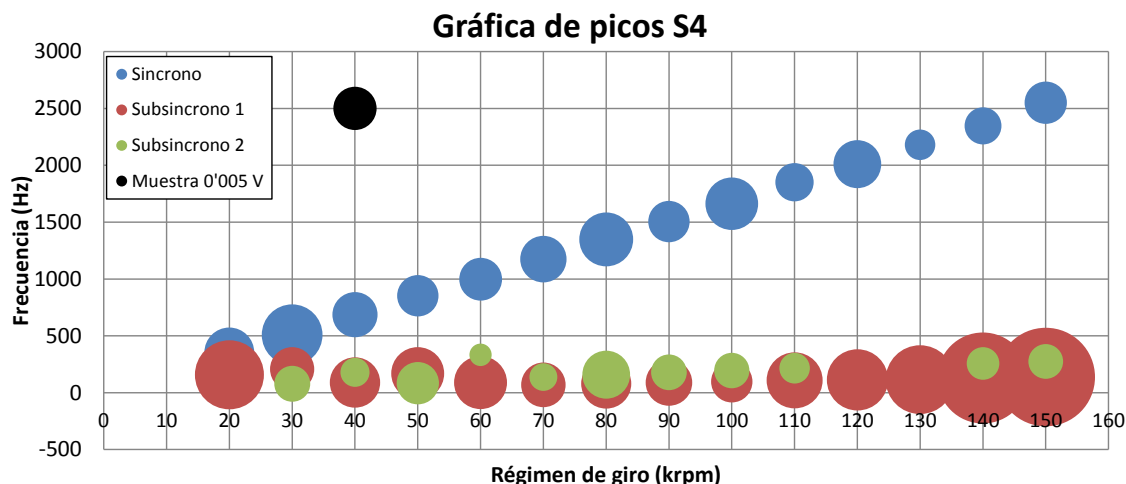


Imagen 5.3 Resumen de picos de frecuencia del sensor 4

Se debe de recordar que el giro síncrono es el propio régimen de giro por lo que si dividimos el régimen estacionario medido y lo dividimos entre los segundos, en otras palabras, si sacamos la velocidad de giro por segundo, será casi idéntica al valor de la frecuencia. Los giros subsíncronos son todos los movimientos que ocurren con una frecuencia menor indicando los movimientos periódicos que se repiten debido a situaciones anormales de movimiento, como pudiese ser el movimiento de precesión.

Se puede observar que los giros síncronos tienen casi la misma amplitud y que los primeros giros subsíncronos tienen la misma frecuencia, pero no tienen la misma amplitud. En los valores extremos de régimen de giro es decir a 20.000 r.p.m. y a 150.000 r.p.m. los primeros subsíncronos tienen la amplitud más elevada, en cambio en el régimen medio de revoluciones del turbo tienen una amplitud relativamente baja.

Con respecto a los segundos subsíncronos del sensor 4 que están a una frecuencia distinta con respecto al régimen bajo, cabe decir que esto es producido por el movimiento del aceite, ya que estas frecuencias se generan a altas revoluciones y a una frecuencia media entre el giro subsíncrono y el primer subsíncrono.

Esto indica que el turbo en el régimen medio de utilización es donde mejor comportamiento tiene en cuanto a movimiento del eje, y que a bajas revoluciones el primer subsíncrono tiene elevada amplitud de movimiento. Para altas revoluciones muestra que el primer subsíncrono tiene también una amplitud considerable.

5.2.1.2 Detalles de las orbitas

En la Imagen 5.4 se muestra la evolución de los perímetros de las orbitas y los semiejes que genera el movimiento del eje del turbo. Podemos ver que los semiejes empiezan disminuyendo su amplitud hasta un mínimo para luego aumentar a medida que se incrementa el régimen de giro. Cabe decir que a 50.000 r.p.m. el semieje mayor es considerablemente mayor que el semieje menor, en torno a unas 33 veces por lo que en este punto su perímetro será muy grande que es como muestra la imagen.

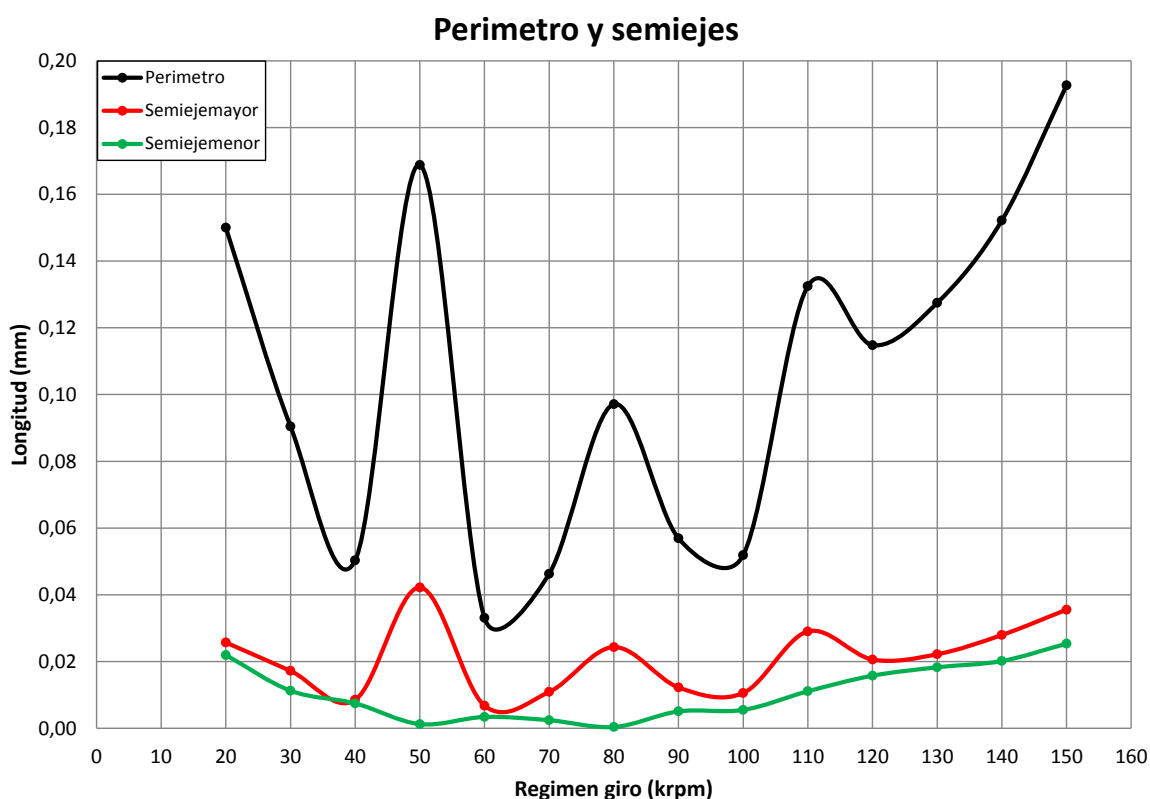


Imagen 5.4 Resumen de perímetros y semiejes para los distintos estacionarios

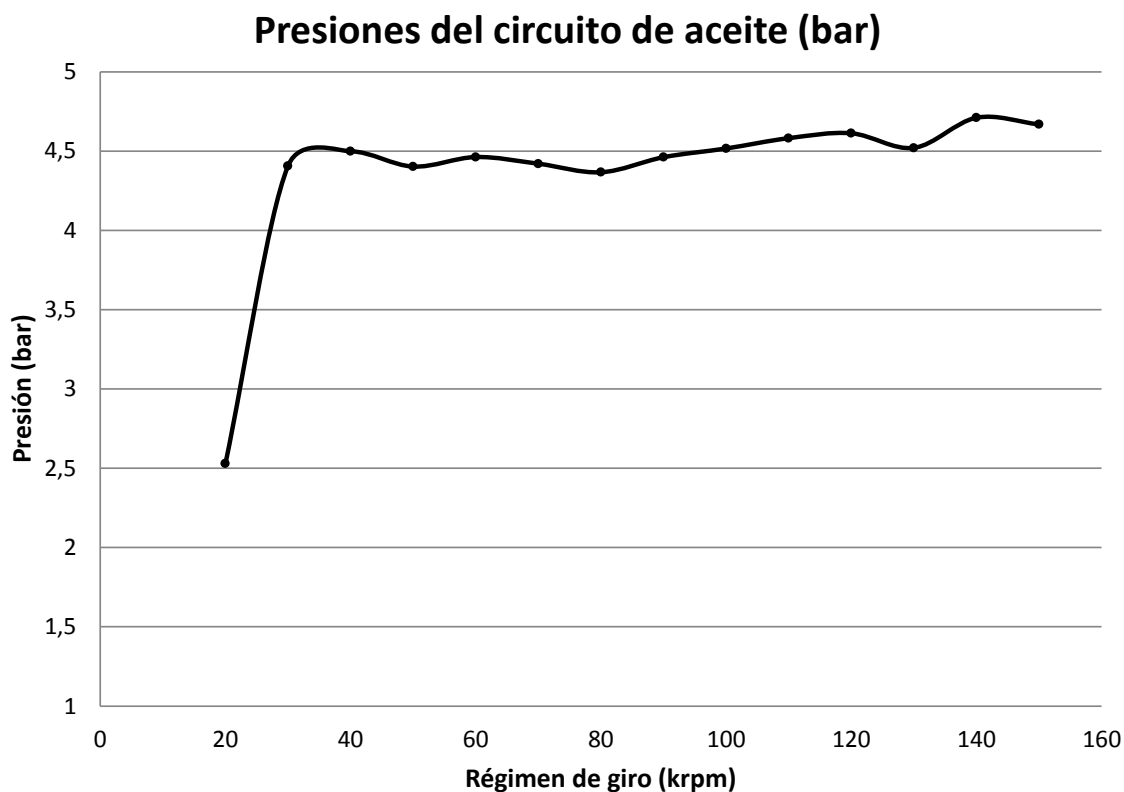


Imagen 5.5 Evolución de la presión de aceite en el circuito de lubricación del turbo

Aquí vemos cómo evoluciona la presión del aceite a la entrada del *housing*, estas presiones son absolutas. Comprobamos que el motor a ralentí genera muy poca presión en el circuito de aceite, pero en cambio cuando acelera el motor genera más presión, que se mantiene constante todo el rango de funcionamiento con un ligero incremento al final.

Puede que, como hemos visto en la Imagen 5.2 e Imagen 5.3 el primer subsíncrono a bajas revoluciones tenga una elevada amplitud debido a que justo en ese punto la presión del aceite es mínima, y a medida que aumenta la presión del aceite, disminuye la amplitud de los subsíncronos.

5.2.1.3 Evolución de la dimensionalidad

A continuación se expone el comportamiento del eje con respecto a una relación de dos variables. Esta proporción relaciona el tamaño de la órbita, con el tamaño de la máxima excentricidad en porcentaje a uno. En la Imagen 5.6 se puede ver un ejemplo de ello.

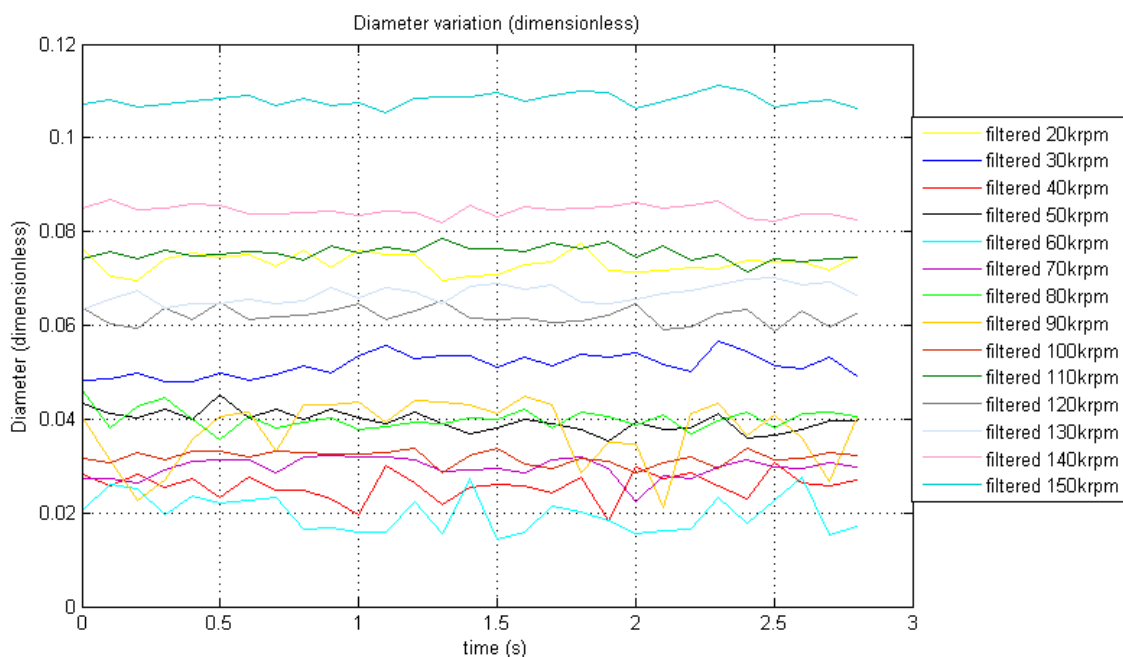


Imagen 5.6 Dimensionalidad de los distintos estacionarios

Se puede ver en la imagen que en la zona de altas velocidades la órbita es mayor en comparación con la máxima excentricidad, es decir la relación es menor. Sin embargo la dimensionalidad para estos regímenes es mucho más suave en cuanto a su forma.

En cambio las bajas velocidades tienen una relación mayor. Esto indica que poseen una órbita de tamaño más reducido, que es justo lo que muestran las Imagen 5.2 e Imagen 5.3, además de que tienen una forma con más irregularidades. Para los regímenes medios podemos observar que la mayoría (alrededor de un 50 por ciento), se concentran en el intervalo de 0'02% a 0'045%, esto indica que en ese rango el eje del turbo se comporta de manera uniforme, y que no varía los parámetros de las orbitas.

5.2.1.4 Variación de la posición centro de la órbita

En la Imagen 5.7 tenemos un claro ejemplo del comportamiento del eje según varían los estacionarios. El círculo exterior es la máxima excentricidad, que para este turbo del ensayo, el F9Q 134 tiene un diámetro de aproximadamente de 0'72 mm. Dentro de este círculo puede verse el sentido de la gravedad (en rojo) y el sentido de giro (en verde), además del centro de la máxima excentricidad y la evolución de los centros.

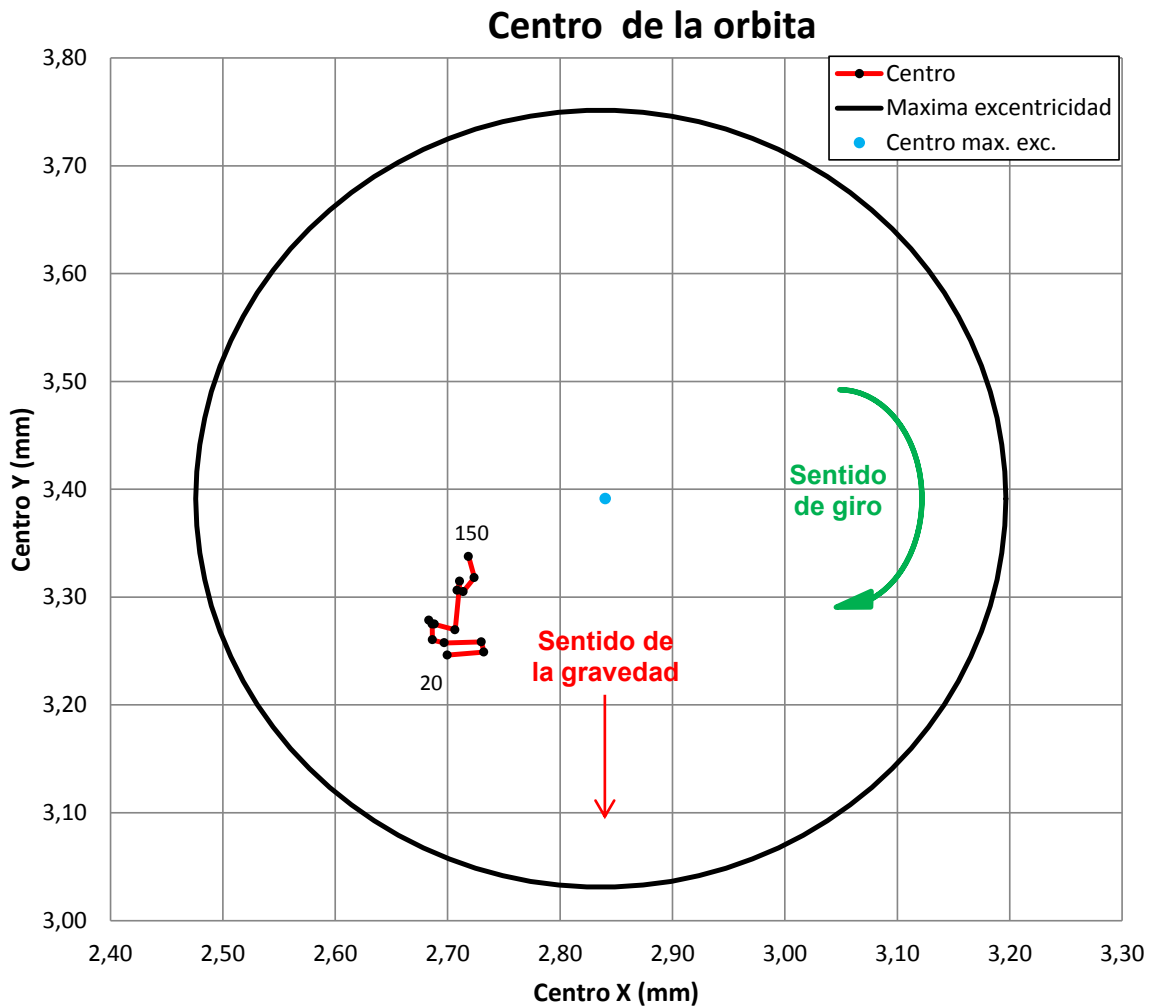


Imagen 5.7 Evolución de los distintos centro de la órbita en regímenes estacionarios

En cuanto a los movimientos de centros dependiendo del régimen de giro, podemos decir que los datos que hemos procesado son coherentes con la teoría. Es decir el régimen más bajo corresponde a la posición de menos altura, en cambio el tope de régimen corresponde a el punto más elevado y el más

cercano al centro de la máxima excentricidad, hablando siempre relativo a la posición.

La evolución es la siguiente: cuando el motor está a ralenti la posición es la más baja posible, debido a que, como se puede apreciar en la Imagen 5.5, existe la mínima presión de aceite. Una vez empieza a incrementar su velocidad tiende a subir i a desplazarse en la dirección del sentido de giro, en este caso tiende a moverse hacia la parte izquierda. Una vez superado los regímenes medios y se alcances las velocidades máximas, que coincide con la presión máxima de lubricación en el eje del turbo, el eje tiende a elevarse, o mejor dicho tiende a desplazarse hacia el centro de la máxima excentricidad, pero sin llegar a posicionarse en el centro.

Se debe señalar que debido al sentido de giro, la posición de los centros de las orbitas estarán siempre hacia el mismo sentido de rotación. Es decir si el giro es horario, la posición de los ejes deberá estar en la parte izquierda. Cabe destacar que aunque intuitivamente se piense que el eje tenderá estar en el centro, esto no tiene por qué ser verdad debido a la lubricación hidrodinámica, ya que existe el rozamiento en la lubricación, que es el causante de que no esté posicionado el eje en su centro de máxima excentricidad, sino que se desplace hacia un eje horizontal, en el caso anterior, hacia la izquierda.

5.2.2 Resultados en transitorios.

Para el análisis del régimen transitorio, se hicieron dos ensayos con dos rampas de aceleración que comprendieron todo el rango de funcionamiento. A continuación se exponen los resultados.

