

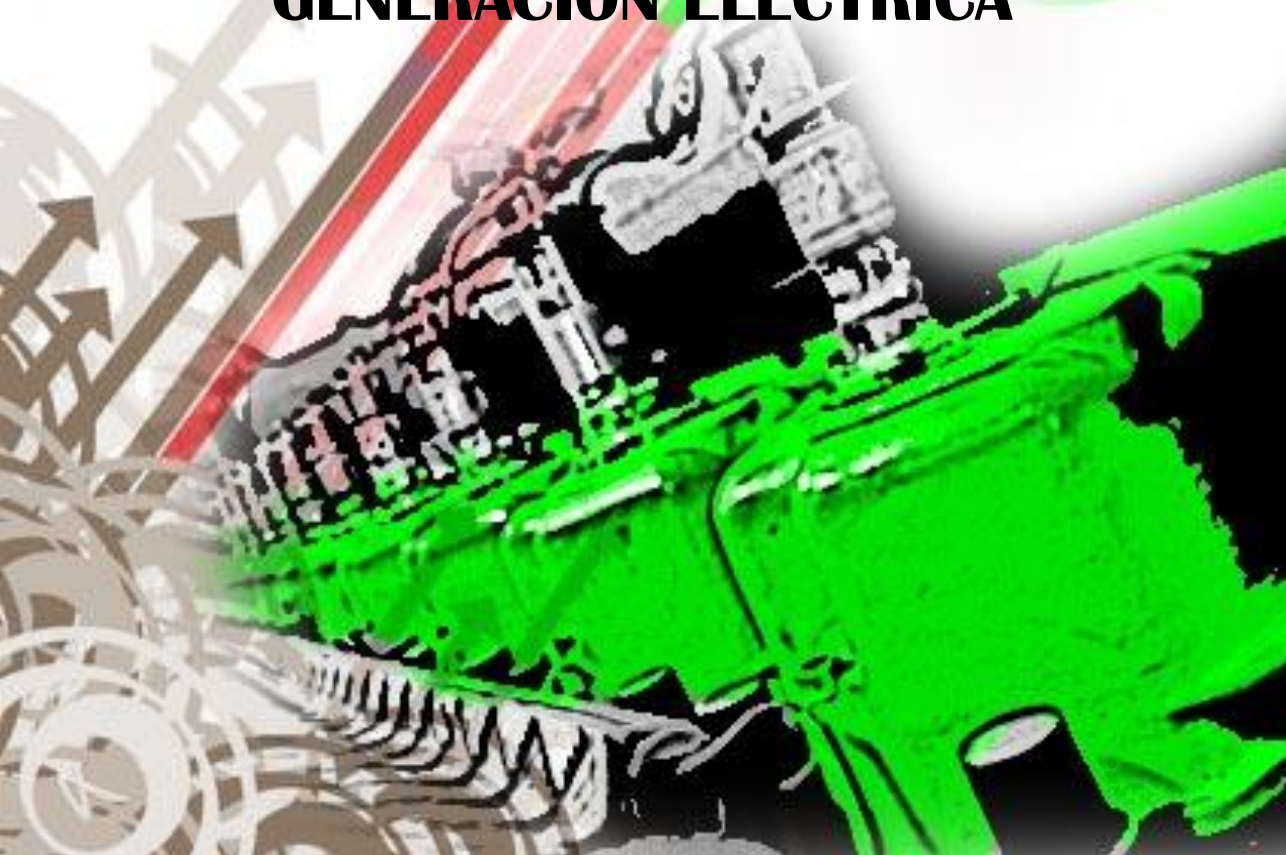
Santiago García Garrido

Diego Fraile Chico

Javier Fraile Martín

# **EL MOTOR ALTERNATIVO DE GAS**

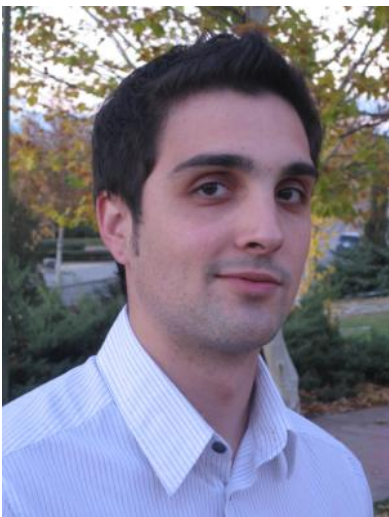
## **MOTORES TÉRMICOS PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA**





**Santiago García Garrido** es licenciado en Ciencias Químicas, Máster en Administración de Empresas (MBA) y Técnico Superior en Electrónica. Ha sido Responsable de Ingeniería de Mantenimiento de MASA, Director Técnico de la revista de electrónica práctica RESISTOR, Director de Planta de la Central de Ciclo Combinado de San Roque (Cádiz), y Director Gerente de OPEMASA, empresa dedicada a la operación y mantenimiento de plantas de energía y, actualmente, Director Técnico de RENOVETEC. Es profesor en ATISAE en el Máster de Ingeniería de Mantenimiento. Es autor de los libros 'Organización y Gestión Integral de Mantenimiento', 'Operación y Mantenimiento de Centrales de Ciclo Combinado', 'Cogeneración: Diseño, Operación y Mantenimiento de Plantas' y 'La contratación del mantenimiento'.

