

## Breve historia del ferrocarril

### Capítulo 1

#### Diseño de nuevas líneas y estaciones

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1. Criterios de diseño de Líneas .....                         | 23 |
| 1.2. Diseño conceptual y pre-dimensionamiento de líneas.....     | 31 |
| 1.2.1. Movilidad vs. Política Territorial .....                  | 31 |
| 1.2.2. Infraestructuras vs. Movilidad .....                      | 32 |
| 1.3. Criterios de diseño de estaciones.....                      | 40 |
| 1.3.1. Estaciones en fondo de saco o pasantes en superficie..... | 41 |
| 1.3.2. Finales de vía y toperas.....                             | 43 |
| 1.3.3. Planta de la estación .....                               | 45 |
| 1.3.4. Estaciones de ferrocarriles metropolitanos.....           | 48 |
| 1.3.5. Configuración de vías en líneas de vía doble.....         | 55 |
| 1.3.6. Gálibos.....                                              | 56 |
| 1.3.7. Perfil longitudinal de las vías en la estación.....       | 59 |
| 1.4. Financiación de infraestructuras ferroviarias.....          | 60 |
| 1.4.1. Introducción.....                                         | 60 |

## Capítulo 2

### Conceptos básicos de infraestructura, vía y cinemática

|                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.1. La vía.....                                                                     | 67  |
| 2.1.1. El carril .....                                                               | 74  |
| 2.1.2. El balasto.....                                                               | 84  |
| 2.1.3. La traviesa .....                                                             | 93  |
| 2.1.4. La vía en placa.....                                                          | 101 |
| 2.1.5. Sujeciones.....                                                               | 113 |
| 2.1.6. Aparatos de vía .....                                                         | 120 |
| 2.2. El trazado ferroviario.....                                                     | 129 |
| 2.3. Los esfuerzos en la vía .....                                                   | 137 |
| 2.4. Cinemática bogie-vía .....                                                      | 143 |
| 2.4.1. Fórmulas del movimiento y adherencia .....                                    | 143 |
| 2.4.2. Resistencias al avance.....                                                   | 147 |
| 2.4.3. La relación entre la potencia, la velocidad y las resistencias al avance..... | 153 |
| 2.4.4. Movimiento de lazo .....                                                      | 156 |

## Capítulo 3

### Material móvil

|                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1. Locomotoras.....                                                         | 161 |
| 3.1.1. Locomotoras de vapor .....                                             | 165 |
| 3.1.2. Locomotoras Diesel.....                                                | 172 |
| 3.1.3. Locomotoras alimentadas con otros combustibles.....                    | 187 |
| 3.1.4. Locomotoras eléctricas.....                                            | 187 |
| 3.2. Material remolcado de medias y largas distancias: coches y vagones ..... | 195 |
| 3.2.1. Clasificación del material remolcado.....                              | 197 |
| 3.3. La Alta Velocidad.....                                                   | 214 |
| 3.3.1. Consideraciones preliminares. Tipos de tracción .....                  | 215 |
| 3.3.2. La vía en la Alta Velocidad .....                                      | 219 |
| 3.3.3. La Alta Velocidad en el mundo .....                                    | 221 |
| 3.3.4. La Alta Velocidad en España.....                                       | 233 |
| 3.4. El caso de metros y tranvías .....                                       | 246 |
| 3.4.1. Estructura .....                                                       | 247 |
| 3.4.2. Cajas modulares de tranvías y metros ligeros .....                     | 258 |
| 3.4.3. Normativa de construcción de cajas ferroviarias .....                  | 261 |