5.2.2.1 Evolución de la órbita

Seguidamente se muestran varios fotogramas del video en diferentes puntos. La Imagen 5.9 corresponde a bajo régimen, la Imagen 5.10, corresponde a medio régimen, la Imagen 5.11 corresponde a alto régimen y la Imagen 5.12 corresponde en el momento de deceleración del giro del eje del turbo.

En las siguientes imágenes se muestra cuatro diferentes subventanas. La primera muestra, parte superior izquierda tenemos la evolución del régimen de giro. En la parte inferior izquierda se muestra el movimiento del eje referenciado a la máxima excentricidad. En la Imagen 5.8 se muestra un ejemplo de cómo pueden ser las órbitas, y que comportamiento podrían tener.

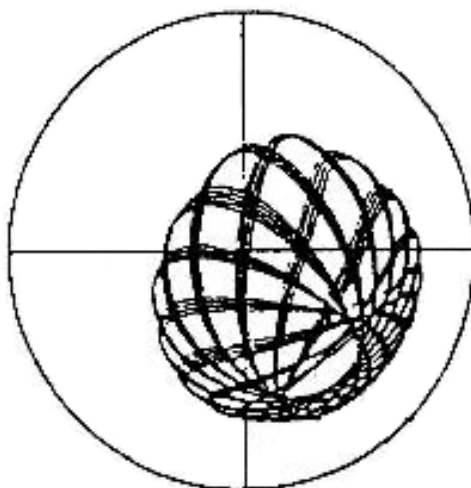


Imagen 5.8 Ejemplo de órbita cuasi-periódica

En la parte derecha las subventanas muestran las frecuencias recogidas por los sensores. En la parte superior esta la señal sin filtrar, y en la parte inferior la señal filtrada.

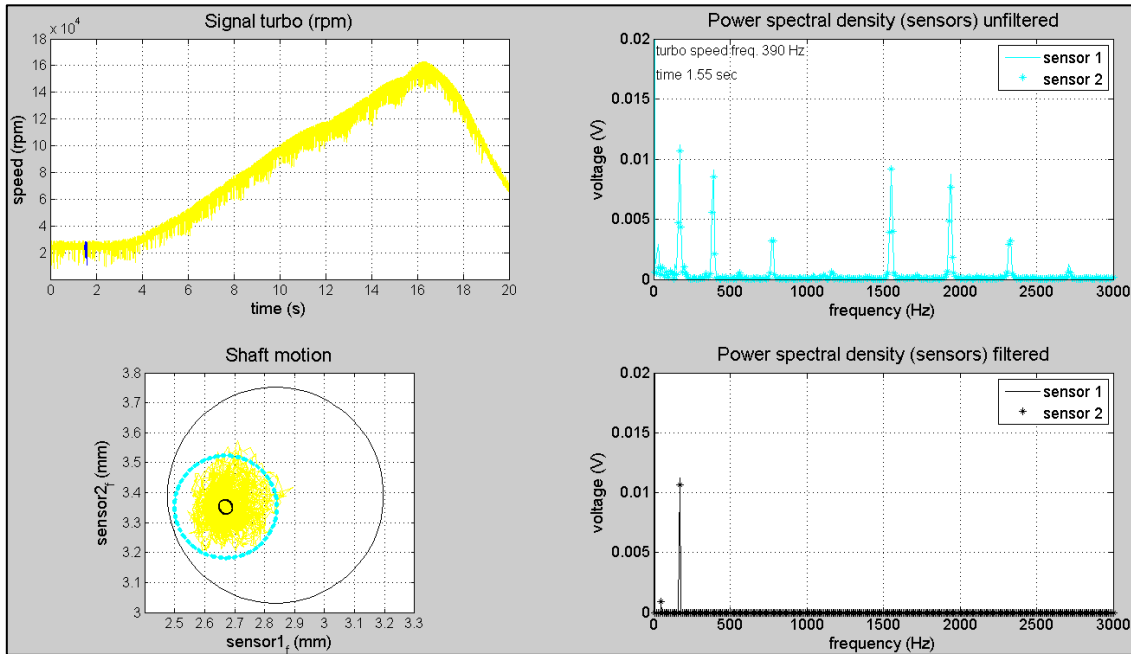


Imagen 5.9 Fotograma correspondiente a la rampa de aceleración a bajo régimen

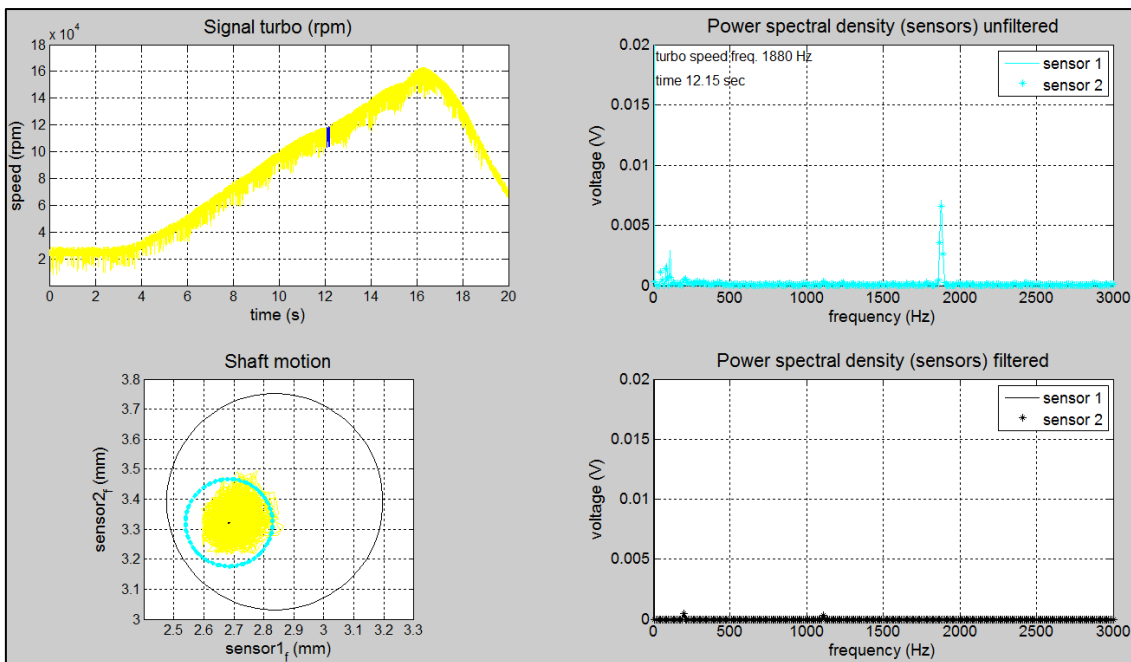


Imagen 5.10 Fotograma correspondiente a la rampa de aceleración a medio régimen

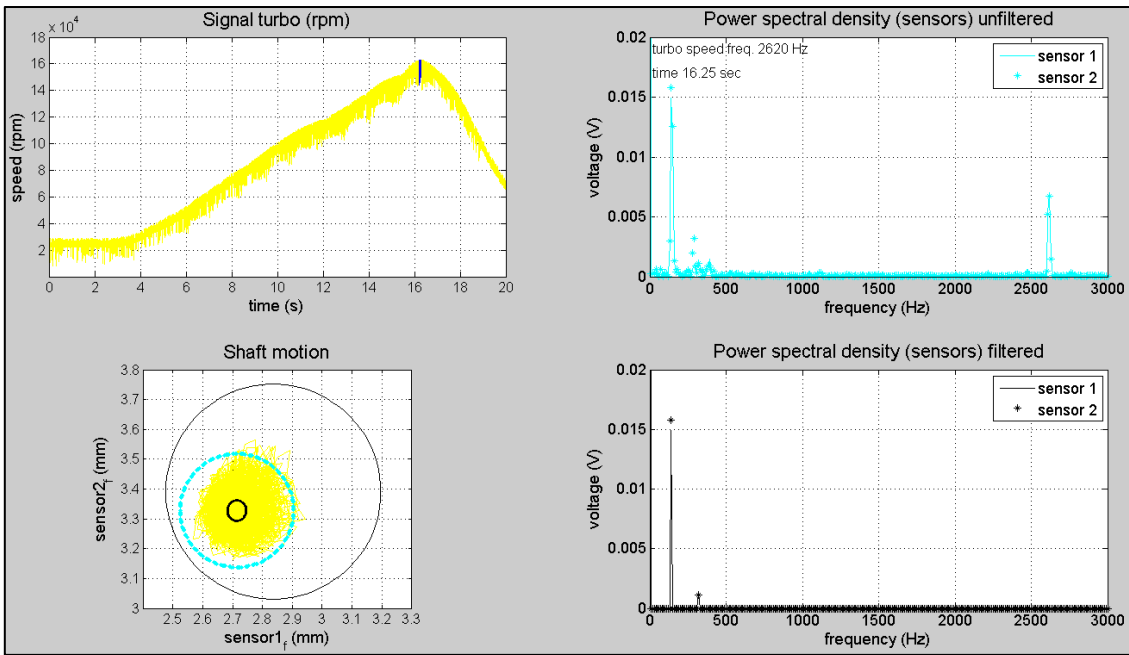


Imagen 5.11 Fotograma correspondiente a la rampa de aceleración a alto régimen

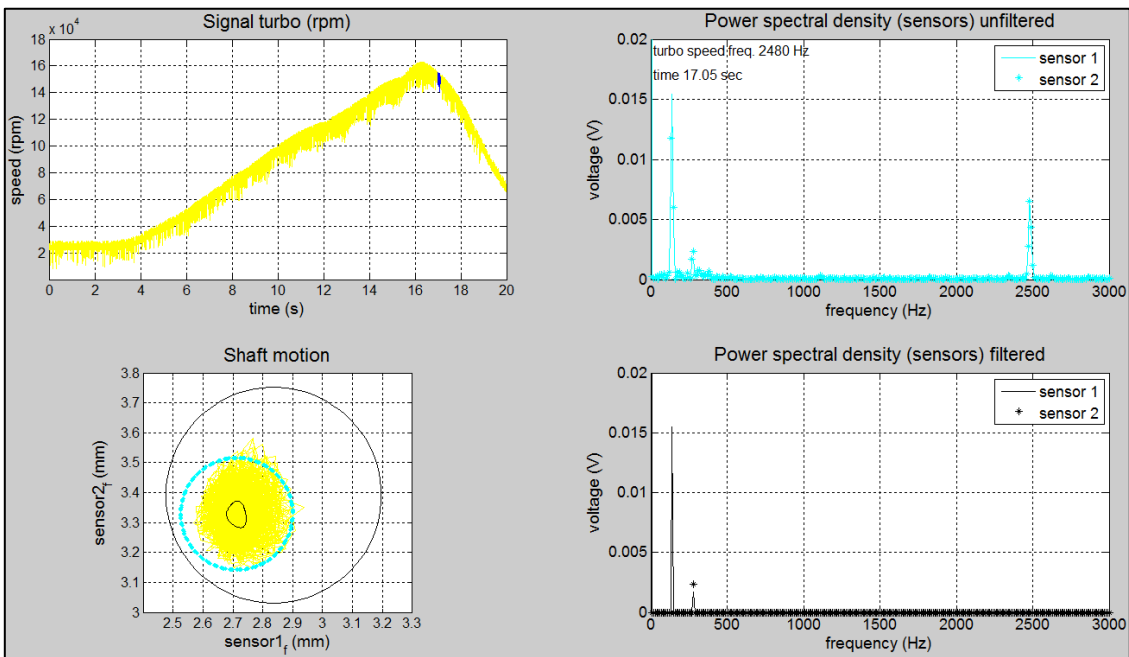


Imagen 5.12 Fotograma correspondiente a la rampa de aceleración en el momento de deceleración

Observando las imágenes anteriores nos damos cuenta que en la rampa de aceleración, tenemos tres tipos de comportamientos: bajo, medio y alto régimen. Si nos fijamos en las subventanas de *Shaft motion*, podemos observar tres tipos de comportamiento totalmente distintos relacionados con el apartado 5.2.1.1. En estas subventanas se puede ver que la órbita (representada mediante una órbita negra dentro de la nube de puntos amarilla) que describe el movimiento en regímenes medios es muy reducida, en cambio en bajo régimen es muy elevada, y en el caso de altos regímenes todavía es mayor.

Esto quiere decir que cuando el turbo está en un régimen medio el movimiento es casi perfecto, solo existe el giro síncrono, por tanto no existirá giro subsíncrono, o este será de muy bajo valor. Esto puede ser visto en las subventanas correspondientes. Al prestar atención subventana de *Power spectral density (sensors) unfiltered*, en regímenes medios, se puede comprobar que ni siquiera existe giro subsíncrono. En cambio en regímenes bajos o altos el giro subsíncrono es incluso muy grande, en la mayoría de ocasiones suele superar la amplitud del síncrono.

En cuando a las frecuencias o giros supersíncronos, se han despreciado debido a que no existe elemento alguno en el turbo que se mueva a una velocidad superior a la velocidad del eje del turbo, por tanto es imposible que tenga una frecuencia más elevada que la síncrona. Por tanto estas señales serán tomadas como interferencias o como ruido y no serán tenidas en cuenta en el análisis.

Otra situación que es analizada en este ensayo es la posición de la órbita con respecto a la máxima excentricidad. En el ensayo de transitorios, que tiene los mismos sentidos de gravedad y giro que se muestra en la Imagen 5.7, podemos ver que la posición de la órbita corresponde con dicha imagen. Esto quiere decir que el la posición del eje en regímenes bajos se encontrara en la posición más baja, después, en regímenes medios se elevará y se desplazara a la izquierda debido al sentido de giro, y en regímenes altos acaba por colocándose en la posición más cercana al centro de la máxima excentricidad como se habla de ello en el apartado 5.2.1.4.

5.2.2.2 Diameter y dimensionless

Las imágenes (Imagen 5.13 e Imagen 5.14), muestran la variación del dimensionalidad y diámetro, que representa lo mismo que la dimensionalidad, pero no está en base porcentual, sino que está acotado en milímetros. Estas imágenes corresponde a la rampa de aceleración o ensayo de transitorio anterior.

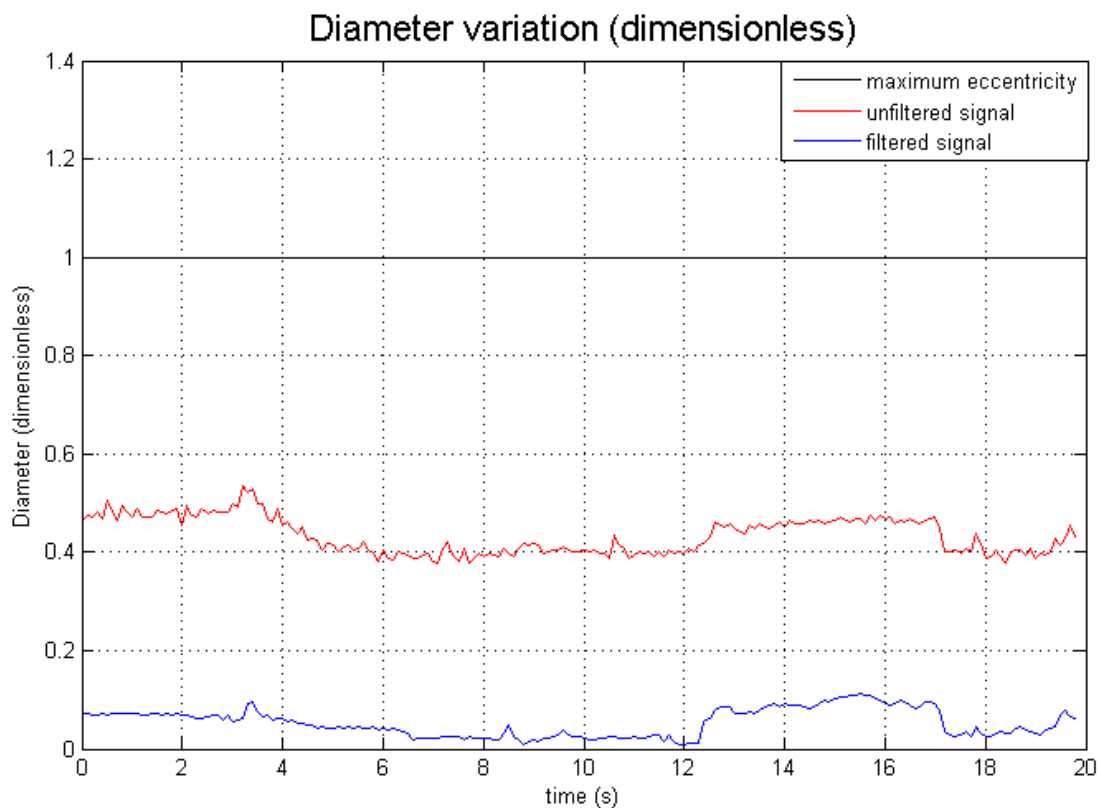


Imagen 5.13 Variación de la dimensionalidad del transitorio

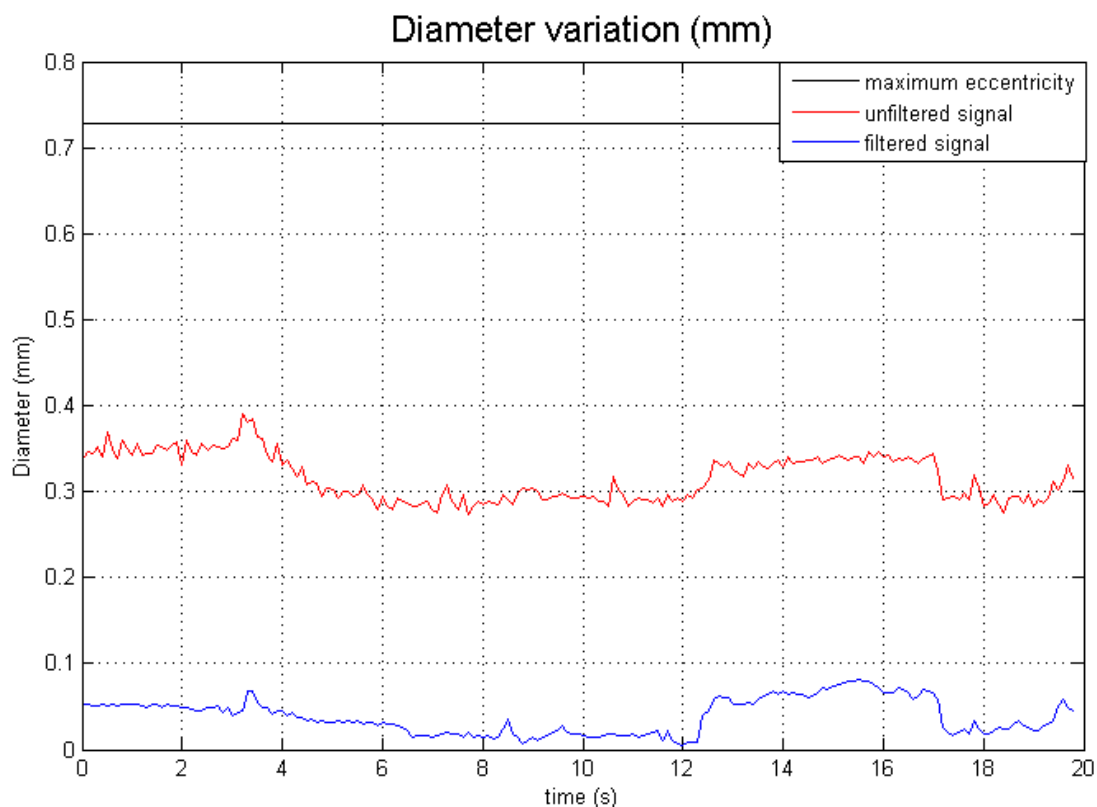


Imagen 5.14 Variación del diámetro del transitorio

En ambas imágenes vemos 4 zonas distintas, el primer tramo corresponde al tramo entre 0 y 4 segundos en los que nos encontramos con un régimen bajo, esto quiere decir que existe elevadas amplitudes de movimiento, por lo que en la imágenes podemos comprobar que tiene relativamente un valor elevado. A continuación en el segundo tramo, intervalo correspondido entre el segundo 4 y 12, se produce una aceleración que provoca una reducción en la dimensionalidad, ya que las orbitas en este tramo, quedo explicado anteriormente que son más pequeñas.