**Diego Fraile Chico** es Doctor Ingeniero de Minas por la Universidad Politécnica de Madrid. Fue premio especial de doctorado por la universidad politécnica de Madrid y premio fundación Gómez-Pardo por la Real Academia de Doctores. Fue profesor de física en la Escuela Superior de Ingenieros de Minas de Madrid. Ha desarrollado toda su carrera profesional en empresas del sector energético. Los veinte últimos años los ha dedicado al diseño y construcción de plantas de generación, cogeneración y biomasa. Ha sido Director de Ingeniería de POWERTEC y en la actualidad es Director de Tecnología de la empresa Oficina Técnica de Servicios e Ingeniería S.A. Es profesor de la Escuela de Organización Industrial (EOI) en el master de Energías Renovables y Mercado Energético. Es autor de numerosos artículos en revistas del sector energético y coautor del libro "Cogeneración. Diseño, operación y mantenimiento de plantas".



**Javier Fraile Martín** es Ingeniero Aeronáutico por la Universidad Politécnica de Madrid. Ha trabajado en el departamento de Motopropulsión y Termofluidodinámica de la ETSI Aeronáuticos, donde estudió la aplicabilidad de ciclos regenerativos a los modernos turboventiladores (turbofan). Desarrolló el proyecto fin de carrera en el Departamento de Performance de Rolls Royce UK, estudiando el arranque de turboventiladores y turbinas de gas en condiciones especiales

Actualmente trabaja en el departamento de análisis térmico de Rolls-Royce UK.

# Índice

## **BLOQUE 1: GENERALIDADES Y FUNDAMENTOS TERMODINÁMICOS**

---

### **1 EL MOTOR ALTERNATIVO**

---

1.1. GENERALIDADES	27
1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES ALTERNATIVOS DE COMBUSTIÓN INTERNA	29
1.3. TIPOS DE MOTORES EN LOS QUE PUEDE USARSE GAS NATURAL	33
1.4. DIFERENCIAS FUNDAMENTALES DE COMPORTAMIENTO ENTRE LOS MOTORES DIESEL Y LOS MOTORES DE GAS	34
1.5. APLICACIONES DE LOS MOTORES ALTERNATIVOS DE COMBUSTIÓN INTERNA DE GAS	36
1.6. PARÁMETROS QUE DEFINEN UN MOTOR DE GAS	40
1.7. RIESGOS DE EXPLOSIÓN Y CLASIFICACIÓN DE ÁREAS	41

### **2 EL MOTOR DE GAS DE CUATRO TIEMPOS Y CICLO OTTO**

---

2.1. BREVE HISTORIA DEL MOTOR DE GAS	45
2.2. EL FUNCIONAMIENTO DE MOTOR DE CUATRO TIEMPOS CICLO OTTO	45

### **3 TERMODINÁMICA DEL CICLO OTTO**

---

3.1. CICLO IDEAL DE AIRE	48
3.2. CICLOS DE AIRE COMBUSTIBLE	52
3.3. CICLO OTTO REAL	54
3.5. CICLO MILLER	56

## **4 RENOVIACIÓN DE CARGA**

---

4.1. RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO	61
4.2. INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN Y DISEÑO EN EL RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO	61
4.3. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DEL GAS Y DE LOS TIEMPOS DE APERTURA DE LA VÁLVULA SOBRE POTENCIA	68
4.4. SEMEJANZA DE LLENADO	69

## **5 REQUERIMIENTOS DE MEZCLA**

---

5.1. DOSADO ESTEQUIOMÉTRICO E INFLUENCIA DE LA RIQUEZA	73
5.2. INFLUENCIA DEL GRADO DE ADMISIÓN	76
5.3. INFLUENCIA DEL RÉGIMEN DE GIRO	78
5.4. DOSADO DE MÁXIMO RENDIMIENTO	79