|                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.5. La tracción eléctrica .....                                                                                  | 262 |
| 3.5.1. Introducción.....                                                                                          | 262 |
| 3.5.2. Breve historia de la tracción eléctrica.....                                                               | 263 |
| 3.5.3. Técnicas de tracción reostática.....                                                                       | 264 |
| 3.5.4. Técnica «Chopper» .....                                                                                    | 269 |
| 3.5.5. Técnica trifásica.....                                                                                     | 273 |
| 3.5.6. Evolución de los componentes electrónicos de potencia y su repercusión<br>en los sistemas de tracción..... | 279 |
| 3.5.7. Cofres de electrónica y aparellaje .....                                                                   | 282 |
| 3.6. El freno .....                                                                                               | 284 |
| 3.6.1. Conceptos básicos e introducción .....                                                                     | 284 |
| 3.6.2. Conceptos básicos de la frenada.....                                                                       | 285 |
| 3.6.3. El freno en trenes modernos .....                                                                          | 289 |
| 3.6.4. Mando y control del freno .....                                                                            | 295 |
| 3.6.5. Prestaciones de los frenos.....                                                                            | 297 |
| 3.6.6. El freno eléctrico .....                                                                                   | 299 |
| 3.7. Bogies.....                                                                                                  | 301 |
| 3.7.1. Bastidor.....                                                                                              | 303 |
| 3.7.2. Ejes y ruedas.....                                                                                         | 308 |
| 3.7.3. Ruedas elásticas.....                                                                                      | 316 |
| 3.7.4. Reductores .....                                                                                           | 319 |
| 3.7.5. Diseño y prueba de reductores ferroviarios .....                                                           | 321 |
| 3.7.6. Suspensiones .....                                                                                         | 326 |
| 3.7.7. Elementos auxiliares del bogie.....                                                                        | 330 |
| 3.7.8. Motores de tracción.....                                                                                   | 331 |
| 3.7.9. Bogie remolque.....                                                                                        | 339 |
| 3.7.10. Bogies de tranvías.....                                                                                   | 343 |
| 3.7.11. Desarrollo y nuevos proyectos sobre bogies.....                                                           | 345 |
| 3.7.12. Bogie de ancho variable .....                                                                             | 348 |
| 3.7.13. Normativa de fabricación de bogies .....                                                                  | 350 |
| 3.8. Sistemas embarcados en el material móvil .....                                                               | 351 |
| 3.8.1. El equipo neumático .....                                                                                  | 351 |
| 3.8.2. Pantógrafos.....                                                                                           | 358 |
| 3.8.3. Generadores y convertidores auxiliares .....                                                               | 361 |
| 3.8.4. Circuitos eléctricos .....                                                                                 | 364 |
| 3.8.5. Baterías.....                                                                                              | 368 |
| 3.8.6. Puertas e interiorismo .....                                                                               | 373 |
| 3.8.7. Pasillos de intercurrencia.....                                                                            | 380 |
| 3.8.8. Equipos de climatización.....                                                                              | 382 |

|                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| 3.9. Acoplamientos entre coches.....                            | 388 |
| 3.9.1. Acoplamientos automáticos.....                           | 388 |
| 3.9.2. Acoplamientos semipermanentes.....                       | 390 |
| 3.9.3. Sistemas de tracción y choque de material remolcado..... | 392 |
| 3.10. Otros sistemas de transporte .....                        | 395 |
| 3.10.1. Trenes monoviga.....                                    | 395 |
| 3.10.2. Trenes de cremallera.....                               | 404 |
| 3.10.3. Trolebuses .....                                        | 407 |
| 3.10.4. Transporte por cable .....                              | 410 |
| 3.10.5. Hiperloop .....                                         | 415 |

## Capítulo 4

### Las instalaciones ferroviarias

|                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1. Electrificación y captación de corriente.....                           | 423 |
| 4.1.1. Catenaria.....                                                        | 423 |
| 4.1.2. Criterios de montaje de la catenaria.....                             | 434 |
| 4.1.3. Catenaria rígida.....                                                 | 437 |
| 4.1.4. Tercer carril.....                                                    | 441 |
| 4.1.5. Otros modernos sistemas de captación .....                            | 443 |
| 4.2. Tensiones de alimentación y subestaciones .....                         | 448 |
| 4.2.1. Sistemas de electrificación ferroviaria en corriente alterna .....    | 450 |
| 4.2.2. Alimentación de tracción en continua .....                            | 478 |
| 4.2.3. Principios de subestaciones ferroviarias rectificadoras.....          | 479 |
| 4.2.4. Cálculo y dimensionamiento de subestaciones .....                     | 489 |
| 4.2.5. Telemando de subestaciones.....                                       | 491 |
| 4.2.6. Protecciones e interruptores.....                                     | 494 |
| 4.2.7. Criterios sobre las tensiones de alimentación de tracción.....        | 498 |
| 4.2.8. Sistemas de almacenamiento de energía.....                            | 500 |
| 4.3. Señalización ferroviaria.....                                           | 511 |
| 4.3.1. Introducción y conceptos básicos .....                                | 511 |
| 4.3.2. Señalización convencional. Circuitos de vía y contadores de ejes..... | 514 |
| 4.3.3. Sistemas de protección automática (A.T.P.).....                       | 524 |
| 4.3.4. Sistemas interoperables ERTMS.....                                    | 546 |
| 4.3.5. Sistemas de conducción automática ATO y «driverless» .....            | 548 |
| 4.3.6. Centros de control de tráfico (CTC) .....                             | 553 |
| 4.3.7. Sistemas de señalización tranviaria. Sistema SAE.....                 | 556 |
| 4.3.8. Pasos a nivel.....                                                    | 561 |