En el tercer tramo corresponde a la dimensionalidad entre el segundo 12 y 16, y se puede ver cómo crece hasta un pico en el segundo 16 donde la amplitud de la órbita es considerable, alcanza un máximo relativo. Por último está el tramo de desaceleración, intervalo que comprende desde el segundo 16 hasta el 20. Se puede comprobar en este tramo que la dimensionalidad es también elevada, debido a la desaceleración.

Por tanto se puede concluir que en aceleraciones las orbitas se reducen a excepción de las deceleraciones que aumentan, hasta su máximo. En cambio en estados transitorios el valor de la órbita con respecto a la máxima excentricidad es de un valor relativamente medio. Con respecto a los picos que muestran las imágenes anteriores, se confirma que al introducir una aceleración el valor de la dimensionalidad es máximo, también ocurre en el momento en el que la aceleración ha cesado.

5.2.3 Turbo GT17

Como se ha dicho anteriormente en el apartado 5.1.4, en este ensayo incorporamos dos tipos de sensores, unos inductivos y unos ópticos a la carcasa del compresor del turbo. Los sensores iban colocados a 90° entre ellos, siempre del mismo tipo. Se quiso comprobar si los datos medidos con los distintos tipos de sensores eran idénticos.

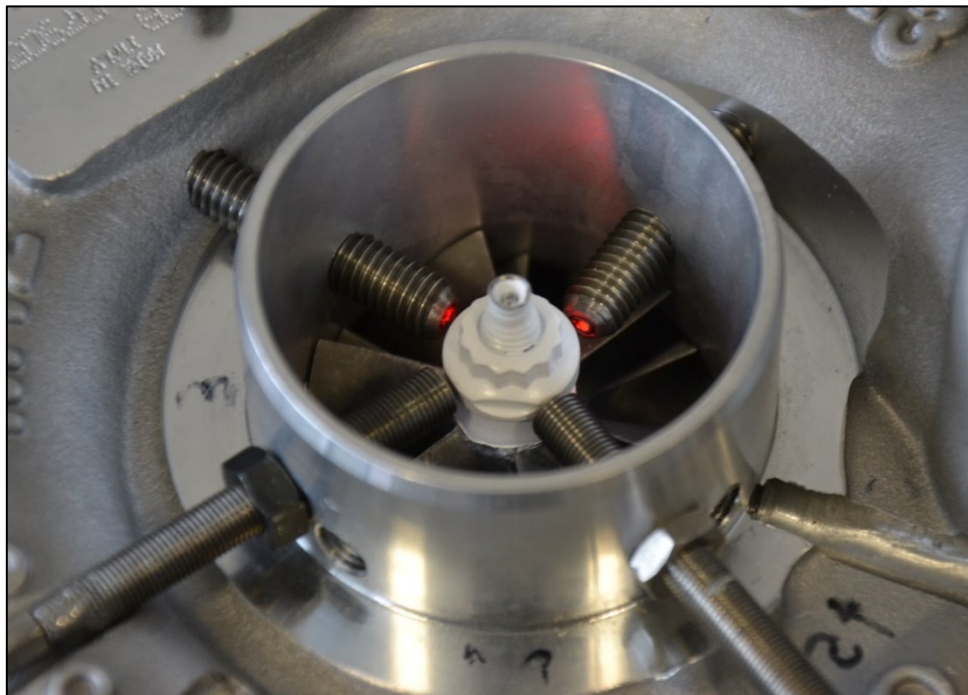


Imagen 5.15 Sensores instalados en el GT17

Para el cálculo de la máxima excentricidad, hemos podido comprobar que ambas excentricidades tienen el mismo valor. Esto puede ser visto en la Imagen 5.16 donde están representadas ambas excentricidades. Se puede comprobar que tienen prácticamente el mismo radio. En el caso de los inductivos, el radio de frecuencia es 0'2949 mm y para los ópticos 0'306 mm.

Por tanto se puede decir que en principio los sensores están dentro del rango de medida correspondiente, además de que medirán lo mismo ambos sensores.

Máximas excentricidades

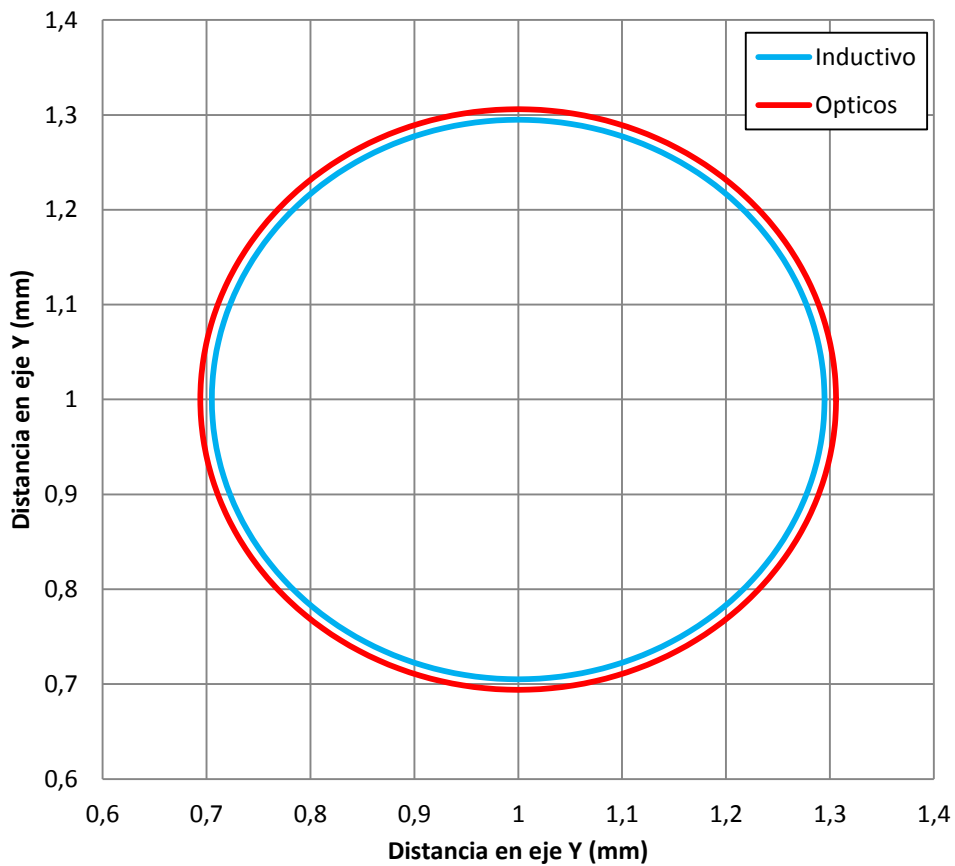


Imagen 5.16 Máximas excentricidades representadas

Perímetro y semiejes

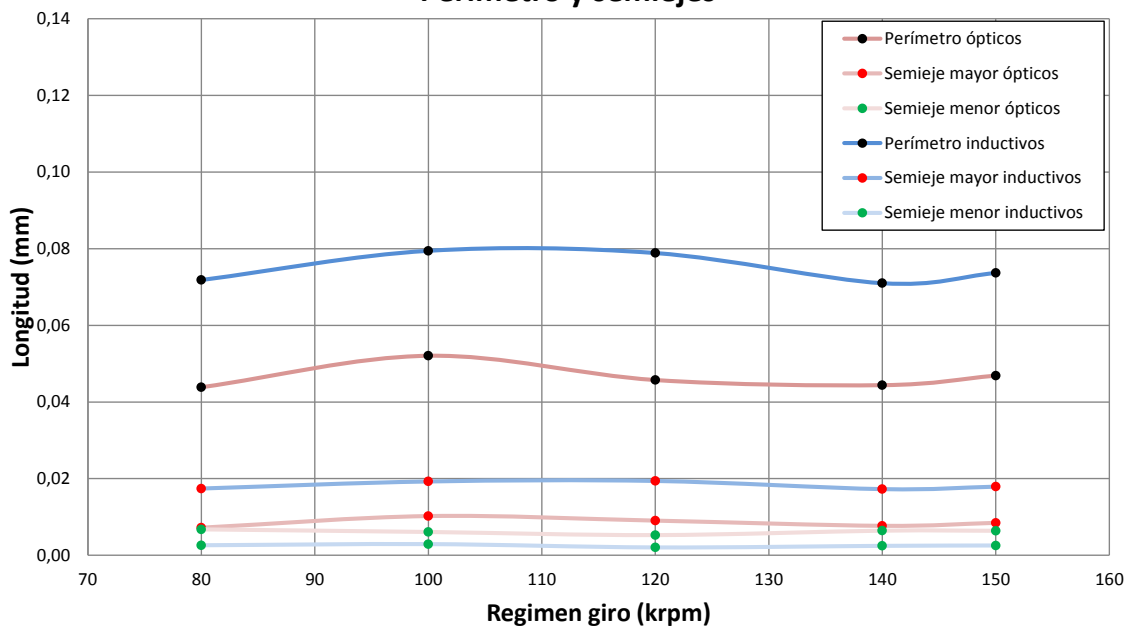


Imagen 5.17 Evolución de las características de las órbitas medidas con ambos sensores

Aunque se puede comprobar que los sensores nos ofrecen unos resultados coherentes, la verdad es que ofrecen resultados distintos entre ellos. Esto puede ser debido a que en el ensayo:

- La rueda del compresor existía una muesca de equilibrado, por lo que los sensores ópticos, estarían midiendo amplitudes distintas, aun reduciendo la cantidad de datos por ruido.
- La tuerca del eje que se muestra en la Imagen 5.15, también existe una muesca de equilibrado.
- Debido a la naturaleza de los sensores inductivos, puede que no estén midiendo bien debido a que los *offsets* del principio del ensayo y del final varían muchísimo. La temperatura afecta a los sensores, produciéndoles una anomalía en el comportamiento. Esto se puede comprobar en la Tabla 5.1.

Variación de <i>offsets</i> de los sensores				
Sensores	Inicial (V)	Post-ensayo (V)	Incremento (V)	Porcentaje (%)
Inductivo 1	-3'034	-2'649	0'385	-12'69
Inductivo 2	-4'055	-3'589	0'466	-11'49

Tabla 5.1 Variación de *offsets* de los sensores

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

Contenido

6	Conclusiones _____	197
6.1	Conclusiones de la metodología _____	197
6.2	Conclusiones de los ensayos _____	197
6.3	Trabajos futuros _____	198
6.4	Valoración personal _____	199

6 Conclusiones

6.1 Conclusiones de la metodología

De la metodología que se ha utilizado en el proyecto se puede concluir que:

- Es poco intrusiva si se quiere medir el movimiento del eje.
- Requiere un elevado tiempo de calibración de los sensores.
- Se debe de realizar un ajuste bastante completo y preciso de los parámetros que intervienen en el programa de MatLab.
- Es adecuada debido a que se pueden sintetizar y esquematizar muy bien los resultados de los ensayos.

6.2 Conclusiones de los ensayos

De los ensayos que se han realizado se puede exponer que:

1. El giro perfectamente síncrono es prácticamente imposible. Debido a las imperfecciones que pueda existir en los cojinetes, debido a su diseño, a su fabricación o a su sistema de rodadura. También debido a que existe una película de lubricación y existe holgura.
2. Los parámetros de las orbitas está relacionados con el régimen y se concluye que a bajas revoluciones del turbo, la amplitud del movimientos es elevada a medio régimen es media y a altas revoluciones, la amplitud de las orbitas es elevada.
3. La lubricación es un factor importante en este tipo de turbos, con sistema de rodadura mediante película de aceite. Ya que la magnitud de las orbitas generadas dependen de las condiciones físicas del lubricante (presión, temperatura).

4. La presión de aceite es un factor crucial en el movimiento del eje, a mayor presión, generalmente el eje tenderá a centrarse en mayor medida. En cambio cuando la presión de aceite es baja, en ralentí, las orbitas son elevadas.
5. Las orbitas están generadas fundamentalmente por los giros subsíncronos. El estudio de los giros subsíncronos es fundamental para reducir las orbitas, que genera el eje en los cojinetes.
6. El sentido de giro del eje influirá en la posición de las orbitas que generará el eje del turbo, con respecto a todo el campo que abarca la máxima excentricidad.
7. Los giros síncronos tienen una amplitud media, mientras que los giros subsíncronos tienen amplitud elevada.

6.3 Trabajos futuros

Para finalizar y habiendo desarrollado los ensayos realizados y las conclusiones correspondientes, se puede exponer los trabajos que tienen especial interés en un futuro:

- Realizar diferentes ensayos con distintas técnicas de medida. Mediante una cámara fotográfica con bajos tiempos de exposición, o diferentes tipos de sensores.
- Recrear las orbitas referidas al tamaño del cojinete, para comprobar el movimiento de precesión teniendo el cojinete distintos radios.
- Recrear como puede ser el movimiento en todo el eje, y no solo en el referido a la rueda del compresor.
- Realizar un modelo tridimensional del comportamiento del eje cuando genera orbitas de relativa importancia.

- Averiguar el movimiento del eje cuando no existe lubricación, y comprobando cómo son sus orbitas.
- Comprobar las orbitas que podría describir el eje sometiendo el turbogruppo a elevadas presiones de aceite en el *housing*.

6.4 Valoración personal

Para finalizar y como valoración personal he de decir que el realizar mi proyecto final de carrera en el Departamento Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia, me ha permitido formarme en el campo de la investigación de motores durante un año, tanto a nivel teórico como experimental y en primer plano, la satisfacción personal de realizar un trabajo real con un equipo de investigadores altamente implicados y cualificados.

Durante este tiempo he asumido con total responsabilidad todas las labores encomendadas, desde el montaje y desmontaje del turbogruppo, procesado de las hojas de Excel, fabricación de piezas, etc., e incluso la colaboración en otros proyectos del departamento.

Realizar el P.F.C. en dicho departamento me ha brindado la oportunidad de poder conocer líneas de investigación con un alto nivel de desarrollo, equipos de medida técnicamente avanzados e instalaciones con versatilidad para futuros proyectos.

DOCUMENTO 2

PLIEGO DE CONDICIONES



CAPÍTULO 1

CONDICIONES DE USO

Contenido

1	Condiciones de uso	207
1.1	Introducción	207
1.2	Objeto del pliego de condiciones	207
1.2.1	Accesibilidad de los elementos	207
1.2.2	Repetitividad	208
1.2.3	Fiabilidad	208
1.2.4	Seguridad	209
1.2.5	Mantenimiento	209
1.2.6	Precisión	209
1.2.7	Controlabilidad	210
1.3	Condiciones generales	211
1.3.1	Funciones a desarrollar por el técnico de laboratorio	211
1.3.2	Funciones a desarrollar por el ingeniero en el laboratorio	212
1.3.3	Funciones a desarrollar por el ingeniero en el proyecto	213
1.4	Condiciones particulares	214
1.4.1	Validez de los ensayos	214
1.4.2	Integridad de los equipos	215
1.5	Condiciones técnicas	217
1.5.1	Condiciones de la sala de ensayo	217
1.5.1.1	Dimensiones	217
1.5.1.2	Accesibilidad	218
1.5.1.3	Ventilación y sistema de extracción de gases	219
1.5.1.4	Aislamiento térmico	220
1.5.1.5	Aislamiento acústico	220
1.5.1.6	Condiciones de hermeticidad de la sala	221

1.5.1.7	Iluminación _____	221
1.5.1.8	Protección eléctrica _____	221
1.5.1.9	Almacenamiento y suministro de combustible _____	222
1.5.1.10	Vibraciones _____	222
1.5.1.11	Otros requisitos _____	222
1.5.2	Calibración del instrumental _____	223
1.5.2.1	Tarado de los sensores de temperatura _____	223
1.5.2.2	Tarado de los caudalímetro de aire _____	223
1.5.2.3	Tarado de los transductores de presión media _____	224
1.5.2.4	Tarado de los sensores de proximidad _____	225

1 Condiciones de uso

1.1 Introducción

El documento que a continuación se presenta, denominado Pliego de condiciones, adquiere gran importancia en la fase de ejecución del proyecto. En él se recogen las directrices a seguir durante la realización de los ensayos experimentales para que los resultados obtenidos sean considerados válidos.

Se detallarán, condiciones técnicas, de seguridad y ejecución que deberán cumplirse sin excepción, pues la omisión de cualquiera de ellas podría provocar riesgos para las personas físicas que realicen los ensayos experimentales y poner en duda la fiabilidad de los resultados obtenidos. Este pliego de condiciones también hace referencia a las exigencias de índole facultativa en las que se ha basado la ejecución del proyecto.

1.2 Objeto del pliego de condiciones

Como se puede deducir, el objetivo principal del presente pliego es poner a disposición toda la normativa necesaria para garantizar tanto la seguridad, como el éxito de los resultados obtenidos en los ensayos experimentales. Se atenderá a diferentes aspectos considerándose todos y cada uno de ellos como necesarios para la correcta ejecución de la parte experimental.

1.2.1 Accesibilidad de los elementos

Debido a la gran variedad de ensayos que se pueden llegar a realizar sobre una misma instalación (cada una de las líneas de investigación del C.M.T. realiza una serie distinta de ensayos), se debe garantizar la accesibilidad a los distintos elementos de la instalación asegurando así una rápida actuación y una fácil sustitución de estos dispositivos.

1.2.2 Repetitividad

Para realizar una correcta interpretación de los resultados de los ensayos, es muy importante asegurar la repetitividad de las condiciones de estos, ya que de otro modo no sería posible la comparación entre diferentes medidas.

Con este fin se debe mantener un riguroso control de las condiciones en las que se están realizando los ensayos, y ser por tanto capaz de obtener idénticos resultados ante idénticas condiciones. Al considerar las condiciones del ensayo, se han de tener en cuenta tanto las condiciones ambientales como las de funcionamiento del motor y sus elementos de medida.

Un aspecto difícil de conseguir a este respecto es la estabilidad del motor, para lo cual hay que asegurar todas las especificaciones de precisión de este pliego de condiciones.

1.2.3 Fiabilidad

Cuando se monta una instalación para ensayos destinados a la investigación, es especialmente necesario el correcto funcionamiento de la misma, ya que de lo contrario, podrían aparecer una serie de incertidumbres que añadidas a las propias del proceso de investigación harían prácticamente imposible la correcta interpretación de los resultados obtenidos.

Debido a esto, para conseguir un elevado grado de fiabilidad en las instalaciones, se pondrá especial cuidado en la calidad de los materiales y se exigirá un elevado rigor en los métodos empleados durante el mecanizado y montaje de cada uno de los elementos necesarios para el funcionamiento de estas instalaciones.

1.2.4 Seguridad

Con el fin de preservar la integridad física de las personas que participan diariamente en la realización de ensayos, evitar y a la vez prever los posibles accidentes debe ser una prioridad que nunca debe descuidarse.

Para cumplir con esta premisa, es importante que el monitorizado de las diferentes variables a tener en consideración durante el ensayo se realice de un modo totalmente externo, evitando de esta forma entrar en contacto con la instalación durante su funcionamiento disminuyendo así el riesgo de posibles accidentes.

1.2.5 Mantenimiento

Hasta ahora, todos los puntos tratados hacen referencia única y exclusivamente a la instalación y a la medición. Se deben considerar también todos los aspectos relacionados con un adecuado mantenimiento de los elementos de la instalación. Las operaciones de mantenimiento deberán ser sencillas a la vez que eficaces. Descuidar estos aspectos conducirá a un rápido deterioro de la instalación, provocando en principio una pérdida de fiabilidad y precisión, que podría llevar finalmente a dejar completamente inoperativa instalación.

1.2.6 Precisión

Obtener un elevado grado de precisión en los ensayos implica ser extremadamente riguroso a la hora de elegir los parámetros y variables a medir, la instrumentación y su calibrado para la obtención de medidas. La precisión es por tanto, un concepto de vital importancia tanto en el montaje como en la obtención de resultados en las salas de ensayos. Por este motivo se deberá tener especial cuidado en el montaje y calibración de los diferentes elementos de éstas.