## **6 LA COMBUSTIÓN EN MOTORES COMO PROCESO QUÍMICO**

---

6.1. EL GAS NATURAL	81
6.2. OTROS COMBUSTIBLES UTILIZABLES EN MOTORES DE GAS	83
6.3. EL AIRE	83
6.4. EL PROCESO DE COMBUSTIÓN	84
6.5. TIPOS DE COMBUSTIÓN	85
6.6. CINÉTICA QUÍMICA DE LA REACCIÓN DE COMBUSTIÓN	86
6.7. EL FRENTE DE LLAMA	89
6.8. DETONACIÓN, ENCENDIDO SUPERFICIAL Y AUTOENCENDIDO	90

## **7 PRESTACIONES DEL MOTOR Y FACTORES DE LOS QUE DEPENDE**

---

7.1. TRABAJO, PRESIÓN MEDIA Y POTENCIA INDICADOS	95
7.2. TRABAJO, PRESIÓN MEDIA Y POTENCIA EFECTIVAS	96
7.3. PAR MOTOR	97
7.4. RENDIMIENTOS	97

7.5. CONSUMO ESPECÍFICO	93
7.6. CURVAS CARACTERÍSTICAS	93
7.7. PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LAS PRESTACIONES DEL MOTOR	97

## **8 SOBREALIMENTACIÓN**

---

8.1. OBJETO Y JUSTIFICACIÓN DE LA SOBREALIMENTACIÓN	107
8.2. TIPOS DE COMPRESORES	119
8.3. TIPOS DE SOBREALIMENTACIÓN	112
8.4. INCONVENIENTES Y RIESGOS ASOCIADOS A LA SOBREALIMENTACIÓN	114
8.5. TURBOSOBREALIMENTACIÓN: ACOPLAMIENTO COMPRESOR-TURBINA	115
8.6. SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE LOS GASES DE ESCAPE	116

## **9 CINEMÁTICA Y DINÁMICO DE LOS MOTORES ALTERNATIVOS**

---

9.1. CINEMÁTICA DEL MECANISMO BIELA-MANIVELA	125
9.2. FUERZAS Y MOMENTOS GENERADOS EN EL SISTEMA MONOCILINDRO	132
9.3. PAR MOTOR DEL SISTEMA MONOCILINDRO	136
9.4. PAR MOTOR DEL SISTEMA MULTICILINDRO	138
9.5. EL VOLANTE DE INERCIA	140

# **BLOQUE II:**

## **SISTEMAS QUE COMPONEN EL MOTOR DE GAS**

---

## **10 ELEMENTOS DE SOPORTE: BLOQUE, CULATAS Y CÁRTER**

---

10.1 EL BLOQUE MOTOR	146
10.2. CULATA	148
10.3. CÁRTER	153
10.4. JUNTAS	153

## **11 EL TREN ALTERNATIVO**

---

11.1. CILINDROS	154
11.2. PISTONES	156
11.3. ANILLOS	157
11.4. BIELAS	158
11.5. COJINETES	158

## **12 EL TREN GIRATORIO**

---

12.1. CIGÜEÑAL	160
12.2. VOLANTE DE INERCIA	163

## **13 EL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE AIRE Y COMBUSTIBLE**

---

13.1. FILTROS DE AIRE DE ADMISIÓN	165
13.2. EL TURBOCOMPRESOR	166
13.3. LA REFRIGERACIÓN DEL AIRE DE COMBUSTIÓN	168
13.4. SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN DE GAS NATURAL	169

## **14 EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN**

---

14.1. ELEMENTOS QUE FORMAN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	172
14.2. TIPOS DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	175
14.3. AJUSTES, DESGASTE Y LUBRICACIÓN	175

## **15 EL SISTEMA DE ENCENDIDO**

---

15.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	176
15.2. ELEMENTOS HABITUALES DEL SISTEMA DE ENCENDIDO	176
15.3. LA BUJÍA	177
15.4. LA CAJA DE ENCENDIDO	181
15.5. LA BOBINA	182
15.6. DETECTOR DE POSICIÓN DEL CIGÜEÑAL	183

## **16 EL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE ALTA TEMPERATURA**

---

16.1. COMPONENTES DEL SISTEMA	<b>185</b>
16.2. MOTORES CON AERORREFRIGERADOR PARA EL CIRCUITO DE ALTA TEMPERATURA	<b>188</b>

## **17 EL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE BAJA TEMPERATURA**

---

17.1. LA FUNCIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE BAJA TEMPERATURA	<b>190</b>
17.2. ELEMENTOS QUE FORMAN PARTE DEL CIRCUITO DE REFRIGERACIÓN DE BAJA TEMPERATURA	<b>191</b>
17.3. CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DEL AGUA DE REFRIGERACIÓN DE BAJA TEMPERATURA	<b>193</b>