|                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.4. Sistemas y equipamiento de estaciones .....                                              | 572 |
| 4.4.1. Telefonía .....                                                                        | 572 |
| 4.4.2. Radiocomunicaciones .....                                                              | 574 |
| 4.4.3. Megafonía.....                                                                         | 577 |
| 4.4.4. Televisión .....                                                                       | 578 |
| 4.4.5. Medios de transmisión.....                                                             | 581 |
| 4.4.6. Instalaciones fijas de estaciones.....                                                 | 583 |
| 4.5. Sistemas y equipamientos de las líneas y túneles .....                                   | 608 |
| 4.5.1. Ventilación de líneas .....                                                            | 608 |
| 4.5.2. Climatización de líneas .....                                                          | 613 |
| 4.5.3. Propagación del humo en túneles .....                                                  | 618 |
| 4.5.4. Criterios funcionales de la ventilación de túneles ferroviarios<br>metropolitanos..... | 618 |
| 4.5.5. Bombeo de aguas en líneas .....                                                        | 620 |
| 4.5.6. Detección y protección contra incendios .....                                          | 622 |
| 4.5.7. Alumbrado de túneles .....                                                             | 624 |

## Capítulo 5

### La operación ferroviaria

|                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1. El concepto de la Operación eficiente.....                                     | 629 |
| 5.2. La calidad del servicio .....                                                  | 633 |
| 5.3. Los costes de explotación .....                                                | 636 |
| 5.4. Operación de transporte de mercancías .....                                    | 639 |
| 5.4.1. Situación general.....                                                       | 639 |
| 5.4.2. Los costes del transporte de mercancías por ferrocarril.....                 | 645 |
| 5.4.3. Operación de transporte de mercancías por ferrocarril.....                   | 647 |
| 5.4.4. Condicionantes operativos.....                                               | 659 |
| 5.4.5. La Reglamentación del Transporte de mercancías por ferrocarril .....         | 664 |
| 5.4.6. Razones para potenciar el transporte por ferrocarril .....                   | 668 |
| 5.5. Operación de líneas de Alta Velocidad .....                                    | 670 |
| 5.5.1. Introducción.....                                                            | 670 |
| 5.5.2. Alta Velocidad en el mundo en general y en Europa en particular .....        | 672 |
| 5.5.3. Operación de trenes de Alta Velocidad en España .....                        | 676 |
| 5.5.4. El material móvil de Alta Velocidad.....                                     | 681 |
| 5.6. Operación de Cercanías, Metros y Tranvías .....                                | 683 |
| 5.6.1. Consideraciones preliminares .....                                           | 683 |
| 5.6.2. Fase de concepción.....                                                      | 685 |
| 5.6.3. Características específicas de las opciones ferroviarias metropolitanas .... | 691 |

## Capítulo 6

### Mantenimiento ferroviario

|                                                                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.1. Mantenimiento del material móvil .....                                                                                                                        | 707 |
| 6.2. Mantenimiento de la vía .....                                                                                                                                 | 710 |
| 6.3. Mantenimiento de infraestructuras e instalaciones.....                                                                                                        | 717 |
| 6.4. Instalaciones para mantenimiento .....                                                                                                                        | 722 |
| 6.5. El material móvil auxiliar .....                                                                                                                              | 733 |
| 6.6. Mantenimiento ferroviario de futuro. El mantenimiento sobre 4.0 .....                                                                                         | 749 |
| 6.7. RCM aplicado al ferrocarril.....                                                                                                                              | 750 |
| 6.7.1. Introducción: Antecedentes históricos en varios sectores y su aplicación al sector ferroviario en general y al ferrocarril metropolitano en particular..... | 750 |
| 6.7.2. La Norma EN 20812 y el RCM.....                                                                                                                             | 753 |
| 6.7.3. Metas y objetivos a alcanzar basándonos en RCM en el ferrocarril.....                                                                                       | 754 |
| 6.7.4. Definición de RCM y de su tecnología aplicada al ferrocarril .....                                                                                          | 755 |
| 6.7.5. Aplicación práctica del análisis por RCM en un metropolitano.....                                                                                           | 759 |
| 6.7.6. Puntos fuertes y débiles de RCM.....                                                                                                                        | 766 |