1.2.7 Controlabilidad

Para la correcta obtención de las medidas hay que tener un elevado control de los parámetros que intervienen en los ensayos, esto es posible gracias a la automatización y regulación de los procedimientos y elementos de medida. No sólo es importante conocer el valor y la situación de los distintos parámetros por medio de la instrumentación necesaria, sino que además, es necesario tener un control sobre las variables que intervienen en el ensayo, todo esto es posible gracias a la regulación por medio del equipo de instrumentación empleado.

1.3 Condiciones generales

La finalidad del presente capítulo es regular la ejecución del proyecto, delimitando las funciones de cada una de las personas que intervienen en él, esto es, técnicos de laboratorio, ingenieros, etc. así como las relaciones entre ellos. Aquí se recogerán las condiciones que regirán la ejecución, constituyéndose así, las especificaciones facultativas, no teniendo sentido las especificaciones de carácter económico y legal.

1.3.1 Funciones a desarrollar por el técnico de laboratorio

El técnico de laboratorio realizará las siguientes funciones:

- Se encargará de las labores de mantenimiento, montaje y desmontaje de las partes de la instalación que sean necesarias para cada una de las tandas de ensayos, bajo las directrices del ingeniero encargado del proyecto.
- Seguirá las instrucciones de los manuales de uso existentes para los diversos sistemas y equipos de la instalación.
- Durante la realización de los ensayos llevará a cabo las funciones que el ingeniero le encomiende, como son:
 1. Control de las condiciones de temperatura en el circuito de aceite
 2. Control de la presión del circuito de aceite auxiliar
 3. Control sobre la duración de los estacionarios
- Se ocupará de la preparación de la instalación en los momentos previos al comienzo de los ensayos. Esta preparación consiste en la apertura de válvulas de los circuitos de combustible y agua, la

conexión de los sistemas auxiliares, así como de los sistemas de medida y control.

- Atenderá en todo momento las instrucciones del ingeniero, tanto en los momentos en que se están realizando trabajos con la instalación parada como durante los ensayos. Así mismo, podrá y deberá ayudar en la resolución de problemas, aportando sus conocimientos y experiencia.

1.3.2 Funciones a desarrollar por el ingeniero en el laboratorio

El ingeniero encargado de la instalación tiene entre otras las funciones siguientes:

- Deberá velar por la seguridad de las personas en el laboratorio y en la sala de ensayos, y del motor. Por ello, deberá estar seguro del efecto de sus acciones sobre la instalación, y vigilará con especial precaución los parámetros que entrañen mayor peligrosidad.
- Es el encargado de la realización de los ensayos. Manejará el motor a través del sistema Samaruc, y se ayudará de los técnicos para que los ensayos sean realizados en las condiciones deseadas.
- Es el responsable de la instalación y del motor, así pues, deberá tomar, las decisiones necesarias para solucionar cualquiera de los problemas que puedan surgir.

1.3.3 Funciones a desarrollar por el ingeniero en el proyecto

- Tratará los datos obtenidos en los ensayos, sirviéndose de las herramientas, disponibles, como el modelo de diagnóstico de la combustión, y demás software de tratamiento y procesado de datos.
- Llevará a cabo la planificación y la ejecución de los ensayos.
- Analizará los resultados obtenidos de los ensayos y de los modelos, extrayendo las conclusiones pertinentes para cumplir con los objetivos del proyecto.

1.4 Condiciones particulares

Se entiende por ensayo del motor, el espacio de tiempo en que éste está funcionando y durante el cual se adquieren, a través de los sistemas de medida, datos sobre las condiciones de operación, prestaciones y emisiones de contaminantes para su posterior tratamiento y estudio.

Antes y durante la realización de los ensayos deben observarse una serie de normas, que aseguren la validez de los ensayos, y la integridad de los equipos. La norma UNE-EN 1679-1:1998+A1:2011, "Motores alternativos de combustión interna. Seguridad. Parte 1: Motores de encendido por compresión", comparte muchos principios con nuestro propósito. Es por ello, que puede servir de guía en algunos aspectos como las condiciones de calibración de los sistemas de medida, etc.

1.4.1 Validez de los ensayos

Algunas condiciones a tener en cuenta son:

- Ha de vigilarse que los sensores de medida estén en buen estado de limpieza y de funcionamiento, y proceder a su sustitución cuando no sea así. También se vigilará que el sensores estén en condiciones óptimas para su utilización.
- El ingeniero encargado de la realización de los ensayos, deberá ajustarse lo máximo posible a las condiciones del ensayo en cuanto a presión de admisión, presión de escape, temperatura de admisión...
- Puesto que muchas de las señales medidas son eléctricas, se ha de proveer para ellas un correcto acondicionamiento, de forma que no se vean influenciadas por ruidos o interferencias.

- Antes de comenzar los ensayos, y tras arrancar el motor, ha de esperarse un tiempo prudencial con el motor en marcha, para permitir su calentamiento.
- Ha de procurarse que las medidas de cada bloque de comparación sean realizadas el mismo día, para evitar que las condiciones externas sean distintas.

1.4.2 Integridad de los equipos

Algunas indicaciones que permiten preservar la integridad de los equipos son:

- Deberán vigilarse algunos parámetros como la presión máxima en el cilindro. Para ello, en los ensayos en los que se prevea que se puedan alcanzar presiones críticas, se inyectarán cantidades de combustible cada vez mayores, hasta alcanzar la que corresponda, vigilando en todo momento, mediante la cadena de medida, la presión en el cilindro. También es necesario controlar algunas temperaturas, como la de la bomba de combustible o la del freno, la del aceite...para que no se exceda de los límites que aseguran la integridad de los equipos. En el caso de que no pudieran controlarse se procederá a la parada inmediata del motor.
- Durante los ensayos debe estar funcionando adecuadamente la refrigeración del motor y la del captador de presión (observable esta última mediante la visualización de la circulación del líquido refrigerante a través de un vaso transparente), así como la del freno.
- El ingeniero encargado de la realización de los ensayos procederá adecuadamente a la hora de arrancar y parar el motor. El acercamiento a las condiciones de ensayo ha de realizarse de forma gradual en lo referente a la cantidad de combustible inyectado.

- Antes de arrancar el motor ha de comprobarse que la instalación se encuentra preparada para ello, habiéndose habilitado los circuitos y equipos pertinentes, especialmente los encargados de la refrigeración del motor.
- Vigilar de forma visual las vibraciones de los diferentes elementos de la instalación. Comprobar de forma periódica el estado del apriete de las uniones roscadas.

1.5 Condiciones técnicas

Durante este apartado del pliego de condiciones, se expondrán con todo grado de detalle aquellos requisitos técnicos y de procedimiento que deben cumplirse en el desarrollo de los diferentes ensayos, con la finalidad obvia de que los resultados obtenidos puedan ser considerados como correctos.

De acuerdo con esto, los aspectos que se pretenderán tratar y desarrollar son los siguientes:

- En primer lugar se plantearán brevemente las condiciones que deben cumplir las salas de ensayos de modo que se garantice la correcta ejecución de los mismos sin poner en peligro la salud de las personas que sea necesario que estén en las proximidades del motor durante el desarrollo de los ensayos experimentales.
- En segundo lugar, se describirán brevemente los métodos con los que deberán ser tratados los distintos instrumentos de medida con la finalidad de asegurar la validez de los distintos resultados que aporten.

1.5.1 Condiciones de la sala de ensayo

La sala de ensayos es el recinto requerido para el ensayo de cada uno de los motores. Este habitáculo, dada la presencia de un motor térmico y una gran cantidad de dispositivos instalados además de la necesidad de paso del personal involucrado en la tarea experimental, debe cumplir los siguientes mostrados a continuación.

1.5.1.1 Dimensiones

Las dimensiones de la sala de ensayos deben ser suficientes para facilitar la ejecución de todas las operaciones necesarias, tanto en relación con el funcionamiento del motor como en lo referido al montaje y la supervisión de

todos los elementos. Este hecho supone que la accesibilidad alrededor del banco en el que está montado el motor ha de ser suficiente para un cómodo acceso del personal.

Así las zonas de acceso para el mantenimiento y uso de la instalación disponen de una altura libre desde el suelo no inferior a 2 metros y un paso libre de al menos 50 centímetros.

1.5.1.2 Accesibilidad

La sala de ensayos ha de tener las dimensiones necesarias para permitir en todo momento la ejecución de los trabajos de montaje, mantenimiento e inspección que sean necesarios, sin peligro para las personas ni para la instalación. Para ello, se situará el motor de forma que la mayoría de sus partes resulten accesibles, siendo recomendable su situación en el centro de la sala. La distancia libre alrededor del motor será como mínimo de 1m.

El acceso a la sala se realizará a través de una puerta insonorizada, de al menos 1m de ancho, para permitir el paso de equipos. Además el laboratorio ha de disponer de una salida directa al exterior, y el camino desde cualquier punto de la sala hasta el exterior ha de ser lo más corto posible y encontrarse siempre libre de obstáculos. Todo debe estar normalizado según el plan contraincendios de la instalación.

Las puertas deberán ser además metálicas y de un espesor suficiente para el correcto aislamiento (térmico y sonoro) de la sala. Su apertura deberá ser hacia el exterior de la sala y para su accionamiento debe ser suficiente con un leve empujón hacia el exterior y con una manivela hacia el interior.

El acceso al laboratorio de ensayos estará restringido al personal autorizado.

Además de todo esto, la instalación de los motores dentro de la sala de ensayos debe ser tal que permita la fácil supervisión, mantenimiento o

sustitución de cualquiera de sus piezas, sin que por ello el personal corra peligro de daño alguno.

1.5.1.3 Ventilación y sistema de extracción de gases

El local ha de estar permanentemente ventilado cuando el motor esté en funcionamiento. Por tanto debe haber un aporte continuo de aire limpio desde el exterior y, del mismo modo, será necesaria una continua extracción de los gases quemados generados por el motor.

Los conductos de gases deben ser completamente estancos, e instalarse en lugares en que no entorpezcan el entorno de la sala. Las partes de conductos de transporte de los gases de escape o fluidos a altas temperaturas, y que sean accesibles normalmente a las personas deberán disponer de aislamiento térmico de protección.

Si la sala de ensayos linda con el exterior (patios, solares, etc.), ésta debe disponer en algún lugar de su parte inferior de unas aperturas cuya sección total vendrá dada por la expresión que se muestra a continuación:

$$S_1(\text{cm}^2) = \frac{Q}{500}$$

1.1

Donde Q es la potencia calorífica total de los equipos de combustión instalados. En el caso de que el valor resultante para esta superficie sea menor que 0'25 m², se adoptará éste valor como mínimo.

En la parte superior de una de las paredes que dé al exterior, o en el techo, y en la posición opuesta a las aperturas de entrada de aire, se dispondrán las aperturas para la salida del mismo hacia el exterior. Estas aperturas de salida deberán disponer de una sección total que vendrá definida por la expresión:

$$S_2 = \frac{S_1}{2}$$

1.2

En los locales interiores aislados sin posibilidad de llegada de aire por circulación natural, se deben disponer llegadas canalizadas de aire, utilizándose los ventiladores adecuados, los cuales deben generar al menos un caudal mínimo de 1'8 m³/h. En ambos casos, para el cálculo de la superficie ventilada, se tendrá únicamente en cuenta el área libre, cualquiera que sea la forma, disposición y material de la rejilla o protección situada sobre la apertura de acceso del aire. En ningún momento se permitirá la presencia de obstáculo alguno que interfiera o impida la libre circulación del aire en la salida.

1.5.1.4 Aislamiento térmico

Todas las superficies que sean susceptibles de exceder la temperatura de 80°C, deben estar convenientemente aisladas en aquellas zonas donde exista riesgo de contacto con elementos para los que dicho nivel de temperatura pueda resultar de alguna manera peligroso. Como sería el caso de posible contacto con el personal de la sala o con algunos materiales, como pueden ser recubrimientos plásticos de los conductores.

1.5.1.5 Aislamiento acústico

Debido a la naturaleza de los ensayos, habrá que hacer especial hincapié en las condiciones de la sala, dado que durante los ensayos, los niveles de ruido llegan a alcanzar en algunos casos valores superiores a 120 dB. Por tanto, las paredes, el suelo y los techos de la sala de ensayos han de tener el adecuado aislante acústico para aislar al resto de los habitáculos. Además, si los puestos de trabajo están muy próximos a la sala, los operarios deberán ir protegidos con cascos.

1.5.1.6 Condiciones de hermeticidad de la sala

Los motores que se van a ensayar en estas salas funcionan con combustibles muy volátiles. Es por ello que por motivos de seguridad, la sala deberá ser estanca respecto a las instalaciones colindantes.

De esta forma no debe existir conexión a través de puertas o ventanas o cualquier otro tipo de aperturas entre la sala y otros locales contiguos que puedan contener productos susceptibles de explosión.

Además, por este mismo motivo, los pasos de conducciones a través de suelos, techos y paredes han de ser del mismo modo estancos, permitiéndose únicamente la ventilación por los conductos dispuestos para la misma.

1.5.1.7 Iluminación

Siguiendo la recomendaciones de la norma DIN 5035, deberá disponerse en la sala de los elementos de iluminación necesarios para asegurar un nivel de iluminancia 7 (750 lux), intermedio entre el correspondiente a "Tareas visuales normales y detalles de tamaño medio con contrastes reducidos" y el correspondiente a "Tareas visuales muy difíciles, pequeños detalles con contrastes reducidos".

La sala de ensayos debe disponer de la adecuada iluminación, sobre todo si se tiene en cuenta que existen ciertos dispositivos que deben ser controlados durante los ensayos. La iluminación se hará por medio de tubos fluorescentes dispuestos en varias luminarias.

1.5.1.8 Protección eléctrica

Para evitar posibles accidentes, debe situarse un interruptor de energía en el exterior de la sala, y un punto donde sea posible cortar la tensión eléctrica de la totalidad de los equipos instalados en el banco de ensayos.

1.5.1.9 Almacenamiento y suministro de combustible

El almacenamiento de combustible tendrá lugar en el interior de la sala, en un pequeño depósito. Desde aquí el combustible será suministrado hasta la bomba de combustible que tiene instalado el motor, por gravedad ya que el depósito está a una altura superior que el motor.

1.5.1.10 Vibraciones

El motor y otras partes susceptibles de sufrir movimientos deben estar perfectamente anclados y fijados para evitar vibraciones indeseadas, que puedan provocar cualquier desprendimiento poniendo en riesgo la seguridad tanto de la instalación como del personal. En el caso de la bancada del motor se han instalado *silentblocks* que reducen las vibraciones significativamente.

1.5.1.11 Otros requisitos

Toda la sala de ensayos ha de estar libre de polvo, gases o vapores inflamables, para evitar riesgos eléctricos o de explosión. Por ello, no deberá existir conexión directa a través de las puertas, ventanas o cualquier otro tipo de aberturas entre la sala de ensayos y otros locales contiguos que puedan contener sustancias susceptibles de inflamarse o explotar.

En la sala de ensayos solo podrán instalarse las máquinas y aparatos necesarios para su servicio, así como los elementos productores o impulsores de los fluidos necesarios para el funcionamiento. El puesto de las personas encargadas de la realización de los ensayos y del manejo de los equipos de adquisición de datos ha de situarse en el exterior de la sala.

Por lo que, será necesario pues, la colocación de una zona de control acristalada para permitir el control visual de la instalación y la detección de

posibles problemas durante le funcionamiento. En algún lugar visible del interior de la sala, se colocará un esquema del motor con sus elementos principales.

1.5.2 Calibración del instrumental

En los instrumentos de medida siempre existe una relación entre los valores de las magnitudes medidas y las reales. Siempre que el valor medido por el instrumento corresponda con el valor real, se estará efectuando una medida correcta.

En la práctica, los instrumentos ofrecen valores inexactos que se apartan en mayor o menor medida del valor real dependiendo del tipo y la calidad del instrumento. De esta forma, el tarado o calibración de la instrumentación consiste en eliminar o reducir al mínimo este error en todo el campo de medida. Los elementos de la instalación susceptibles de ser calibrados son los que se especifican a continuación.

1.5.2.1 Tarado de los sensores de temperatura

El tarado del captador de presión consiste en determinar cuando un sensor deja de funcionar por rotura del puente. Para ello contamos con cuatro sensores cuya dispersión nos dice que un sensor no funciona correctamente. Además se filtra la medida mediante la media de los cuatro sensores por dos motivos: leves dispersiones en la medida y dispersiones en la temperatura dentro del conducto según la profundidad a la que se encuentre el sensor.

1.5.2.2 Tarado de los caudalímetro de aire

El tarado de estos equipos si es una calibración propiamente dicha. Y se debe realizar cada cierto tiempo en el banco de flujo del laboratorio C.M.T., ya que cuentan con una serie de caudalímetros de precisión *sensy-flow* de hilo

caliente. Que son a su vez calibrados con asiduidad por una empresa certificadora.

Para comprobar los caudalímetros de aire de entrada compresor lo que se hace es desmontar el equipo y montarlo en el banco de flujo con que cuenta el departamento. El montaje se realiza en serie con un compresor que trabaja en aspiración y con un medidor de hilo caliente (*sensy-flow*). Para comprobar la bondad de la medida de aire, lo que se hace es poner el compresor a girar y medir la masa de aire mediante el *sensy-flow*, el medidor volumétrico y mediante unas columnas rectas de agua o de mercurio según el rango a comprobar.

Por su parte los caudalímetros de aire de salida turbina son montados en serie en el mismo banco de flujo, pero a impulsión. De esta manera se comprueba la precisión de la medida de la masa de aire consumida por la turbomáquina.

Además se comprueba diariamente que funciona correctamente, ya que tenemos montados habitualmente tres sensores en serie en cada punto de medida. Lo que nos da una idea cuando alguno no funciona correctamente.

Cabe decir que el *sensy-flow* utilizado para esta comprobación se recalibra por parte del fabricante cada año y por tanto es el elemento que sirve como patrón para la comprobación de esta medida.

1.5.2.3 Tarado de los transductores de presión media

El tarado de los sensores de presión media se realiza mediante un generador de funciones. Este equipo es capaz de generar tanto una tensión como una corriente que es constante y regulable con el fin de poder estabilizar la lectura en todo el rango de funcionamiento del sensor.

El equipo de calibración introduce una señal en el sensor mediante su interconexión, y por otro lado se mide la lectura que está generando el sensor

mediante el sistema de adquisición de datos. Mediante la comparación del valor real que se le introduce al sensor y la lectura que este está realizando, se puede corregir por software o mediante el ajuste físico del offset del sensor o de la pendiente de su recta de calibración el valor obtenido y por tanto se realiza así su calibración.

Para una correcta calibración se realizan ajustes en varios puntos del rango de funcionamiento del sensor.

1.5.2.4 Tarado de los sensores de proximidad

Para poder obtener una medida correcta es necesario realizar una calibración de los sensores, por lo que siempre que tengamos que realizar un ensayo deberemos hacer dicha calibración. Es de vital importancia realizar esta acción ya que los sensores están compuestos por fibras muy débiles que pueden quebrarse, por lo que solo con una torsión más bien reducida al montarlos podrían influir en la medida. Es por ello que es recomendable efectuar la calibración justo antes de empezar a medir e instrumentar.