## **18 EL SISTEMA DE LUBRICACIÓN**

---

18.1. CONCEPTOS GENERALES SOBRE LUBRICACIÓN	<b>194</b>
18.2. ELEMENTOS QUE FORMAN EL SISTEMA DE LUBRICACIÓN	<b>197</b>
18.3. PARTES DEL MOTOR QUE DEBEN LUBRICARSE	<b>204</b>
18.4. CONSUMO DE ACEITE, ANÁLISIS Y SUSTITUCIÓN DEL LUBRICANTE	<b>205</b>

## **19 EL SISTEMA DE CONTROL**

---

19.1. LA FUNCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL	<b>208</b>
19.2. PRINCIPALES ELEMENTOS DEL SISTEMA DE CONTROL	<b>209</b>
19.3. EL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN ININTERRUMPIDA	<b>210</b>
19.4. PRINCIPALES LAZOS DE CONTROL DEL SISTEMA Y ENCLAVAMIENTOS	<b>210</b>

## **20 SISTEMAS AUXILIARES**

---

20.1. LA BANCADA	212
20.2. EL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	215
20.3. EL SISTEMA DE ARRANQUE	226
20.4. ESTACIÓN DE GAS (ERM)	227
20.5. PLANTAS DE REGASIFICACIÓN	229
20.6. LA VENTILACIÓN DE LA SALA DE MOTORES	230
20.7. SISTEMAS DE ELEVACIÓN	232
20.8. EL EDIFICIO	232
20.9. CHIMENEAS	233

## **BLOQUE III: EL MOTOR DE GAS EN PLANTAS DE COGENERACIÓN**

---

### **21 EL APROVECHAMIENTO TERMICO: PLANTAS DE COGENERACIÓN**

---

21.1. ¿QUÉ ES COGENERACIÓN?	233
21.2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA COGENERACIÓN	236
21.3. JUSTIFICACIÓN DE LA COGENERACIÓN CON MOTOR DE GAS	239

### **22 CONFIGURACIONES HABITUALES EN PLANTAS DE COGENERACIÓN**

---

22.1. CICLO SIMPLE PARA LA GENERACIÓN DE VAPOR O AGUA CALIENTE	241
22.2. CICLO SIMPLE PARA APROVECHAMIENTO DE GASES DIRECTOS	242
22.3. COGENERACIÓN EN CICLO COMBINADO CON MOTOR ALTERNATIVO	243

### **23 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE UNA PLANTA DE COGENERACIÓN**

---

453

## 24 APLICACIONES DE LA COGENERACIÓN CON MOTOR DE GAS

---

24.1.	DISTRIBUCIÓN DEL CALOR APROVECHABLE DEL MOTOR DE GAS	251
24.2.	CICLO TÉRMICO IDEAL DEL MOTOR DE GAS EN APLICACIONES DE COGENERACIÓN	253
24.3.	EL SECTOR INDUSTRIAL Y LAS POSIBILIDADES DE LA COGENERACIÓN	255
24.4.	EL SECTOR SERVICIOS Y LAS POSIBILIDADES DE LA COGENERACIÓN	256
24.5.	INSTALACIONES DE GASES DIRECTOS Y AGUA CALIENTE DE AT PARA SECADO (CERÁMICA ROJA, SECADO DE ÁRIDOS)	256
24.6.	INSTALACIONES EN SECTOR ALIMENTARIO (LÁCTEO Y DERIVADOS, ZUMOS, EMBUTIDOS, MATADEROS) (UTILIZACIÓN DE CALOR Y FRÍO)	259
24.7.	PLANTAS DEL SECTOR CELULOSA Y PAPEL	261
24.8.	LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE PURINES	262
24.9.	LAS PLANTAS DE CONCENTRACIÓN DE SALES MINERALES. EVAPORACIÓN A VACÍO Y CALENTAMIENTO DE SOLUCIONES	265
24.10.	PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y PLANTAS DE BIOGÁS	266
24.11.	PLANTAS DE SECADO DE MADERA, PELLET, FORRAJES, PULPAS Y OTROS DERIVADOS AGROALIMENTARIOS	267
24.12.	PLANTAS DE SECADO DE LODOS DE DEPURADORA	269

## 25 IMPACTO AMBIENTAL

---

25.1.	EMISIONES ATMOSFÉRICAS	272
25.2.	EL CONTROL DE LAS EMISIONES ATMOSFÉRICAS	274
25.3.	LIMITACIONES ESTABLECIDAS PARA LAS EMISIONES ATMOSFÉRICAS	275
25.4.	RUIDO	279
25.5.	EL ACEITE	279
25.6.	VERTIDOS LÍQUIDOS PROCEDENTES DE LA TORRE DE REFRIGERACIÓN	279

## 26 FUNCIONAMIENTO EN ISLA

---

26.1. QUÉ ES EL FUNCIONAMIENTO EN ISLA	281
26.2. CONTROL DEL FUNCIONAMIENTO EN ISLA	282
26.3. PROBLEMAS ASOCIADOS AL FUNCIONAMIENTO EN ISLA	283

## 27 AUDITORÍA ENERGÉTICA DE UNA PLANTA CON MOTOR DE GAS

---

27.1. POTENCIA	285
27.2. RENDIMIENTO	286
27.3. CONSUMO DE ACEITE	286
27.4. CALOR RECUPERADO EN GASES DE ESCAPE	287
27.5. CALOR RECUPERABLE EN AGUA CALIENTE	287
27.6. COSTE FIJO, VARIABLE Y TOTAL DE PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD	288

# BLOQUE IV: COMPRA, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE MOTORES DE GAS

---

## 28 LA SELECCIÓN DE UN MOTOR DE GAS Y PROCESO DE COMPRA

---

28.1. FACTORES A CONSIDERAR EN LA COMPRA DE UN MOTOR ALTERNATIVO DE GAS	293
28.2. CÓMO ELEGIR EL MOTOR MÁS ADECUADO	297

## 29 EL PROCESO DE PUESTA EN MARCHA O *COMMISSIONING*

---

29.1. FASES HABITUALES DEL <i>COMMISSIONING</i> Y PUESTA EN MARCHA	303
29.2. ENTREGA O RECEPCIÓN DE SISTEMAS	304

## 29 EL PROCESO DE PUESTA EN MARCHA O *COMMISSIONING*

---

29.1.	FASES HABITUALES DEL <i>COMMISSIONING</i> Y PUESTA EN MARCHA	303
29.2.	ENTREGA O RECEPCIÓN DE SISTEMAS	304
29.3.	<i>COMMISSIONING</i> FRÍO	305
29.4.	<i>COMMISSIONING</i> CALIENTE	306
29.5.	PRUEBA DE PUESTA EN MARCHA	306
29.6.	COMPROBACIÓN O PRUEBA DE PRESTACIONES	307
29.7.	PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO O DE FIABILIDAD	307
29.8.	ENTREGA DE LA PLANTA (RECEPCIÓN PROVISIONAL)	307
29.9.	RECEPCIÓN DEFINITIVA	308
29.10.	ERRORES HABITUALES DURANTE LA PUESTA EN MARCHA	308

## 30 OPERACIÓN DE MOTORES ALTERNATIVOS DE GAS

---

30.1.	EL PERFIL DEL OPERADOR DE PLANTA	312
30.2.	ARRANQUE DEL MOTOR DE GAS	313
30.3.	PROBLEMAS HABITUALES DURANTE EL ARRANQUE	316
30.4.	VIGILANCIA DE PARÁMETROS DURANTE LA MARCHA NORMAL	316
30.5.	PARADA DEL MOTOR DE GAS	317

## 31 MANTENIMIENTO PROGRAMADO

---

31.1.	MANTENIMIENTO OPERATIVO DIARIO	319
31.2.	AJUSTES QUINCENALES (400 HORAS)	320
31.3.	MANTENIMIENTOS TRIMESTRALES (CADA 2000 HORAS, APROX.)	321
31.4.	MANTENIMIENTOS ANUALES (CADA 8.000 HORAS)	326
31.5.	MANTENIMIENTOS BIANUALES (CADA 16.000 HORAS)	329
31.6.	<i>OVERHAUL</i> O GRAN REVISIÓN	332
31.7.	INSPECCIONES REGLAMENTARIAS	341

## **32 MANTENIMIENTO CORRECTIVO**

---

32.1.	ALARMAS Y DISPAROS	343
32.2.	PRINCIPALES AVERÍAS	347
32.3.	LA IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN DE LA CAUSA DE UNA AVERÍA	357
32.4.	EL SEGURO DE GRANDES AVERÍAS	360

## **33 AUDITORÍAS TÉCNICAS DE MOTORES DE GAS Y ELEMENTOS AUXILIARES**

---

33.1.	LA AUDITORÍA TÉCNICA DEL MOTOR ALTERNATIVO DE GAS	365
33.2.	AUDITORÍA TÉCNICA DE LA ESTACIÓN DE GAS O ERM	367
33.3.	AUDITORÍA TÉCNICA DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	369
33.4.	AUDITORÍA TÉCNICA DEL ALTERNADOR	370
33.5.	AUDITORÍA TÉCNICA DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE EVACUACIÓN DE ENERGÍA	372
33.6.	EJEMPLO DE MODELO USADO EN UNA AUDITORÍA TÉCNICA	374