CAPÍTULO 2

CONDICIONES DE SEGURIDAD

Contenido

2	Condiciones de seguridad _____	231
2.1	Introducción _____	231
2.2	Normativa sobre protección auditiva _____	231
2.2.1	Artículo 1 _____	232
2.2.2	Artículo 2 _____	232
2.2.3	Artículo 3 _____	233
2.2.4	Artículo 4 _____	234
2.2.5	Artículo 5 _____	234
2.2.6	Artículo 6 _____	235
2.2.7	Artículo 7 _____	235
2.2.8	Artículo 8 _____	236
2.2.9	Artículo 9 _____	237
2.2.10	Artículo 10 _____	239
2.3	Recomendaciones S.A.E. _____	240
2.4	Ordenanzas generales de seguridad e higiene _____	242
2.4.1	Artículo 1: Obligaciones y derechos de los trabajadores _____	242
2.4.2	Artículo 2: Seguridad estructural _____	243
2.4.3	Artículo 3: Superficies y cubicación _____	243
2.4.4	Artículo 4: Suelos, techos y paredes _____	244
2.4.5	Artículo 5: Disposiciones generales _____	244
2.4.6	Artículo 6: Iluminación de emergencia _____	245
2.4.7	Artículo 7: Ventilación, temperatura y humedad _____	245
2.4.8	Artículo 8: Ruidos, vibraciones y trepidaciones _____	246
2.4.9	Artículo 9: Protección contra contactos en equipos eléctricos _____	247
2.4.10	Artículo 10: Electricidad estática _____	249

2.4.11	Artículo 11: Recomendaciones sobre materias inflamables _	249
2.4.12	Artículo 12: Prevención y extinción de incendios _____	251
2.4.13	Artículo 15: Mecanismos de fricción _____	252
2.4.14	Artículo 16: Protecciones_____	253
2.5	Condiciones a cumplir por la sala _____	254
2.6	Normas para los operadores _____	255
2.7	Condiciones de la instalación del motor_____	256

2 Condiciones de seguridad

2.1 Introducción

Hasta ahora se ha hablado de las condiciones que debían cumplir la sala de ensayos y los diversos elementos instalados en ella para la correcta realización de los ensayos experimentales. En este capítulo del pliego de condiciones se redactarán las normativas referidas a seguridad e higiene en el trabajo. Estas normativas deberán ser cumplidas a lo largo de todo el proceso de realización de los ensayos.

En los siguientes apartados se van a describir las siguientes normativas:

- Extracto de la norma SAE J153: “consideraciones de seguridad para operadores
- Ordenanzas generales de seguridad e higiene en el trabajo
- Normativa sobre protección auditiva

A continuación se va a proceder a exponer con un mayor grado de detalle cada una de estas normativas.

2.2 Normativa sobre protección auditiva

El ruido al que puede ser sometido un usuario de la instalación experimental, procede principalmente del aire al salir con cierta velocidad a través de un orificio, como podría ser al pasar del cárter al cilindro, a través de éste al exterior... Además de esta causa, existen otras como puede ser la transmisión, los extractores de aire e incluso el propio ruido del motor térmico al ser arrastrado.

Para evitar que estos ruidos provocados durante el funcionamiento del motor puedan provocar daños en el aparato auditivo de los operarios, se obligará a estos a que dentro de la instalación usen protectores auditivos.

Además de estos protectores, se recomendará la utilización conjunta de tapones de espuma para los oídos. Las normas que se citan a continuación están destinadas a establecer una serie de medidas para reducir la exposición al ruido durante el trabajo y, de esta forma, disminuir los riesgos para la salud de los operarios.

2.2.1 Artículo 1

La presente norma tiene por objeto la protección de los trabajadores frente a los riesgos de su exposición al ruido durante el trabajo. Lo dispuesto en esta norma será de aplicación a los trabajadores por cuenta ajena, cualquiera que sea la modalidad o la duración de su contrato, con la única excepción de las tripulaciones de los medios de transporte aéreo y marítimo, de acuerdo con lo previsto en el artículo 118.5 de la Ley 3/1987 del 2 de Abril, General de Cooperativas.

Esta norma será, así mismo, aplicable a los socios trabajadores de las Cooperativas de trabajo asociado.

2.2.2 Artículo 2

Para dar efectividad al objeto de protección de los trabajadores, establecido en el artículo anterior, el empresario está obligado a:

Primero: con carácter general, reducir al nivel más bajo técnica y razonablemente posible los riesgos derivados de la exposición al ruido, habida cuenta del progreso técnico y de la disponibilidad de las medidas de control de ruido, en particular, en su origen, aplicadas a las instalaciones u operaciones existentes.

Segundo: a dar cumplimiento de las obligaciones específicas consignadas en esta norma.

2.2.3 Artículo 3

Primero: el empresario deberá evaluar la exposición de los trabajos al ruido con objeto de determinar si se superan los límites o niveles fijados en la presente norma y de aplicar, en tal caso, las medidas preventivas procedentes. El proceso de evaluación comprenderá:

10. Las evaluaciones periódicas que llevarán a cabo, como mínimo anualmente en los puestos de trabajo en los que el nivel diario o el nivel de pico superen los 85dB (A) o 140 dB (B) respectivamente, o cada tres años si no se sobrepasan dichos límites, pero el nivel diario equivalente supera los 80 dB (A).
11. Se deberán realizar evaluaciones adicionales cada vez que se introduzca un nuevo puesto de trabajo, o alguno de los ya existentes se vea afectado por modificaciones que supongan una variación significativa de la exposición de los trabajadores al ruido.
12. Una evaluación en los puestos de trabajo existentes en la fecha de entrada de esta norma.

Segundo: los órganos internos competentes en seguridad e higiene y los representantes de los trabajadores tendrá derecho a:

1. Ser informados sobre las medidas preventivas que deberán adoptarse, a la vista de los resultados de la evaluación, en aplicación a lo dispuesto en la presente norma.
2. Ser informados sobre los resultados de las mismas, pudiendo solicitar las aclaraciones necesarias para la mejor comprensión de su significado.
3. Estar presentes en el desarrollo de las evaluaciones que se realicen acerca de lo expuesto en esta normativa.

2.2.4 Artículo 4

Primero: las evaluaciones de la exposición de los trabajos al ruido se realizarán basándose en la medición del mismo. Estas medidas deberán ser representativas de las condiciones de exposición al mismo y deberán permitir la determinación del nivel diario equivalente y del nivel de pico. Cuando las características de un puesto de trabajo impliquen una variación significativa de la exposición al ruido entre una jornada de trabajo y la siguiente, el empresario podrá utilizar para la evaluación de dicha exposición el nivel semanal equivalente en lugar del nivel diario equivalente, siempre que comunique tal hecho a la autoridad laboral, a efectos de que ésta pueda comprobar que se dan las circunstancias motivadoras de la utilización de este sistema.

Segundo: quedan exceptuados de la evaluación de medición aquellos supuestos en los que se aprecie directamente que en un puesto de trabajo el nivel diario equivalente o el nivel de pico son manifiestamente inferiores a 80 dB (A) y a 140 dB (B) respectivamente.

2.2.5 Artículo 5

En los puestos de trabajo en los que el nivel diario equivalente supere los 80 dB (A) se deberá proporcionar a cada trabajador una información y cuando proceda, una formación adecuada con relación a:

1. La evaluación de la exposición al ruido y los riesgos potenciales para la audición de los trabajadores.
2. Las medidas preventivas adoptadas, con las especificaciones que tengan que ser llevadas a cabo por los mismos.
3. La utilización de los protectores auditivos.
4. Los resultados del control médico de su audición.

5. Realizar un control médico inicial de la función auditiva de los trabajadores, así como posteriores controles periódicos, como mínimo quinquenales.
6. Proporcionar a todos los trabajadores que los soliciten protectores auditivos homologados.

2.2.6 Artículo 6

En los puestos de trabajo en los que el nivel diario equivalente supere los 85 dB (A) se adoptarán las medidas preventivas indicadas en el artículo anterior con las modificaciones que se muestran a continuación:

Primero: el control médico periódico de la función auditiva de los trabajadores deberá realizarse, como máximo, cada tres años.

Segundo: deberán suministrarse protectores auditivos homologados a todos los trabajadores expuestos.

2.2.7 Artículo 7

En los puestos de trabajo en los que el nivel diario equivalente o el nivel de pico superen los 90 dB (A) o los 140 dB (B) respectivamente, se analizarán los motivos por los que se superan tales límites y se desarrollará un programa de medidas técnicas destinado a disminuir la generación o la propagación del ruido, u organizativas encaminadas a reducir la exposición de los trabajadores al ruido. De todo ello se informará a los trabajadores afectados y a sus representantes, así como a los órganos internos competentes en seguridad e higiene en el trabajo.

En los lugares de trabajo en los que no resulta técnica ni razonablemente posible reducir el nivel diario equivalente o el nivel de pico por debajo de los límites mencionados en el apartado anterior y, en todo caso, mientras se está en fase de desarrollo del programa de medidas concebido a

tal fin, deberán adoptarse las medidas preventivas indicadas en el artículo 5 con las siguientes modificaciones:

Primero: los controles médicos periódicos de la función auditiva de los trabajadores deberán realizarse como mínimo anualmente.

Segundo: todos los trabajadores deberán utilizar protectoras auditivas, cuyo uso obligatorio se señalará según lo dispuesto en el Real Decreto 1403/1986, de 9 de Mayo, sobre señalización de seguridad en los diversos centros y locales de trabajo.

Tercero: siempre que el riesgo lo justifique y sea razonable y además técnicamente posible, los puestos de trabajo serán delimitados y objeto de una restricción de acceso.

2.2.8 Artículo 8

Primero: los protectores auditivos serán proporcionados por la empresa en número suficiente y serán elegidos por ésta en consulta con los órganos internos competentes en materia de seguridad e higiene y los representantes de los trabajadores. Los protectores deberán cumplir con las siguientes restricciones:

1. Ajustarse a lo dispuesto en la normativa general sobre medios de protección personal.
2. Adaptarse a los trabajos en los que se utilicen, teniendo en cuenta sus circunstancias personales y las características de sus condiciones de trabajo.
3. Proporcionar la necesaria atenuación del ruido. Mediante el uso de los protectores deberá obtenerse una atenuación del ruido tal que el trabajador dotado de aquellos, tenga una exposición efectiva de su oído al ruido equivalente al de otro trabajador que, desprovisto de protectores, estuviese expuesto a niveles inferiores a los indicados en el artículo 7, o cuando resulta razonable y técnicamente posible, a los

indicados en los artículos 5 y 6. En estos casos de excepcional dificultad técnica, la autoridad laboral podrá conceder exenciones al cumplimiento de lo dispuesto en el párrafo anterior; en tales casos no obstante, deberán utilizarse protectores auditivos que proporcionen la mayor atenuación posible.

Segundo: para trabajadores que efectúen operaciones especiales, la autoridad laboral podrá conceder exenciones a la obligatoriedad de uso de los protectores auditivos, cuando tal uso pudiera conducir a una agravación del riesgo global para la salud y/o seguridad de los trabajadores afectados y no fuera razonable disminuir ese riesgo por otros medios. Las exenciones contempladas en ese apartado y en el anterior se concederán en todo caso por periodo limitado, se revisarán periódicamente y se revocarán en cuanto dejen de concurrir las circunstancias que lo motivaron.

El empresario deberá tomar en cada caso, habida cuenta de las circunstancias particulares, medidas, como pudiera ser la reducción del tiempo de exposición, que sean adecuadas para reducir al mínimo los riesgos derivados de tales exenciones.

Tercero: si la utilización de los protectores llevase consigo asociado un riesgo de accidente, el uso de éstos deberá disminuirse mediante las medidas apropiadas.

2.2.9 Artículo 9

Primero: los empresarios deberán registrar y archivar los datos obtenidos en las evaluaciones de las exposiciones al ruido y en los controles médicos de la función auditiva realizados en cumplimiento de lo dispuesto, respectivamente, en los artículos 3, 4, 5, 6 y 7 de esta norma.

Segundo: en relación con la evaluación de las exposiciones, el registro comprenderá como mínimo la identificación de cada uno de los puestos de trabajo objeto de evaluación y los resultados obtenidos en cada uno de ellos, con indicación del instrumental empleado.

Tercero: en relación con el control médico de la función auditiva, el registro comprenderá como mínimo:

1. Nombre del trabajador.
2. Número de afiliación a la Seguridad social.
3. Puestos de trabajo ocupado, resultado de los controles periódicos o adicionales efectuados en relación con los riesgos relacionados con la exposición al ruido, además del tiempo medio diario de su utilización, cambios de puesto de trabajo realizados por indicación médica e incidencia patológica relacionada con la audición. Los datos resultantes de las valoraciones del estado de la salud sólo se podrán utilizar como base orientativa para mejorar el ambiente de trabajo con fines médico-laborales y además siempre respetando su carácter confidencial.

Cuarto: el empresario está obligado a mantener los archivos a las que hace referencia este artículo durante al menos treinta años. Si un empresario cesara en su actividad, el que le sucede recibirá y conservará la documentación anterior. Al finalizar los periodos de conservación obligada de los registros, o en el caso de cese de la actividad sin sucesión, la empresa lo notificará a la autoridad laboral competente con una antelación de tres meses, dándole traslado durante ese periodo de toda esa documentación.

El empresario deberá facilitar el acceso a estos archivos a la Inspección de Trabajo y Seguridad Social, al Instituto de Seguridad e Higiene en el Trabajo, a los organismos competentes de las Comunidades Autónomas y a los representantes de los trabajadores.

2.2.10 Artículo 10

A partir de la fecha de entrada en vigor de la presente norma, los equipos de trabajo que se comercialicen, deberán ir acompañados de una información suficiente sobre el ruido que produce cuando se utilizan en la forma y condiciones previstas por el fabricante. Dicha información deberá permitir que el empresario que desee adquirir un determinado equipo pueda realizar una estimación de los niveles de ruido a que van a estar expuestos los trabajadores que lo utilicen, o que se sitúen en sus proximidades.

De no existir un Anexo de especificaciones técnicas, de las previstas en la disposición adicional de esta norma, referidas al contenido de la información prevista en el párrafo anterior, la misma se referirá al puesto de trabajo del operador y deberá incluir como mínimo:

1. El nivel de presión sonora continua equivalente ponderando A, siempre que dicho nivel sea superior a 80 dB (A).
2. El nivel de pico, siempre que este supere los 140 dB (B).

Los empresarios que adquieran un equipo de trabajo deberán requerir del fabricante, importador o suministrador del mismo, la información prevista en este artículo.

2.3 Recomendaciones S.A.E.

Las siguientes recomendaciones se han obtenido de las publicaciones S.A.E. (*Society of Automotive Engineers*), recogiendo únicamente aquellas que afectan directamente o pueden estar relacionadas con la práctica de ensayos de motores en banco de pruebas. Se han obtenido de la norma SAE-J153, "Consideraciones de seguridad para operadores". Estas recomendaciones son:

1. Perfecto conocimiento, por parte de los operadores, de las funciones de todos los controles antes de comenzar las operaciones.
2. Asegurarse de verificar todos los controles en el área de seguridad, antes de comenzar el trabajo.
3. En cualquiera de los casos, el personal deberá despojarse de las prendas de abrigo y utilizar ropas adecuadas.
4. Conocimiento del equipo de seguridad requerido por la máquina y asegurar la perfecta utilización del mismo.
5. Corregir los defectos de la máquina antes de comenzar su periodo de funcionamiento normal.
6. Recoger todos los objetos y herramientas abandonadas cerca o incluso sobre la superficie de la máquina.
7. Poner especial atención si se trata de una máquina con la que normalmente no se ha operado.
8. No realizar apresuradamente las operaciones de montaje y desmontaje de la máquina.
9. Bajo ningún concepto, desatender la máquina mientras esta se encuentre en funcionamiento.
10. Comprobar periódicamente el perfecto funcionamiento de los elementos de alarma, luces de emergencia, etc.

11. Tener constancia de cualquier defecto que surja en la máquina durante el funcionamiento de la misma.
12. Observar los instrumentos frecuentemente, verificando en cualquier situación que la máquina está funcionando correctamente.
13. Mantener la máquina bajo el control de sus limitaciones y no apresurarse en la realización de los ensayos.
14. En ningún caso, se realizarán manipulaciones o ajustes sobre la máquina cuando esta se encuentre en funcionamiento.
15. No se debe permitir fumar si durante el funcionamiento de la máquina se emplean combustibles.
16. Descargar toda la presión mientras se trabaja en sistemas que posean acumuladores de presión.
17. No intentar reparar lo que no se entienda profundamente.

2.4 Ordenanzas generales de seguridad e higiene

En este apartado se detalla la normativa de las ordenanzas de seguridad e higiene en el trabajo, en aquellos artículos que se deberán tener en cuenta para la realización de los ensayos requeridos para el presente proyecto.

2.4.1 Artículo 1: Obligaciones y derechos de los trabajadores

Incumbe a los trabajadores la obligación de cooperar en la prevención de riesgos profesionales en la empresa y el mantenimiento de la máxima higiene en la misma, a cuyos fines deberán cumplir fielmente los preceptos de esta ordenanza y de sus instrucciones complementarias, así como las órdenes e instrucciones que a tales efectos les sean dados por sus superiores.

Los trabajadores, expresamente, están obligados a:

1. Recibir las enseñanzas sobre materia en Seguridad e Higiene y sobre salvamento y socorrismo en los centros de trabajo que les sean facilitados por la empresa o en las instrucciones del Plan Nacional.
2. No introducir bebidas u otras sustancias no autorizadas en los centros de trabajo. Tampoco se podrá presentar o permanecer en los mismos en estado de embriaguez o de cualquier otro género de intoxicación.
3. Someterse a los reconocimientos médicos preceptivos y vacunaciones o inmunizaciones ordenados por las Autoridades Sanitarias competentes o por el Servicio Médico de las Empresas.
4. Cooperar en la extinción de siniestros y en el salvamento de las víctimas de accidentes de trabajo en las condiciones que, en cada caso, fueren racionalmente exigibles.
5. Dar cuenta inmediatamente a sus superiores de las averías y las deficiencias que puedan ocasionar peligros en cualquier centro o puesto de trabajo.

6. Cuidar y mantener su higiene personal para evitar enfermedades contagiosas o molestias a los compañeros del trabajo.
7. Usar correctamente los medios de protección personal y cuidar de su perfecto estado de conservación.
8. Todo trabajador, después de solicitar de su inmediato superior medios de protección personal de carácter preceptivo para la realización de su trabajo, queda facultado para demostrar la ejecución de éste, en tanto no le sean facilitados dichos medios, si bien deberá dar cuenta del hecho al Comité de Seguridad e Higiene o a uno de sus compañeros, sin perjuicio, además de ponerlo en conocimiento de la Inspección Provincial de Trabajo.

2.4.2 Artículo 2: Seguridad estructural

Todos los edificios permanentes o provisionales serán de construcción segura y firme para evitar riesgos de desplome y los derivados de los fenómenos atmosféricos. Por este motivo los cimientos, pisos y demás elementos de los edificios ofrecerán resistencia suficiente para sostener y suspender con seguridad las cargas para los que han sido calculados.

Además, para preservar esta seguridad se indicará por medio de rótulos o inscripciones las cargas que los locales pueden soportar o suspender, quedando totalmente prohibido sobrecargar los pisos y plantas de los edificios.

2.4.3 Artículo 3: Superficies y cubicación

Los locales de trabajo reunirán las siguientes condiciones mínimas:

1. Tres metros de altura desde el piso al techo.
2. Dos metros cuadrados de superficie por cada trabajador.
3. Diez metros cúbicos para cada trabajador

No obstante, en los establecimientos comerciales, de servicios y locales destinados a oficinas y despachos la altura a que se refiere el apartado 1 podrá quedar reducida hasta 2'5 m, pero respetando la cubicación que se establece en el tercer apartado y siempre que el aire se renueve lo suficientemente.

Para el cálculo de la superficie y el volumen no se tendrá en cuenta los espacios ocupados por máquinas, aparatos, instalaciones y materiales.

2.4.4 Artículo 4: Suelos, techos y paredes

El pavimento constituirá un conjunto homogéneo, llano y liso sin soluciones de continuidad; será de material consistente, no resbaladizo o susceptible de serlo con el uso y además de fácil limpieza. Estará al mismo nivel, y de no ser así, se salvarán las diferencias de altura por medio de rampas con pendientes no superiores al 10%.

Por otro lado, tanto los techos como las paredes, deberán reunir las condiciones suficientes para resguardar a los trabajadores de las inclemencias del tiempo. Si han de soportar o suspender cargas deberán reunir las condiciones que se establecen para estos en el artículo segundo.