## **34 REPUESTOS**

---

34.1.	TIPOS DE REPUESTO	377
34.2.	CRITERIOS DE SELECCIÓN	378
34.3.	DIAGRAMA DE FLUJO DE SELECCIÓN DEL REPUESTO	378
34.4.	DETERMINACIÓN SIMPLIFICADA DEL STOCK DE REPUESTO	380
34.5.	ALTERNATIVAS AL REPUESTO ORIGINAL ADQUIRIDO AL FABRICANTE	381
34.6.	REPUESTO HABITUAL EN PLANTAS CON MOTORES ALTERNATIVOS	385
34.7.	CONSUMIBLES (REPUESTO TIPO C)	386

## **35 HERRAMIENTAS PARA EL DIAGNÓSTICO Y EL MANTENIMIENTO DE MOTORES DE GAS**

---

35.1. TENSOR HIDRÁULICO DE PERNOS	<b>391</b>
35.2. BOROSCOPIO	<b>394</b>
35.3. CHISPÓMETRO	<b>395</b>
35.4. OSCILOSCOPIO	<b>396</b>
35.5. HERRAMIENTAS DE CALIBRACIÓN Y COMPROBACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN	<b>397</b>
35.6. ALINEADOR LÁSER	<b>398</b>
35.7. SONÓMETRO	<b>399</b>
35.8. ANALIZADOR DE GASES	<b>401</b>
35.9. CÁMARA TERMOGRÁFICA	<b>403</b>
35.10. ANALIZADOR DE VIBRACIONES	<b>405</b>
35.11. DETECTOR ULTRASÓNICO	<b>406</b>
35.12. HERRAMIENTAS MECÁNICAS HABITUALES	<b>408</b>

## **36 CONTRATOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE MOTORES DE GAS**

---

36.1. TIPOS DE CONTRATOS DE MANTENIMIENTO DEL MOTOR DE GAS	<b>411</b>
36.2. EMPRESAS QUE PUEDEN PRESTAR EL SERVICIO	<b>415</b>
36.3. ASPECTOS A TENER EN CUENTA EN EL CONTRATO DE MANTENIMIENTO DE UN MOTOR DE GAS	<b>418</b>
36.4. LAS CLÁUSULAS DEL CONTRATO	<b>421</b>
36.5. ANEXOS Y ADENDAS	<b>444</b>
36.6. LAS RECOMENDACIONES DE LA NORMA UNE ENV 13269:2007	<b>445</b>
36.7. FASES DE LA VIDA DE UN CONTRATO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	<b>449</b>

<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>453</b>
-----------------------------------	------------

---

# Curso de Operación y Mantenimiento de Plantas de Cogeneración

## **Índice del curso:**

- **Las plantas de cogeneración**
- **Equipos principales**
- **Operación de plantas de Cogeneración**
- **Mantenimiento Programado: El plan de mantenimiento**
- **Mantenimiento Predictivo en plantas de cogeneración**
- **Mantenimiento correctivo: principales averías**
- **Mantenimiento legal**
- **Presupuestos de Operación y Mantenimiento**
- **Contratos: principales cláusulas contractuales**

**Infórmate en**  
**[www.renovetec.com](http://www.renovetec.com)**

# AGRADECIMIENTOS

A Carlos Prieto, de extraordinaria ética y profesionalidad, y en el mejor sentido de la palabra, amigo, por la documentación y ayuda que siempre nos ha prestado, y por su amabilidad y disposición con la que nos ha distinguido para prologar también este libro.

A Josep Casanova, de Rolls Royce Marine España, por su ayuda, su disposición y sus valiosos comentarios.

A Juan Antonio Fernández, Director Comercial de MWM (antes Deutz Power Systems) por su amable colaboración con la documentación enviada sobre sus motores de gas.

A Wärtsila, Jenbacher, Guascor, y Man por su amabilidad al facilitarnos un valioso material con el que ilustrar algunos apartados.

A RS Motor, a German Martinez y a Enrique González, por facilitarnos material gráfico y comentarios con los que enriquecer los apartados dedicados a averías y mantenimiento preventivo.

A Lutz Liebenberg, de Rolls Royce por sus valiosas clarificaciones del *ciclo Miller*

A HC Energía, especialmente a Paulo Villamil, Héctor Nodar y Rubén de la Roza, por darnos las facilidades para ilustrar este libro con algunos de sus equipos.

A Powertec, por su forma de entender la ingeniería, y a todos los profesionales que trabajaron en esa empresa, por el montón de experiencias enriquecedoras en lo personal y lo profesional. De una manera especial a sus fundadores Olle Bergman, Jorma Pellikka y Tuomo Marjokorpi, con recuerdo especial para Kauko, que nos dejó recientemente.

A Piedad Martínez, extraordinaria profesional y amiga. Algunos diagramas realizados por ella provienen de su época en Powertec.

A los profesores de la ETSI Aeronáuticos por los conocimientos transmitidos, algunos de los cuales se han plasmado en este libro.

A Rafael Díaz y Daniel Pieren, por sus aportaciones.

***Y especialmente a nuestras familias, que siempre son una ayuda fundamental en todo lo que emprendemos.***

# Curso de Diseño de Centrales Termosolares

INGENIERIA DE CENTRALES TERMOSOLARES

Infórmate en  
[www.renovetec.com](http://www.renovetec.com)





## **PROLOGO**

Este nuevo libro que nos presentan Diego Fraile Chico y Santiago García Garrido con la colaboración en esta ocasión de Javier Fraile Martín, complementa al anteriormente publicado sobre Cogeneración al profundizar en el análisis de los motores de gas tanto desde el punto de vista termodinámico, como de los sistemas y elementos que lo componen.

Si bien existe abundante literatura sobre motores de combustión interna, el acierto en el planteamiento de libro que aquí se presenta consiste en centrarse en el ámbito específico de los motores de gas para aplicaciones industriales y en particular para la generación de energía. Eso permite abordar en profundidad tanto los aspectos teóricos termodinámicos, como los detalles constructivos relevantes, manteniendo en todo momento un enfoque eminentemente práctico centrado en explicación de los comportamientos y prestaciones de los motores y del conjunto de la instalación así como en la influencia de determinadas variables sobre su funcionamiento.

Para valorar la importancia de la tecnología de motores de gas es conveniente recordar que sólo dentro de las aplicaciones de cogeneración en Régimen Especial en España hay cerca de 2.500 MW de potencia instalada con motores de gas y de acuerdo con el "Análisis del Potencial de cogeneración de alta eficiencia en España. 2010-2020" (IDAE) se calcula que de los 2.500 MW de potencial adicional de cogeneración estimado hasta 2020, el 45% corresponde a la tecnología de motores de gas. En la situación actual de escasez de recursos energéticos y de las implicaciones medioambienta-

les de la generación de energía, el conocimiento de los fundamentos de esta tecnología altamente eficiente así como de los sistemas auxiliares y su explotación contribuyen sin duda a alcanzar los objetivos de eficiencia energética y medioambiental.

Desde el punto de vista de sus aplicaciones prácticas, el motor de gas constituye un elemento más dentro de la cadena de valor de la transformación de la energía cuya aplicación puede ir desde prestar servicios de seguridad de suministro en los que primarán aspectos de fiabilidad, respuesta en el arranque y variaciones de carga, a aplicaciones de generación y/o cogeneración donde normalmente el objetivo final es conseguir el mayor rendimiento eléctrico o global de la instalación junto con una elevada disponibilidad. En este sentido comprender los principios detrás de las prestaciones y cómo éstas se ven afectadas por la variación de algunos parámetros, facilita el adecuado diseño y explotación de este tipo de instalaciones y por lo tanto contribuye a la mejora tecnológica y a la competitividad. En la mayoría de los casos este tipo de equipos e instalaciones operan un elevado número de horas al año durante muchos años, por lo que las secciones dedicadas a la explotación, repuestos y mantenimiento suponen el complemento imprescindible para poder establecer las estrategias adecuadas para su optimización.

Libros como el que aquí se presenta pertenecen en mi opinión a la categoría de "divulgación tecnológica" en el mejor de los sentidos, combinando el rigor con la amenidad (¡en la medida en que el tema lo permite..!) y tanto por la amplitud de los temas que aborda como el nivel de sus explicaciones es una obra imprescindible para entender el estado actual de la tecnología de los motores de gas y de sus aplicaciones.

**Carlos Prieto Ríos**

**Director General de Rolls Royce Marine España, S.A.**

**Junio 2010**



## INTRODUCCIÓN

Este libro nació con una vocación práctica: mejorar la formación de aquellos que trabajan con motores de gas, especialmente los que lo hacen en plantas de cogeneración. Queríamos aportarles información útil para desarrollar su trabajo. Y por ello una parte importante de este libro se ha escrito pensando en el técnico de campo, en las personas que tienen que enfrentarse a la explotación de este tipo de equipos, buscando que entiendan por qué ocurren las cosas, y buscando naturalmente aportarles criterios, pautas de trabajo para mejorar los resultados de su planta y soluciones a los problemas que se le presentan.