2.4.5 Artículo 5: Disposiciones generales

Todos los lugares de trabajo o tránsito tendrán iluminación natural, artificial o mixta, pero en cualquier caso apropiado a las operaciones que en ellos se esté realizando. Aunque la luz como se acaba de comentar puede ser natural o artificial, se intentará en la medida de lo posible que ésta sea natural.

Se deberá intensificar la iluminación en máquinas peligrosas, lugares de tránsito con riesgo de caídas, escaleras y salidas de urgencia.

2.4.6 Artículo 6: Iluminación de emergencia

En todos los centros de trabajo se dispondrá de medios de iluminación de emergencia adecuados a las dimensiones de los locales y al número de trabajadores ocupados simultáneamente, capaces de mantener al menos durante una hora la intensidad de cinco luxes y mediante una fuente de energía que será independiente del sistema normal de iluminación.

2.4.7 Artículo 7: Ventilación, temperatura y humedad

En los lugares de trabajo y sus anexos se mantendrá, por medios naturales o artificiales, unas condiciones atmosféricas adecuadas, evitando el aire viciado, exceso de calor o de frío, humedad o sequía y los olores desagradables.

En ningún caso, el anhídrido carbónico ambiental podrá sobrepasar la proporción de 50/10.000, y el monóxido de carbono, la de 1/10.000.

En los locales de trabajo cerrados, el suministro de aire fresco y limpio por hora y por trabajador será al menos de 30 metros cúbicos, salvo que se efectúe una renovación total del aire varias veces por hora, no inferior a seis veces para trabajos sedentarios ni a diez veces para trabajos que exijan un esfuerzo físico superior al normal. En el otro extremo, la circulación de aire en locales cerrados se acondicionará de modo que los trabajadores no estén expuestos a corrientes molestas y que la velocidad del aire no exceda de 15 metros por minuto con temperatura normal, ni de 45 metros por minuto en ambientes extremadamente calurosos.

En los centros de trabajo expuestos a altas y bajas temperaturas, serán evitadas las variaciones bruscas por el medio que se considere más eficaz. Cuando la temperatura sea extremadamente distinta entre los lugares de trabajo, deberán existir locales de paso para que los operarios se adapten gradualmente de unas condiciones a las otras.

De acuerdo con todo lo anterior, se fijan como límites de temperatura y humedad en locales y para los distintos trabajos, siempre que el procedimiento de fabricación lo permita, los siguientes:

- Para trabajos sedentarios: de 17 a 22°C
- Para trabajos ordinarios: de 15 a 18°C

A pesar de estas limitaciones, todos los trabajadores estarán debidamente protegidos contra las irradiaciones directas y excesivas de calor. La humedad relativa de la atmósfera oscilará del 40 al 60%, salvo en instalaciones que haya peligro de generarse electricidad estática, en cuyo caso este valor se deberá limitar necesariamente por debajo del 50%.

En aquellos trabajos en los que por exigencias del proceso los locales están sometidos a un extremo calor o frío, se eliminará la permanencia de los operarios estableciendo, en cada caso, los turnos adecuados.

2.4.8 Artículo 8: Ruidos, vibraciones y trepidaciones

Los ruidos y vibraciones se evitarán o reducirán en la medida de lo posible en su foco de origen, tratando de aminorar su propagación en los locales en los que se encuentren personas trabajando.

De esta forma, el anclaje de las máquinas y aparatos que produzcan ruidos, vibraciones y trepidaciones se realizarán con las técnicas más eficaces, a fin de lograr su óptimo equilibrio estático y dinámico, tales como bancadas cuyo peso sea superior entre 1'5 y 2'5 veces el peso de la máquina que soportan, por aislamiento de la estructura general o por otros recursos técnicos.

Además del anclaje, las máquinas que produzcan ruidos o vibraciones molestas se aislarán adecuadamente y en el recinto de aquellas sólo trabajará el personal para su mantenimiento durante el tiempo indispensable.

Se extremará el cuidado y mantenimiento de las máquinas u aparatos que produzcan vibraciones molestas o peligrosas a los trabajadores y muy

especialmente los órganos móviles y los dispositivos de transmisión de movimiento de las vibraciones que generan estas máquinas.

El control de ruidos agresivos en los centros de trabajo no se limitará al aislamiento del foco que los produce, sino que también deberán adoptarse las prevenciones técnicas necesarias para evitar que los fenómenos de reflexión y resonancia alcancen niveles peligrosos para la salud de los trabajadores.

Las máquinas-herramienta que originen trepidaciones deberán además estar provistas de horquillas u otros dispositivos amortiguadores, y al trabajador que las utilice se les proveerá de equipo de protección personal antivibratorio (cinturón, guantes, almohadillas y botas).

2.4.9 Artículo 9: Protección contra contactos en equipos eléctricos

En las instalaciones y equipos eléctricos, para la protección de las personas contra los contactos con partes habitualmente en tensión, se adoptarán alguna de las siguientes prevenciones:

1. Se alejarán las partes activas de la instalación a distancia suficiente del lugar donde las personas habitualmente se encuentran o circulan, para evitar un contacto fortuito o por la manipulación de objetos conductores, cuando éstos puedan ser utilizados cerca de estas partes activas de la instalación.
2. Se recubrirán las partes activas con el aislamiento apropiado, que permita conservar indefinidamente las propiedades del conductor y que limiten la corriente de contacto a un valor inocuo para las personas.
3. Se interpondrán obstáculos que impidan todo contacto accidental con las partes activas de la instalación. Los obstáculos de protección deben estar fijados en forma segura y ser capaces de resistir los esfuerzos mecánicos usuales. Para la protección contra los riesgos de contacto con las masas de las instalaciones que puedan quedar accidentalmente

con tensión, se adoptarán, en corriente alterna uno o varios de los siguientes dispositivos de seguridad:

- Puesta a tierra de las masas. Las masas deben estar unidas eléctricamente a una toma de tierra o a un conjunto de tomas de tierra interconectadas, que tengan una resistencia apropiada. Las instalaciones, tanto con neutro aislado como con neutro unido a tierra, deben estar permanentemente controladas por un dispositivo que indique automáticamente la existencia de cualquier defecto de aislamiento, o que separe automáticamente la instalación o parte de la misma, en la que esté el defecto de la fuente de energía de la que alimenta.
- Separación de los circuitos de utilización de las fuentes de energía, por medio de transformadores o grupos convertidores, manteniendo aislados de tierra todos los conductores del circuito de utilización, incluso el neutro.
- Dispositivos de corte automático o de aviso, sensibles a la corriente de defecto (interruptores diferenciales), o a la tensión de defecto (relés de tierra).
- Unión equipotencial o por superficie aislada de tierra o de las masas (conexiones equipotenciales).
- Por doble aislamiento de los equipos y máquinas eléctricas.

En el caso de que existan en la empresa circuitos alimentados mediante corriente continua, se adoptarán sistemas de protección adecuados para cada caso, similares a los que se acaban de mencionar para la corriente alterna.

2.4.10 Artículo 10: Electricidad estática

Para evitar peligros por la acumulación de electricidad estática, y especialmente aquellos que pueden venir propiciados por la producción de una chispa en ambientes inflamables, se adoptarán en general algunas o incluso ambas precauciones que a continuación se especifican:

1. La humedad relativa del aire se mantendrá siempre con un valor por debajo del 50%.
2. Las cargas de electricidad estática que puedan acumularse en los cuerpos metálicos serán neutralizadas por medio de la conexión de conductores a tierra. La forma de realizar estas conexiones puede variar dependiendo del tipo de máquina. Entre estas conexiones la forma más frecuente de conectar a tierra son las siguientes:
 - En los ejes y chumaceras de los transmisores a correas y poleas.
 - En lugares más próximos en ambos lados de las correas y en el punto donde salgan las poleas, mediante peines metálicos.
 - En los objetos metálicos que se pinten o barnicen con pistolas de pulverización. Estas pistolas también se conectarán a tierra.

2.4.11 Artículo 11: Recomendaciones sobre materias inflamables

Con respecto al almacenamiento y a la manipulación de las sustancias inflamables, dado su peligrosidad, estas serán todas las precauciones que se deberán cumplir para evitar cualquier accidente:

1. Se prohíbe el almacenamiento conjunto de materiales que al reaccionar entre sí puedan originar incendios.
2. Sólo podrán almacenarse materias inflamables en los lugares y con los límites cuantitativos señalados por los reglamentos técnicos vigentes. De

esta forma se almacenarán en locales distintos a los de trabajo. Si el local de trabajo es único, se deberán construir recintos aislados. En los puestos de trabajo, sólo se depositará la cantidad estrictamente necesaria para el proceso de fabricación.

3. En los almacenes de materias inflamables, los pisos deberán ser incombustibles y además impermeables, a fin de evitar la propagación del posible fuego y evitar escapes hacia sótanos, sumideros o desagües respectivamente.
4. Antes de almacenar sustancias inflamables pulverizadas se comprobará su enfriamiento.
5. El llenado de los depósitos de líquidos inflamables se efectuará lentamente y evitando la caída libre desde orificios de la parte superior, para evitar la mezcla de aire con los vapores explosivos. Estos recipientes de líquidos, además se rotularán indicando su contenido y las precauciones necesarias que se deberán tomar para su manipulación.
6. Antes de almacenar envases de productos inflamables, se comprobará su cierre hermético y si han sufrido algún deterioro o rotura para evitar posibles fugas.
7. El envasado y embalaje de sustancias inflamables se efectuará, siempre que sea posible, fuera de los almacenes de donde procedan, con las preocupaciones y equipo de protección adecuado a cada caso.
8. El transporte de materias inflamables se efectuará con estricta sujeción a las normas fijadas en dispositivos legales vigentes y acuerdos internacionales sobre tal materia, ratificados por el Estado Español.

2.4.12 Artículo 12: Prevención y extinción de incendios

En los centros de trabajo que ofrezcan peligro de incendios, con o sin explosión, se adoptarán las prevenciones que se indican a continuación, combinando su empleo, en su caso, con la protección general más próxima que puedan prestar los servicios públicos contra incendios que a continuación se especifican:

1. Donde existan conducciones de agua a presión, se instalarán suficientes tomas o bocas de agua a distancia conveniente entre sí y cercanas a los puestos fijos de trabajo y lugares de paso del personal, colocando junto a tales tomas las correspondientes mangueras, que tendrán la sección y resistencia adecuadas para soportar la presión.
2. Cuando se carezca normalmente de agua a presión o ésta sea insuficiente, se instalarán depósitos con un volumen suficiente para poder combatir los posibles incendios.
3. En los incendios provocados por líquidos, grasas, pinturas inflamables o polvos orgánicos, solo se deberá emplear agua, y esta deberá estar además muy pulverizada.
4. No se empleará agua para extinguir fuegos en polvos de aluminio o magnesio en presencia de carburo de calcio u otras sustancias que al contacto con el agua produzcan explosiones, gases inflamables o incluso nocivos.
5. En incendios que afecten a instalaciones eléctricas con tensión, se prohibirá el empleo de extintores de espuma química, soda ácida o agua.
6. En la proximidad a los puestos de trabajo con mayor riesgo de incendio, colocados en sitio visible y accesible fácilmente, se dispondrán extintores portátiles o móviles sobre ruedas, de espuma física o química, mezcla de ambas o polvos secos, anhídrido carbónico o agua, según convenga a la causa determinante del fuego a extinguir que sea más probable que haga su aparición.

7. Cuando se empleen distintos tipos de extintores serán rotulados con carteles indicadores del lugar o clase de incendio en el que deban emplearse. Estos extintores serán revisados periódicamente y cargados según las normas de las casas constructoras inmediatamente después de usarlos.
8. Se instruirá al personal, cuando sea necesario, del peligro que presenta el empleo de tetracloruro de carbono y cloruro de metilo en atmósferas cerradas y de las reacciones químicas peligrosas que puedan producirse en los locales de trabajo entre los líquidos extintores y las materias sobre las que puedan proyectarse.
9. En las dependencias con alto riesgo de incendio, queda terminantemente prohibido fumar o introducir cerillas, mecheros o útiles de ignición. Esta prohibición se indicará con carteles visibles a la entrada y en los espacios libres de las paredes de tales dependencias.
10. Se prohíbe igualmente al personal introducir o emplear útiles de trabajo, no autorizados por la empresa que puedan ocasionar chispas por contacto o proximidad a sustancias inflamables.
11. Es obligatorio el uso de guantes, manoplas, mandiles o trajes ignífugos, y de calzado especial contra incendios que las empresas facilitarán a los trabajadores para uso individual.

2.4.13 Artículo 15: Mecanismos de fricción

Cuando se encuentre al descubierto el punto de contacto del mecanismo de accionamiento por fricción, éste estará totalmente resguardado. Asimismo, las ruedas de radios o de disco con orificios estarán completamente cerradas por sendos resguardos. La misión de estos resguardos es impedir que estas ruedas atrapen objetos extraños.

2.4.14 Artículo 16: Protecciones

Para evitar los peligros que puedan causar al trabajador los elementos mecánicos agresivos de las máquinas por acción atrapante, cortante, lacerante, punzante, prensante, abrasivo o proyectista, se instalarán las protecciones más adecuadas al riesgo específico de cada una de las máquinas.

2.5 Condiciones a cumplir por la sala

- Estructura de la sala independiente de la del resto del edificio, de forma que no se transmitan las vibraciones. Con anclajes, sujeciones y sistemas de amortiguamiento allí donde sea necesario.
- Sistema de extracción de gases nocivos producidos por el motor. Además deberá disponer de un sistema de detección de monóxido de carbono en el ambiente, con la correspondiente alarma para avisar en caso de niveles excesivamente altos.
- Insonorización acústica de la sala tanto en elementos estructurales como en puertas y ventanas de control.
- Instalación contra incendios, formada entre otros elementos por extintores adecuados para fuegos producidos por hidrocarburos y por fallos eléctricos. Estos extintores deberán estar situados en lugares visibles, de fácil acceso y a la altura adecuada, cumpliendo en todo momento con la NBE-CPI-96 (“Norma básica de la edificación. Condiciones de protección contra incendios”). Así mismo, los materiales estructurales deberán cumplir con los requisitos de resistencia y estabilidad ante el fuego que se indica en esta dicha norma.
- Iluminación adecuada según el grado de detalle de las actividades a realizar.
- Depósito de combustible separado del motor y exterior a la sala. Ausencia en la sala y en los locales adyacentes de sustancias inflamables o explosivas.
- Control de la instalación del motor desde el exterior de la sala de ensayos.
- Suelo antideslizante

2.6 Normas para los operadores

- Si existe algún puesto de trabajo donde el operario esté sometido a elevado nivel de ruido, continuo o de impacto, se deberá proveer al trabajador de los adecuados medios de protección y periódicamente se evaluará dicho nivel de ruido para comprobar que se encuentra dentro de los límites permitidos.
- Conectar la extracción de la sala siempre antes de empezar los ensayos. En caso de que este sistema no funcione, no se debe arrancar el motor hasta haber subsanado el problema.
- En el caso particular de que fuese necesario entrar en la sala durante el ensayo, se hará con la adecuada protección auditiva, y se procurará una permanencia lo más corta posible.
- Las operaciones que conllevan algún tipo de peligro en su realización deberán ser ejecutadas por personal cualificado, y provisto siempre de los medios de protección adecuados a la tarea a realizar.
- En el caso de que se produzca alguna alarma que indique el desalojo de la sala y del laboratorio, proceder de la forma más rápida y ordenada posible.
- En el laboratorio existen medios para tratar pequeñas lesiones. En caso de daños de mayor envergadura se acudirá a los servicios sanitarios de la U.P.V.
- Evitar el derrame de aceite y/o combustible y en caso de producirse proceder a su inmediata limpieza.
- Mantener siempre el orden y la limpieza dentro de la sala y en el laboratorio en general.
- No se permitirá el acceso a la sala durante la realización del ensayo.
- Ensayar siempre con la puerta de la sala cerrada.

2.7 Condiciones de la instalación del motor

- La transmisión de potencia al freno debe estar protegida con un elemento suficientemente rígido para evitar que algún elemento de la transmisión pueda salir despedido en caso de rotura fortuita de la misma o que se produzca la proyección de algunos de sus elementos de anclaje. De igual forma que ocurre con la transmisión desde el motor eléctrico al freno.
- Los sistemas de venteo o de calibración de equipos que operen con fluidos nocivos (acondicionador de combustible, medidor de humos de escape, medidor del gas de soplado *blow-by*...) han de tener el desahogo en el exterior de la sala de ensayos.
- El motor, dinamo-freno, depósito de remanso han de estar eléctricamente conectados a tierra, para evitar el peligro de posibles derivaciones de los aparatos eléctricos de la instalación.
- El volante de inercia del motor debe de estar protegido adecuadamente, para evitar la salida del mismo o de alguna de sus partes de anclaje, en caso de avería durante el funcionamiento del motor.
- Todos los componentes de la instalación han de estar accesibles sin peligro de lesión por interferencia de otras piezas. Se ha de asegurar una accesibilidad mecánica rápida y segura.

Contenido

Anexos	259
Programa en MatLab	259
Imágenes	268
Tablas	272

Anexos

Programa en MatLab

```

function [semiejemayor semiejemenor X1 Y1 cx cy alfa perimeter r_time
r_s r_b1_f_trans
r_b2_f_trans]=filtro_pb_fft_trans_sinYsub_v4_p02_fases_2sub_datawindow
_ejes(me,rpm,b1,b2); %variables de salida del programa
% me son los datos de la máxima excentricidad en dos columnas x e y.
% b1 y b2 deben ser matrices de dos columnas tiempo (s) y señal medida
en voltios (v).
% La señal de b2 debe estar 90° retrasada respecto a b1.

% calibración del sensor b1:
% b1 (mm)=c41*b1 (V)^4+c31*b1 (V)^3+c21*b1 (V)^2+c11*b1 (V)+c01
c41=0.0277;c31=0.1875;c21=0.4715;c11=0.3304;c01=0.1688+0.189; %-0.54
% b2 (mm)=c42*b2 (V)^4+c32*b2 (V)^3+c22*b2 (V)^2+c12*b2 (V)+c02
c42=0.0549;c32=0.3892;c22=1.0232;c12=0.9588;c02=0.3905-1.13; %-0.61
%La ventana temporal se establece en los "dat" datos.
dat=10000;
%minoracion es la disminución del pico sincrono por irregularidades
superficiales de la tuerca a el eje.
minoracion=0.2;

b1mm=b1;
b1mm(:,2)=c41*b1(:,2).^4+c31*b1(:,2).^3+c21*b1(:,2).^2+c11*b1(:,2)+c01
;
b2mm=b2;
b2mm(:,2)=c42*b2(:,2).^4+c32*b2(:,2).^3+c22*b2(:,2).^2+c12*b2(:,2)+c02
;

%Se calcularan "n_vent" veces la fft y se analizará.
l1=length(b1);
l2=length(b2);
l3=length(rpm);
if (l1~=l2)|| (l1~=l3)
    fprintf(1,'\nERROR El tamaño del vector de datos de los dos
sensores de posición y del sensor de régimen debe ser del mismo
tamaño.\n');
end
n_vent=floor(l1/dat); %calcula los datos para la ventan temporal

%Frecuencias de medida y vectores de frecuencias.
fm1=1/(b1(2,1)-b1(1,1)); %frecuencia señal 1
s1=[(0:(dat/2)-1).*fm1/dat].'; %vector de frecuencia
fm2=1/(b2(2,1)-b2(1,1)); %frecuencia señal 2
s2=[(0:(dat/2)-1).*fm2/dat].';
fm3=1/(rpm(2,1)-rpm(1,1));
if (fm1~=fm2)|| (fm1~=fm3)
    fprintf(1,'\nERROR La frecuencia de medida del vector de datos de
los dos sensores de posición y del sensor de régimen debe ser la
misma.\n');
end
fm=fm1;
s=s1;

%Dimensionado de vectores (uf=unfiltered) (f=filtered).