No obstante no queríamos hacer solamente un libro práctico. Nuestro objetivo ha sido analizar con rigor el funcionamiento de estas máquinas, para poder deducir los criterios necesarios con los que obtener el máximo provecho. Queríamos también, desde el conocimiento de sus particularidades, deducir en qué medida deben ser aplicados en instalaciones reales para conducir a plantas con las mejores prestaciones. El resultado final creemos que puede interesar tanto al mundo de la explotación de plantas, como al del diseño y a la formación de técnicos.

Un libro como este tenía que ser muy gráfico. Y por ello, tenemos que agradecer a Rolls Royce Marine España, a MWM (Motoren-Werke Mannheim, antigua Deutz Power System), a Man, a Wärtsila, a Jenbacher, a Neo Energía, a Guascor, a German M. Rodríguez y a RS- Motor el facilitarnos material gráfico de primerísimo nivel para ayudarnos a que las explicaciones y las descripciones de sistemas, componentes y su funcionamiento fueran mucho más actuales y más fácilmente asimilables.

Después de la grata experiencia que supuso para nosotros, Diego y Santiago, trabajar juntos en el anterior libro (COGENERACIÓN: DISEÑO, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS), hemos decidido volver a repetir el trabajo en equipo en este libro. Hemos incorporado al proyecto a Javier Fraile, un ingeniero aeronáutico joven que nos ha aportado una visión muy actual y fresca de esta tecnología. La sinergia entre los tres permite profundizar lo suficiente en las bases científicas para sacar conclusiones que permiten la optimización del diseño y la explotación de las plantas, y poner todo ello a disposición de los lectores.

El libro lo hemos dividido en cuatro bloques. El primero está dedicado a los fundamentos científico-técnicos del motor y a las leyes físicas, termodinámicas, químicas y cinéticas que determinan su funcionamiento. Buscamos en este bloque que el

lector entienda *cómo* funciona un motor, *de qué* parámetros depende su buen funcionamiento y *cómo* puede funcionar mejor. Existe numerosa bibliografía que se dedica casi en exclusiva a este asunto, pero la hemos encontrado algo anticuada y con una preocupación casi exclusiva por los motores de automoción, un mercado enorme, pero que como se verá es diferente en algunos aspectos relevantes. Creemos que ya era hora de analizar desde la base el funcionamiento de los motores de gas industriales. Por ello en este libro hemos prestado una especial atención a los últimos desarrollos que han permitido que estos motores desbancaran a los motores diesel y las turbinas de gas de pequeño tamaño en los países industrializados.

El segundo bloque es descriptivo y trata de reflejar como es el interior de un motor: detalla los sistemas y elementos que constituyen los motores alternativos de gas, describiendo incluso cada una de las diferentes opciones constructivas para cada sistema. También en este bloque hemos querido transmitir una visión actualizada, fijándonos especialmente en los motores industriales últimamente desarrollados.

El tercer bloque está dedicado a una de las aplicaciones prácticas de los motores alternativos de gas, la más usual: la generación de energía eléctrica y térmica. En él se repasan conceptos sobre cogeneración, se detallan diferentes configuraciones y sus elementos más comunes, y las distintas aplicaciones que tienen estas plantas. El objetivo fundamental de este bloque es transmitir los elementos que permiten sacar el máximo provecho a las energías disponibles en el motor. Esta es la clave del diseño, como se verá, y en cada una de las aplicaciones que se detallan se muestra cómo utilizar de la mejor manera el calor, lo que conduce a una planta más rentable.

El último bloque está dedicado a todos los que tienen que enfrentarse a la explotación de este tipo de máquinas en su trabajo diario: desde los responsables económicos, encargados de seleccionar el tipo de motor a instalar, el presupuesto de explotación o de definir un contrato de operación y mantenimiento; hasta los técnicos de campo, que deben operar plantas generadoras con estas máquinas, conocer las revisiones que deben efectuar y enfrentarse a las averías más frecuentes.

Esperamos que el lector use este libro de vez en cuando, deseamos que le apetezca tenerlo cerca, que le resulte útil consultarlo. Que, en definitiva, pueda aplicarlo en su trabajo. Esperamos que a cada lector, sea cual sea la razón que le ha empujado a tener este libro en sus manos, pueda aportarle algo de manera que contribuya a hacer profesionales más completos. Nos hará ilusión poder verlo en una mesa de trabajo en grupo en una biblioteca universitaria, en la mesa de un joven ingeniero que está diseñando una instalación energética, y desde luego también en un taller, garabateado y manchado de grasa. Esto significará que habremos cumplido nuestro objetivo: escribir un libro práctico y útil a muchos. profesionales.

**Los autores,  
Javier Fraile Martín, Diego Fraile Chico y Santiago García Garrido**