```

```

b1_uf=b1(1:dat,:);
b2_uf=b2(1:dat,:);
b1_f=b1_uf;
b2_f=b2_uf;
b1_f_trans=zeros(dat/2,n_vent);
b2_f_trans=zeros(dat/2,n_vent);
time=zeros(n_vent,1);
%Dimensionado de los percentiles en una matriz (percentile) de cuatro
columnas: tiempo, maximum eccentricity, unfiltered signal, filtered
signal y diametro circunferencia unfiltered.
percentile=ones(n_vent,5);
%percentil "me_percentil" del Diámetro de la máxima excentricidad.
me_percentil=100;
me_square=zeros(size(me));
me_square(:,1)=(me(:,1)-mean(me(:,1))).^2;
me_square(:,2)=(me(:,2)-mean(me(:,2))).^2;
me_diam=2*(me_square(:,1)+me_square(:,2)).^0.5;
percentile(:,2)=prctile(me_diam,me_percentil);
%percentil "uf_percentil" del Diámetro de la unfiltered signal.
uf_percentil=99.5;
uf_square=zeros(dat,2);
uf_square_d(1,2)=zeros;%zeros(dat,2);
uf_diam_d(1:1:200,2)=zeros;

%percentil "f_percentil" del Diámetro de la filtered signal.
f_percentil=100;
f_square=zeros(dat,2);

mkdir('pngs');

for in1=1:n_vent

    fprintf(1,'Iteración %4.0f /%4.0f \n', in1, n_vent);

    %Margenes de la ventana temporal mv1, mv2.
    mv1=(dat*(in1-1))+1;
    mv2=dat*(in1);
    time(in1)=b1(mv1+dat/2,1);
    %fft de b1.
    b11 = b1(mv1:mv2,2);
    w=window(@hamming,length(b11));
    b11=w.*(b1(mv1:mv2,2)-mean(b1(mv1:mv2,2)));
    z1=fft(b11+mean(b1(mv1:mv2,2)))/dat;
    zz1=[z1(1:(dat/2)).'].';
    P1=(abs(zz1));
    b1_uf(:,2)=ifft(z1)*dat;
    %fft de b2.
    b22 = b2(mv1:mv2,2);
    w=window(@hamming,length(b22));
    b22 = w.*(b2(mv1:mv2,2)-mean(b2(mv1:mv2,2)));
    z2=fft(b22+mean(b2(mv1:mv2,2)))/dat;
    zz2=[z2(1:(dat/2)).'].';
    P2=(abs(zz2));
    b2_uf(:,2)=ifft(z2)*dat;
    %Quita el ruido de las señales, con un valor de diferencia en
    amplitud
    %de noise

    for ini = 1 : length (P1);
        noise = max(P1(ini,1), P2(ini,1))- min(P1(ini,1), P2(ini,1));
    end
end

```

```

z1_fo=z1;
z2_fo=z2;
if noise/max(P1(ini,1), P2(ini,1)) > 0.8;
    P1(ini,1)= min(P1(:,1));
    P2(ini,1)= min(P2(:,1));
    z1_fo(ini,:)=0;%quita el ruido en la frecuencia baja
    z2_fo(ini,:)=0; %quita el ruido en la frecuencia baja
    z1_fo(dat-ini+2,:)=0; % quita el ruido en la frecuencia alta
    z2_fo(dat-ini+2,:)=0; % quita el ruido en la frecuencia alta
end
end

b1_ufo(:,2)=ifft(z1_fo)*dat; %es el valor del sensor quitado el
ruido magnético
b2_ufo(:,2)=ifft(z2_fo)*dat;

%Busca la frecuencia sincrona a partir de régimen promedio del
turbo (con un margen de seguridad de "frec_sec" Hz).
frec_sec=0.05*(mean(rpm(mv1:mv2,2))/60);
f_turbo=mean(rpm(mv1:mv2,2))/60;
in_f_turbo_b=round((f_turbo-frec_sec)*dat/fm+1);
in_f_turbo_a=round((f_turbo+frec_sec)*dat/fm+1);
[max_1,in_f_max_1]=max(P1(in_f_turbo_b:in_f_turbo_a));
[max_2,in_f_max_2]=max(P2(in_f_turbo_b:in_f_turbo_a));%devuelve el
máximo valor y su posición
in_f_max_1=in_f_max_1+in_f_turbo_b-1;
in_f_max_2=in_f_max_2+in_f_turbo_b-1;
f_sin_1=(in_f_max_1-1)*fm/dat;
f_sin_2=(in_f_max_2-1)*fm/dat;
desvio_f_sin=abs((f_sin_2/f_sin_1)-1);
if desvio_f_sin>0.05
    fprintf(1,'\nERROR Las frecuencias sincronas de los dos
sensores no coinciden.\n');
end
f_sin=(f_sin_1+f_sin_2)/2;

%Busca el máximo de frecuencia menor al régimen de giro (frec.
subsincrona) (con un margen de seguridad de "frec_sec" Hz).
%frec_sec=0.05*f_turbo;

if f_sin < 350;
    frec_sec=0.15*f_turbo;
else f_sin >= 350;
    frec_sec=0.25*f_turbo;
end

P12_dif=abs(P1-P2);
P12_sum=zeros(round((f_sin-frec_sec)*dat/fm)+1);
for in2=2:round((f_sin-frec_sec)*dat/fm)+1
    %Si la diferencia entre las señales de los dos sensores es
mayor de
    %"dif_ruido" %, se considera que esas señales son ruido.
    dif_ruido=0.6;
    if P12_dif(in2)/max(P1(in2),P2(in2))<dif_ruido;
        P12_sum(in2)=P1(in2)+P2(in2);
    end
end
[max_1,in_f_max_1]=max(P12_sum(2:round((f_sin-
frec_sec)*dat/fm)+1));
in_f_max_1=in_f_max_1+2-1;

```

```

f_sub=(in_f_max_1-1)*fm/dat;

%busca el segundo y tercer subsincrono

% if f_sub < 50;
%   frec_sec_sub = 0.01*f_sub;
%else f_sub >= 50;
%   frec_sec_sub =0.20*f_sub;
%end
frec_sec_sub = 0.05*f_sub;
%f_sub(1)=f_sub;
%for in=2:3;
%   f_sub(in)= f_sub(in-1);
%   dato_fcb_2 = round((f_sub*dat/fm)+1);
%   dato_fca_2 = dat-dato_fcb_2+2;
%   P21 = P1;
%   P21(dato_fcb-round(frec_sec_sub):dato_fcb+round(frec_sec_sub),:)=
0;
%   P21(dato_fca-round(frec_sec_sub):dato_fca+round(frec_sec_sub),:)=
0;

% [max_1,in_f_max_1] = max(P21(5:round((f_sin-
frec_sec)*dat/fm)+1));
% in_f_max_1=in_f_max_1+2-1;
% f_sub(in) = (in_f_max_1-1)*fm/dat;
% f_sub(in+1)=(in_f_max_1-1)*fm/dat;
%end
P21 = P1;
P22 = P2;
%P21 = zeros(round((f_sin-frec_sec_sub)*dat/fm)+1);
P21_dif=abs(P21-P22);
P21_sum=zeros(round((f_sin-frec_sec)*dat/fm)+1);
for in2=2:round((f_sin-frec_sec)*dat/fm)+1
%Si la diferencia entre las señales de los dos sensores es
mayor de
%"dif_ruido" %, se considera que esas señales son ruido.
dif_ruido=0.5;
if P21_dif(in2)/max(P1(in2),P2(in2))<dif_ruido;
P21_sum(in2)=P21(in2)+P22(in2);
end
end
P21_sum(dato_fcb_2-
round(frec_sec_sub):dato_fcb_2+round(frec_sec_sub),:)= 0;
P21_sum(dato_fca_2-
round(frec_sec_sub):dato_fca_2+round(frec_sec_sub),:)= 0;
P21_sum(1:2,:)= 0;
P21_sum(dat-1:dat,:)= 0;

[max_1,in_f_max_2] = max(P21_sum(5:round((f_sin-
frec_sec)*dat/fm)+1));
in_f_max_2=in_f_max_2+5-1;
f_sub_2=(in_f_max_2-1)*fm/dat;

%Filtro de b1
z1_f=zeros(size(z1));
%Frec. continua
z1_f(1,:)=z1(1,:);
%Frec. sincrona
dato_fcb=round((f_sin*dat/fm)+1);
dato_fca=dat-dato_fcb+2; %

```

```

z1_f(dato_fcb,:)=z1(dato_fcb,:);
if abs(z1_f(dato_fcb,:))<minoracion
    z1_f(dato_fcb,:)=0;
else
    z1_f(dato_fcb,:)=z1_f(dato_fcb,:)-
minoracion*exp(j*angle(z1_f(dato_fcb,:)));
end
z1_f(dato_fca,:)=z1(dato_fca,:);
if abs(z1_f(dato_fca,:))<minoracion
    z1_f(dato_fca,:)=0;
else
    z1_f(dato_fca,:)=z1_f(dato_fca,:)-
minoracion*exp(j*angle(z1_f(dato_fca,:)));
end

%Frec. subsincrona
dato_fcb = round((f_sub*dat/fm)+1);
dato_fca = dat-dato_fcb+2;
dato_fcb_21 = round((f_sub_2*dat/fm)+1);
dato_fca_21 = dat-dato_fcb_21+2;
z1_f(dato_fcb,:)=z1(dato_fcb,:);
z1_f(dato_fca,:)=z1(dato_fca,:);
z1_f(dato_fcb_21,:)=z1(dato_fcb_21,:); %segundo subsincrono
z1_f(dato_fca_21,:)=z1(dato_fca_21,:);

zz1_f=[z1_f(1:(dat/2)).'].';
P1_f=(abs(zz1_f));
b1_f(:,2)=ifft(z1_f)*dat;

%Filtro de b2
z2_f=zeros(size(z2));
%Frec. continua
z2_f(1,:)=z2(1,:);
%Frec. sincrona
dato_fcb=round((f_sin*dat/fm)+1);
dato_fca=dat-dato_fcb+2;
z2_f(dato_fcb,:)=z2(dato_fcb,:);
if abs(z2_f(dato_fcb,:))<minoracion
    z2_f(dato_fcb,:)=0;
else
    z2_f(dato_fcb,:)=z2_f(dato_fcb,:)-
minoracion*exp(j*angle(z2_f(dato_fcb,:)));
end
z2_f(dato_fca,:)=z2(dato_fca,:);
if abs(z2_f(dato_fca,:))<minoracion
    z2_f(dato_fca,:)=0;
else
    z2_f(dato_fca,:)=z2_f(dato_fca,:)-
minoracion*exp(j*angle(z2_f(dato_fca,:)));
end

%Frec. subsincrona
dato_fcb = round((f_sub*dat/fm)+1);
dato_fca = dat-dato_fcb+2;
dato_fcb_21 = round((f_sub_2*dat/fm)+1);
dato_fca_21 = dat-dato_fcb_21+2;
z2_f(dato_fcb,:)=z2(dato_fcb,:);
z2_f(dato_fca,:)=z2(dato_fca,:);
z2_f(dato_fcb_21,:)=z2(dato_fcb_21,:); %segundo subsincrono
z2_f(dato_fca_21,:)=z2(dato_fca_21,:);
zz2_f=[z2_f(1:(dat/2)).'].';

```

```

P2_f=(abs(zz2_f));
b2_f(:,2)=ifft(z2_f)*dat;

%Gráficas rpm
scrsz = get(0,'ScreenSize');
figure('OuterPosition',[1 1 scrsz(3) scrsz(4)]);
subplot(2,2,1);
plot(rpm(:,1),rpm(:,2),'y');
hold on;
plot(rpm(mv1:mv2,1),rpm(mv1:mv2,2),'k');
%legend('turbo speed','time window');
axis([0 4 0 165000]);
title('Signal turbo (rpm)','FontSize',16);
xlabel('time (s)','FontSize',14);
set(gca,'XTick',0:0.5:4,'FontSize',12);
ylabel('speed (rpm)','FontSize',14);
set(gca,'YTick',0:20000:160000,'FontSize',12);
grid on;
%frame = getframe(gcf);
%imapng = ['pngs\Turbo_speed_' num2str(in1,'%04.4g') '.png'];
%imwrite(frame.cdata,imapng,'png')
%close;

%Gráficas de FFT
%figure;
subplot(2,2,2);
plot(s1,P1,'k');
hold on;
plot(s2,P2,'c');
legend('sensor 1','sensor 2');
title('Power spectral density (sensors)
unfiltered','FontSize',16);
xlabel('frequency (Hz)','FontSize',14);
ylabel('voltage (V)','FontSize',14);
grid on;
xlim([0 3000]);
set(gca,'XTick',0:500:3000,'FontSize',13);
ylim([0 0.02]);
text(20, 0.019,['turbo speed freq. ',num2str(f_sin,'%10.0f'),'
Hz'],'FontSize',12);
text(20, 0.017,['time ',num2str(time(in1),'%10.2f'),'
sec'],'FontSize',12);

%grafica fases
%subplot(2,2,3);
%plot(s1,angle(zz1),'b');
%hold on
%plot(s2,angle(zz2),'r');
%title('Phase (sensors) unfiltered');
%xlabel('frequency (Hz)');
%ylabel('angle (rad)');
%grid on;
%axis([1 2 -pi +pi])
%set(gca,'YTick',-pi:pi/2:pi)
%set(gca,'YTickLabel',{'-pi','-pi/2','0','pi/2','pi'})
%axis 'auto x'
%frame = getframe(gcf);
%imapng = ['pngs\FFT_' num2str(in1,'%04.4g') '.png'];
%imwrite(frame.cdata,imapng,'png')
%close;

```



```

%Gráficas de FFT filtradas
subplot(2,2,4);
plot(s1,P1_f,'k');
hold on;
plot(s2,P2_f,'c');
legend('sensor 1','sensor 2');
title('Power spectral density (sensors) filtered','FontSize',16);
xlabel('frequency (Hz)','FontSize',14);
ylabel('voltage (V)','FontSize',14);
grid on;
xlim([0 3000]);
set(gca,'XTick',0:500:3000,'FontSize',13)
ylim([0 0.01]);

%Shaft motion

b1mm_uf=b1_uf;

b1mm_uf(:,2)=c41*b1_uf(:,2).^4+c31*b1_uf(:,2).^3+c21*b1_uf(:,2).^2+c11
*b1_uf(:,2)+c01;
b2mm_uf=b2_uf;

b2mm_uf(:,2)=c42*b2_uf(:,2).^4+c32*b2_uf(:,2).^3+c22*b2_uf(:,2).^2+c12
*b2_uf(:,2)+c02;

b1mm_f=b1_f;

b1mm_f(:,2)=c41*b1_f(:,2).^4+c31*b1_f(:,2).^3+c21*b1_f(:,2).^2+c11*b1_
f(:,2)+c01;
b2mm_f=b2_f;

b2mm_f(:,2)=c42*b2_f(:,2).^4+c32*b2_f(:,2).^3+c22*b2_f(:,2).^2+c12*b2_
f(:,2)+c02;

x=b1mm_f(:,2);
y=b2mm_f(:,2);

[semimajor_axis, semiminor_axis, x0, y0, phi] = ellipse_fit(x, y);
a=semimajor_axis;
b=semiminor_axis;
perimeter_orbit(in1,1) = pi*((3*(a+b))-(((3*a)+b)*(a+(3*b)))^0.5);
semiejemayor(in1,1)=semimajor_axis;
semiejemenor(in1,1)=semiminor_axis;
X1(:,1)=x;
Y1(:,1)=y;
alfa(in1,1)=phi;
cx(in1,1)=x0;
cy(in1,1)=y0;

%calculo shaft motion con valores sin filtrar pero quitado el
ruido de
%los sensores
b1mm_ufo=b1_ufo;

b1mm_ufo(:,2)=c41*b1_ufo(:,2).^4+c31*b1_ufo(:,2).^3+c21*b1_ufo(:,2).^2
+c11*b1_ufo(:,2)+c01;
b2mm_ufo=b2_ufo;

b2mm_ufo(:,2)=c42*b2_ufo(:,2).^4+c32*b2_ufo(:,2).^3+c22*b2_ufo(:,2).^2
+c12*b2_ufo(:,2)+c02;

```

```

%tiempo para la matriz percentile.
percentile(in1,1)=rpm(mv1,1);
%percentil "uf_percentil" del Diámetro de la unfiltered signal.
uf_square(:,1)=(b1mm_ufo(:,2)-mean(b1mm_ufo(:,2))).^2;
uf_square(:,2)=(b2mm_ufo(:,2)-mean(b2mm_ufo(:,2))).^2;
uf_diam=2*(uf_square(:,1)+uf_square(:,2)).^0.5;
percentile(in1,3)=prctile(uf_diam,uf_percentil);

%percentil "f_percentil" del Diámetro de la filterd signal.
f_square(:,1)=(b1mm_f(:,2)-mean(b1mm_f(:,2))).^2;
f_square(:,2)=(b2mm_f(:,2)-mean(b2mm_f(:,2))).^2;
f_diam=2*(f_square(:,1)+f_square(:,2)).^0.5;
percentile(in1,4)=prctile(f_diam,f_percentil);

b1_f_trans(:,in1)=P1;
b2_f_trans(:,in1)=P2;

%centro circunferencia de percentile unfiltered
uf_square_d(1,1) =
mean(b1mm_ufo(:,2));%(max(prctile(b1mm_ufo(:,2),uf_percentil))+min(prc
tile(b1mm_ufo(:,2),uf_percentil))./2);%
(max(prctile(uf_square(:,1)).^0.5,uf_percentil))+
min(prctile(uf_square(:,1).^0.5,uf_percentil)))./2;
uf_square_d(1,2) =
mean(b2mm_ufo(:,2));%(max(prctile(b2mm_ufo(:,2),uf_percentil))+min(prc
tile(b2mm_ufo(:,2),uf_percentil))./2);%(max(prctile(uf_square(:,2)).^0.
5,uf_percentil))+ min(prctile(uf_square(:,2).^0.5,uf_percentil)))./2;

for ini3 = 1 : 200;
    uf_diam_d(ini3,1) =
uf_square_d(1,1)+(percentile(in1,3)/2*cos(ini3));
    uf_diam_d(ini3,2) =
uf_square_d(1,2)+(percentile(in1,3)/2*sin(ini3));
end

%percentile(in1,5)=prctile(uf_diam_d,uf_percentil);

%grafica movimiento del eje
%figure;
subplot(2,2,3);
plot(me(:,1),me(:,2),'k','MarkerSize',5);
hold on;
axis([0.4 1.1 0.4 1.1]);
%plot(b1mm_ufo(:,2),b2mm_ufo(:,2),'y');
plot(b1mm_f(:,2),b2mm_f(:,2),'k');
%plot(uf_diam_d(:,1),uf_diam_d(:,2),'c');
title('Shaft motion','FontSize',16);
xlabel({'sensor1_f (mm)'},'FontSize',14);
set(gca,'XTick',0:0.1:5,'FontSize',12)
set(gca,'YTick',0:0.1:5,'FontSize',12)
ylabel('sensor2_f (mm)', 'FontSize',14);
grid on;
daspect([1 1 1]);
frame = getframe(gcf);
imapng = ['pngs\Shaft_motion_' num2str(in1,'%04.4g') '.png'];
imwrite(frame.cdata,imapng,'png')
close;

end
fprintf(1,'\n');

```

```

r_time=time;
r_s=s;
r_b1_f_trans=b1_f_trans;
r_b2_f_trans=b2_f_trans;
perimeter = perimeter_orbit;

figure;
plot(percentile(:,1),percentile(:,2),'k');
hold on;
plot(percentile(:,1),percentile(:,3),'r');
plot(percentile(:,1),percentile(:,4),'b');
legend('maximum eccentricity','unfiltered signal','filtered signal');
title('Diameter variation (mm)','FontSize',16);
xlabel('time (s)');
ylabel('Diameter (mm)');
grid on;

%percentile adimensionalizado con la máxima ecc.
percentile_adimen = zeros(size(percentile));
percentile_adimen(:,1) =percentile(:,1);
percentile_adimen(:,2) = percentile(:,2)/mean(percentile(:,2));
percentile_adimen(:,3) = percentile(:,3)/mean(percentile(:,2));
percentile_adimen(:,4) = percentile(:,4)/mean(percentile(:,2));

figure; % gráfica de percentiles adimensionalizados
plot(percentile_adimen(:,1),percentile_adimen(:,2),'k');
hold on;
plot(percentile_adimen(:,1),percentile_adimen(:,3),'r');
plot(percentile_adimen(:,1),percentile_adimen(:,4),'b');
legend('maximum eccentricity','unfiltered signal','filtered signal');
title('Diameter variation (dimensionless)','FontSize',16);
xlabel('time (s)');
ylabel('Diameter (dimensionless)');
grid on;

cd('pngs')
imagenes = getarchivos('*.png');
nombrevideo = 'video.mpg';
fps = 5; %fps a los que fueron tomados las imágenes.
videomencoder(nombrevideo,imagenes,fps)
cd ..

```

Imágenes

Imagen 1.1 Edificio 6D Departamento de máquinas y motores térmicos	21
Imagen 2.1 Esquema de un motor sobrealimentado	35
Imagen 2.2 Motor sobrealimentado	37
Imagen 2.3 Comparación entre ciclo ideal de un motor de aspiración natural y el correspondiente a un motor sobrealimentado	38
Imagen 2.4 Esquema de un motor sobrealimentado con refrigeración del aire de admisión	40
Imagen 2.5 Efecto del enfriamiento del aire de sobrealimentación sobre la densidad de entrada al motor	41
Imagen 2.6 Turbocompresor	42
Imagen 2.7 Compresor volumétrico	43
Imagen 2.8 Compresor compres	44
Imagen 2.9 Mapa de funcionamiento de un turbocompresor	45
Imagen 2.10 Partes de un turbogrupo	46
Imagen 2.11 Esquema del cojinete radial	47
Imagen 2.12 Cojinete axial	48
Imagen 2.13 Posición del cojinete en el eje del turbo	48
Imagen 2.14 Principio de lubricación	50
Imagen 2.15 Lubricación de un cojinete	51
Imagen 2.16 Esquema utilizado por Newton para medir la rigidez	53
Imagen 2.17 Ranura circunferencial completa, situada en la parte central de un cojinete	56
Imagen 2.18 Rotores rígidos y flexibles vistos como un sistema masa-resorte	61
Imagen 2.19 Modelo de Rankine	62
Imagen 2.20 Giro síncrono y no-síncrono	63
Imagen 2.21 Vista de perfil del rotor Jeffcott, con coordenadas	64
Imagen 2.22 Desequilibrio correspondiente con el rotor Jeffcott (a) amplitud, y (b) fase	65

Imagen 3.1 Sala climática-altitud _____	75
Imagen 3.2 Esquema de la instalación del motor sobre la bancada _____	79
Imagen 3.3 Motor K9K _____	80
Imagen 3.4 Sistema de inyección common-rail _____	82
Imagen 3.5 Línea de escape _____	83
Imagen 3.6 Silenciador del motor K9K _____	83
Imagen 3.7 Esquema de la línea de escape _____	83
Imagen 3.8 Línea de combustible _____	84
Imagen 3.9 Esquema de la línea del combustible _____	84
Imagen 3.10 Acople del turbo al motor _____	85
Imagen 3.11 Unidad de control electrónico (E.C.U.) _____	86
Imagen 3.12 Esquema de entrada y salida de señales de la E.C.U. _____	90
Imagen 3.13 Banco de equilibrado _____	93
Imagen 3.14 Máquina de equilibrado de ejes Giesler _____	94
Imagen 3.16 Ordenador _____	95
Imagen 3.17 Balanza de precisión _____	95
Imagen 3.17 Estructura de aluminio _____	96
Imagen 3.18 YokoGawa DL708E _____	97
Imagen 3.19 Fuente de alimentación TTi EL302T _____	98
Imagen 3.20 Mesa de trabajo _____	99
Imagen 3.21 Pie de rey Mitutoyo _____	99
Imagen 3.22 Esquema de montaje de los sensores ópticos _____	102
Imagen 3.23 Sensor óptico completo _____	103
Imagen 3.24 Detalles del potenciómetro del sensor óptico _____	103
Imagen 3.25 Cabeza del sensor óptico _____	104
Imagen 3.26 Esquema de medida _____	105
Imagen 3.28 Sensor de presión _____	106
Imagen 3.28 Termopar tipo K _____	107
Imagen 3.29 Sensor de régimen de giro _____	109
Imagen 3.30 Posición del sensor de régimen de giro en la carcasa del compresor _____	110
Imagen 3.31 Esquema de un encoder angular _____	112
Imagen 3.32 Vista del cuadro de control del motor _____	114
Imagen 3.33 Programa Inca _____	116

Anexos

Imagen 3.34	Módulo BNC/TC-2095 _____	118
Imagen 3.35	Módulo BNC-2090 _____	119
Imagen 3.36	Módulo SCXI _____	119
Imagen 3.37	Display del Samaruc _____	120
Imagen 3.38	Registrador _____	121
Imagen 3.39	Esquema eléctrico del pedal del acelerador _____	122
Imagen 3.40	Aplicación de control del pedal _____	123
Imagen 3.41	Cadena de medida YokoGawa _____	124
Imagen 3.42	Pantalla de configuración de un canal _____	127
Imagen 3.43	Configuración de la Yoko-General _____	128
Imagen 3.44	Configuración de la Yoko-Canales _____	128
Imagen 3.45	Configuración de la Yoko-Trigger _____	129
Imagen 4.1	Sensor óptico midiendo sobre la rueda del compresor _____	136
Imagen 4.2	Sensor óptico midiendo sobre la tuerca incorporada a la rueda del compresor _____	137
Imagen 4.3	Válvula para regular el caudal suministrado por el compresor _	141
Imagen 4.4	Carcasa instrumentada _____	143
Imagen 4.5	Rueda del compresor con una muesca de equilibrado pintada de blanco _____	144
Imagen 4.6	Esquema de montaje de un sensor _____	145
Imagen 4.7	Colocación de elementos en el momento de calibrar _____	145
Imagen 4.8	Obtención de un valor de voltaje a una determinada distancia	146
Imagen 4.9	Obtención de un valor de voltaje con ligera fluctuación _____	147
Imagen 4.10	Curva de calibración _____	148
Imagen 4.11	Curva de calibración con distintas zonas de comportamiento	149
Imagen 4.12	Máxima excentricidad _____	150
Imagen 4.13	Medida de máxima excentricidad _____	151
Imagen 4.14	Máxima excentricidad calculada _____	152
Imagen 4.15	Esquema de los parámetros para el cálculo de la máxima excentricidad _____	153
Imagen 4.16	Turbo instalado con los sensores _____	155
Imagen 4.17	Turbo instalado _____	156
Imagen 4.18	Roces de los alabes con la carcasa del compresor _____	159

Imagen 4.19 Entorno de trabajo de MatLab R2012b	160
Imagen 4.20 Imagen correspondiente al procesado	163
Imagen 4.21 Figura correspondiente al diameter	165
Imagen 4.22 Figura correspondiente al dimensionless	165
Imagen 5.1 Turbo GT17	174
Imagen 5.2 Resumen de picos de frecuencia del sensor 1	175
Imagen 5.3 Resumen de picos de frecuencia del sensor 4	176
Imagen 5.4 Resumen de perímetros y semiejes para los distintos estacionarios	177
Imagen 5.5 Evolución de la presión de aceite en el circuito de lubricación del turbo	178
Imagen 5.6 Dimensionalidad de los distintos estacionarios	179
Imagen 5.7 Evolución de los distintos centro de la órbita en regímenes estacionarios	180
Imagen 5.8 Ejemplo de orbita cuasi-periódica	182
Imagen 5.9 Fotograma correspondiente a la rampa de aceleración a bajo régimen	183
Imagen 5.10 Fotograma correspondiente a la rampa de aceleración a medio régimen	183
Imagen 5.11 Fotograma correspondiente a la rampa de aceleración a alto régimen	184
Imagen 5.12 Fotograma correspondiente a la rampa de aceleración en el momento de deceleración	184
Imagen 5.13 Variación de la dimensionalidad del transitorio	186
Imagen 5.14 Variación del diámetro del transitorio	187
Imagen 5.15 Sensores instalados en el GT17	189
Imagen 5.16 Máximas excentricidades representadas	190
Imagen 5.17 Evolución de las características de las orbitas medidas con ambos sensores	190

Tablas

- Memoria descriptiva

Tabla 2.1 Características de ambas máquinas _____	45
Tabla 3.1 Características de los perfiles UPN de la bancada _____	78
Tabla 3.2 Características del motor K9K _____	81
Tabla 3.3 Parámetros de entrada y salida de la unidad de control electrónico	91
Tabla 3.4 Instrumentación requerida _____	100
Tabla 4.1 Tabla de calibración _____	147
Tabla 5.1 Variación de offsets de los sensores _____	191

- Presupuesto

Tabla 1.1 Material de oficina _____	280
Tabla 1.2 Uso de equipos informáticos _____	280
Tabla 1.3 Horas del personal _____	281
Tabla 1.4 Reuniones del equipo para analizar el avance _____	281
Tabla 1.5 Líquidos fungibles _____	282
Tabla 1.6 Material fungible _____	282
Tabla 1.7 Horas de utilización de las salas _____	283
Tabla 1.8 Tabla para el cálculo del precio por año _____	283
Tabla 1.9 Tabla para el cálculo de precio por hora _____	283
Tabla 1.11 Banco de equilibrado-calibrado _____	285
Tabla 1.12 Presupuesto global del proyecto por conceptos _____	286

Bibliografía

Libros

Machinery Vibration and Rotordynamics. John Vance, Fouad Zeidan, Brian Murphy. Editorial: John Wiley & Sons, Inc. Año de publicación: 2010.

Motores de combustión interna alternativos. Francisco Payri González, José María Desantes Fernández. Editorial: Reverté. Año de publicación: 2012.

Manual de automóviles. Manuel Arias Paz. Editorial: C.I.E. Inversiones editoriales Dossat-2000. Año de publicación: 2006.

Hydrodynamic Lubrication. Yukio Hori. Editorial: Springer. Año de publicación: 2006.

Normativa

Supercharger testing standard. S.A.E. J1723 ISSUED AUG95. Society of Automotive Engineers, Inc. 1995.

Turbocharges gas stand test code. S.A.E. J1826 REAF. MAR95. Society of Automotive Engineers, Inc. 1995.

Expresiones matemáticas para los términos de fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y de logística del mantenimiento. UNE EN 61703.

Prevención de riesgos laborales. Ley 31/95 de 8 de noviembre, B.O.E. nº 269 de 10 noviembre.

Sistemas de gestión de calidad. UNE-EN ISO 9001. AENOR. Diciembre 2000.

Consultas en Internet

Boletín oficial del estado. <http://www.boe.es/>

Universidad Politécnica de Valencia. <http://www.upv.es/index-va.html>

Turbos Garrett. <http://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/>

Normas AENOR. <http://www.aenor.es/aenor/inicio/home/home.asp>

Normas ISO <http://www.iso.org/iso/home.html>

DOCUMENTO 3

PRESUPUESTO



Contenido

1	Presupuesto	279
1.1	Introducción	279
1.2	Presupuestos parciales	280
1.2.1	Material de oficina	280
1.2.2	Coste de la mano de obra	281
1.2.3	Elementos fungibles	282
1.2.4	Material amortizable	283
1.3	Presupuestos global	286

1 Presupuesto

1.1 Introducción

En este documento se detalla el presupuesto que corresponde al proyecto de análisis del movimiento del eje en turbocompresores, donde se detalla, por un lado, los costes parciales de todos los conceptos y materiales que han sido necesarios para llevar a cabo la consecución de los objetivos planteados, y, por otro, se expone el presupuesto global. Se han diferenciado los siguientes costes en los presupuestos parciales:

- Material de oficina
- Coste de la mano de obra
- Elementos fungibles (material que no es amortizable)
- Material amortizable (tanto el que necesitemos, como el preexistente)

A partir de estos costes parciales, obtenidos mediante los presupuestos parciales, se elabora el presupuesto global del proyecto considerado como la suma total de todos los presupuestos parciales desarrollados y contabilizados. En este presupuesto es cuando se le añade, un 21% de incremento debido al Impuesto sobre el Valor Añadido (I.V.A.). La unidad monetaria que se ha empleado en la realización del proyecto es el euro (€).

El proyecto se ha realizado durante un periodo de 8 meses aproximadamente, entre septiembre del 2012 y mayo de 2013. Se han considerado 20 días laborables al mes con jornada laboral de 8 horas, resultando un total de 160 horas al mes.

1.2 Presupuestos parciales

1.2.1 Material de oficina


	Presupuesto parcial 1		
	Concepto	Material de oficina	
Descripción	Unidades (ud)	Precio unitario (€/ud)	Total (€)
Papel	385	0,04	15,4
Impresiones/Fotocopias	19	0,05	0,95
Libros	2	17,4	34,8
Libreta	1	12,35	12,35
Total por concepto			63,5

Tabla 1.1 Material de oficina


	Presupuesto parcial 2		
	Concepto	Uso de equipos informáticos	
Descripción	Unidades (h)	Precio unitario (€/h)	Total (€)
Uso ordenador	980	0,4	392
Uso impresora	2	0,4	0,8
Uso escáner	3	0,3	0,9
Total por concepto			393,7

Tabla 1.2 Uso de equipos informáticos

1.2.2 Coste de la mano de obra


	Presupuesto parcial 3			
	Concepto	Horas del personal		
Descripción	Unidades (h)	Precio unitario (€/h)	Total (€)	
Ingeniero <i>junior</i>	1.280	15	19.200	
Ingeniero <i>senior</i>	15	40	600	
Ingeniero doctorando	250	35	8.750	
Técnico	60	30	1.800	
Tornero	35	30	1.050	
Total por concepto			31.400	

Tabla 1.3 Horas del personal


	Presupuesto parcial 4			
	Concepto	Reuniones del equipo para analizar el avance		
Descripción	Unidades (ud)	Precio unitario (€/ud)	Total (€)	
Reuniones mensuales con el cliente	4	350	1.400	
Reuniones periódicas	9	173	1.557	
Total por concepto			2.957	

Tabla 1.4 Reuniones del equipo para analizar el avance

1.2.3 Elementos fungibles


	Presupuesto parcial 5		
	Concepto	Líquidos fungibles	
Descripción	Unidades (l)	Precio unitario (€/l)	Total (€)
Combustible (diesel)	80	1,59	127,2
Aceite para el motor	15	6,93	103,95
Total por concepto			231,15

Tabla 1.5 Líquidos fungibles


	Presupuesto parcial 6		
	Concepto	Material fungible	
Descripción	Unidades (ud)	Precio unitario (€/ud)	Total (€)
Spray blanco	1	8,95	8,95
Cinta de carrozero	1	4,39	4,39
Botella de aceite para engrase (200 ml)	1	10,75	10,75
Botella de disolvente	1	3,8	3,8
1 Bolsa con 10 juntas tóricas	1	7,65	7,65
Panel para juntas (1 x 1 m)	1	138,9	138,9
Tubo de silicona negra	2	18,4	36,8
Elementos de tornillería	24	0,42	10,08
Total por concepto			221,32

Tabla 1.6 Material fungible

1.2.4 Material amortizable


	Presupuesto parcial 7		
	Concepto	Horas de utilización de las salas	
Descripción	Unidades (h)	Precio unitario (€/h)	Total (€)
Sala climática	81	26,94	2.182,14
Banco de equilibrado-calibrado	51	3,4	173,4
Total por concepto			2.355,54

Tabla 1.7 Horas de utilización de las salas

En la Tabla 1.7 tenemos un resumen de cuánto cuesta utilizar las instalaciones con sus aparatos. A continuación se explica cómo se han obtenido dichos valores.

Para el cálculo de la amortización se va a tener en cuenta que se espera amortizar las instalaciones en un periodo de 10 años, por tanto necesitamos averiguar cuánto cuestan todo el equipo empleado. Se puede ver en el precio total por concepto de la Tabla 1.10 y Tabla 1.11 correspondiente a la sala climática y al banco de equilibrado-calibrado. A continuación se calcula las horas que se pueden trabajar al año:

$[52 \text{ semanas/año} - (4 \text{ semanas de vacaciones/año} + 2 \text{ semanas días festivos/año})] \times 40 \text{ horas/semana} = 1.840 \text{ horas/año}$

Sala	Presupuesto parcial (€)	Tiempo de amortización (años)	Precio/año (€/año)
Climática	495.598,91	10	49.559,9
Banco de equilibrado-calibrado	62.433,51	10	6.243,36

Tabla 1.8 Tabla para el cálculo del precio por año

Sala	Precio/año (€/año)	Horas/año (h/años)	Precio/hora (€/h)
Climática	49.559,9	1.840	26,94
Banco de equilibrado-calibrado	6.243,36	1.840	3,4

Tabla 1.9 Tabla para el cálculo de precio por hora


	Presupuesto parcial 8		
	Concepto	Sala climática	
Descripción	Unidades (ud)	Precio unitario (€/ud)	Total (€)
Termopar tipo K cabeza cubierta	15	21,95	329,25
Codificador angular (Kistler 2613A)	1	5.400	5.400
Sensores inductivos TQ-101	3	2.900	8.700
Sensores Monitran	3	2.800	8.400
Acelerómetros	3	2.654,26	7.962,78
Sensores <i>Shaft-Motion</i>	4	3.800	15.200
Pinza amperimétrica	2	560	1.120
Cables coaxiales	25	8,97	224,25
Ordenador	3	1.326,8	3.980,4
YokoGawa DL750	1	57.395,4	57.395,4
Modulos Inca	1	13.823,39	13.823,39
<i>Software</i> Inca	1	7.458,89	7.458,89
Módulos Samaruc	6	563,6	3.381,6
Mesa estándar	2	594,65	1.189,3
Cajonera	1	156,87	156,87
Sillas	3	292,26	876,78
<i>Software</i> Samaruc	1	40.000	40.000
Construcción de la sala climática	1	320.000	320.000
Total por concepto			495.598,91

Tabla 1.10 Sala climática

	Presupuesto parcial 9		
	Concepto	Banco de equilibrado-calibrado	
Descripción	Unidades (ud)	Precio unitario (€/ud)	Total (€)
Máquina de equilibrado de ejes Giesler	1	3.359	3.359
YokoGawa DL708E	1	47.068,95	47.068,95
Mesa micrométrica	1	328,96	329
Cables coaxiales	11	4,97	54,67
Ordenador	1	1.326,8	1.326,8
Estructura de aluminio	1	95,9	95,9
Fuente de alimentación TTi EL302T	1	1.195	1.195
Balanza de precisión AND GX-400	1	1.879,42	1.879,42
Tuercas en titanio	4	42,6	170,4
Pie de rey Mitutoyo	2	213,85	427,7
Barra de plastilina	1	19,36	19,36
Mesa de trabajo con mordaza	1	1.623,45	1.623,45
Mesa estándar	6	594,65	3.567,9
Estantería	1	184,26	184,26
Sillas	5	226,34	1.131,7
Total por concepto			62.433,51

Tabla 1.11 Banco de equilibrado-calibrado

1.3 Presupuestos global


	Presupuesto	
	Concepto	Presupuesto global del proyecto por conceptos
Presupuesto parcial	Descripción	Total (€)
1	Material de oficina	63,5
2	Uso de equipos informáticos	393,7
3	Horas del personal	31.400
4	Reuniones del equipo para analizar el avance	2.957
5	Líquidos fungibles	231,15
6	Material fungible	221,32
7	Horas de utilización de las salas	2.355,54
Total por concepto		37.622,21
Impuesto sobre el valor añadido (I.V.A.)		7.900,66
Total		45.522,87

Tabla 1.12 Presupuesto global del proyecto por conceptos

Como se puede ver en el precio total de la Tabla 1.12, el presupuesto global de dicho proyecto, asciende a la cantidad de **cuarenta y cinco mil quinientos veintidós euros con ochenta y siete céntimos de euro**.