## Capítulo 7

### Seguridad ferroviaria

|                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.1. Seguridad en la circulación .....                                               | 771 |
| 7.1.1. Conceptos fundamentales de la seguridad en el ferrocarril.....                | 772 |
| 7.1.2. Normativa de seguridad ferroviaria.....                                       | 773 |
| 7.2. Seguridad para las personas y las instalaciones .....                           | 779 |
| 7.2.1. Organismo responsable de la seguridad .....                                   | 788 |
| 7.2.2. Reglas y normas de seguridad de ferrocarriles de medias y largas distancias.. | 789 |
| 7.2.3. Indicadores de seguridad.....                                                 | 792 |
| 7.2.4. Accidentes e incidentes .....                                                 | 794 |
| 7.2.5. Investigación de accidentes .....                                             | 796 |
| 7.2.6. Los cambios significativos.....                                               | 802 |
| 7.2.7. Formación de los agentes del ferrocarril .....                                | 804 |
| 7.2.8. Autorización de la entrada en servicio de un equipo, sistema o vehículo       | 804 |
| 7.3. El factor humano en los accidentes ferroviarios .....                           | 805 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| <b>Bibliografía</b> ..... | 809 |
|---------------------------|-----|

# CAPÍTULO 3

## Material móvil

- 3.1. Locomotoras.
- 3.2. Material remolcado de medias y largas distancias: coches y vagones.
- 3.3. La Alta Velocidad.
- 3.4. El caso de metros y tranvías.
- 3.5. La tracción eléctrica.
- 3.6. El freno.
- 3.7. Bogies.
- 3.8. Sistemas embarcados en el material móvil.
- 3.9. Acoplamientos entre coches.

### 3.1. LOCOMOTORAS

No hay un criterio único a la hora de clasificar las locomotoras de tracción. En este texto voy a basarme en la diversificación atendiendo a la técnica de motorización que utilizan que es lo más usual: vapor, combustible líquido (normalmente gasoil) y eléctricas.

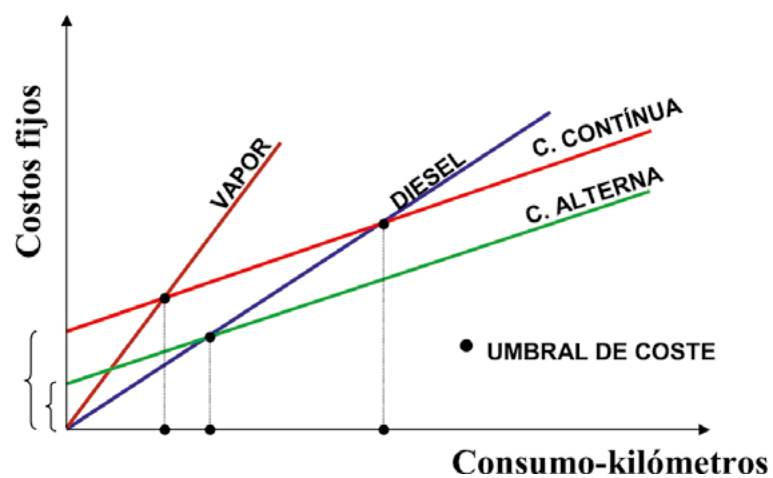
Pero hay otras características que también separan estas máquinas en diversos tipos. Por ejemplo, según el servicio a que se destinen, podemos encontrarnos locomotoras de maniobras, locomotoras de carga y, por último, locomotoras para servicio de viajeros. En estos casos, la capacidad de carga remolcada, su aceleración y deceleración y otras características, como la visibilidad para uno o dos sentidos de marcha, son claros elementos diferenciadores. Asimismo, la cantidad y complejidad de sistemas de conducción, ayuda a la explotación y señalización ferroviaria son diferentes, con una mayor complejidad de equipos y sistemas en las locomotoras de viajeros de alta velocidad que deben integrar múltiples equipos y que, además, deben prestar servicio a menudo de forma interoperable con diversas alimentaciones eléctricas, diversos sistemas de señales, etc. Incluimos, a título de ejemplo de esta complejidad el interior de una cabina de una locomotora avanzada de alta velocidad 252, donde puede observarse la cantidad de sistemas existentes en la misma.

La elección de un tipo u otro de locomotora está asociada también a criterios de rentabilidad en función del recorrido esperado para la máquina. En el siguiente esquema aportamos una comparativa al respecto.



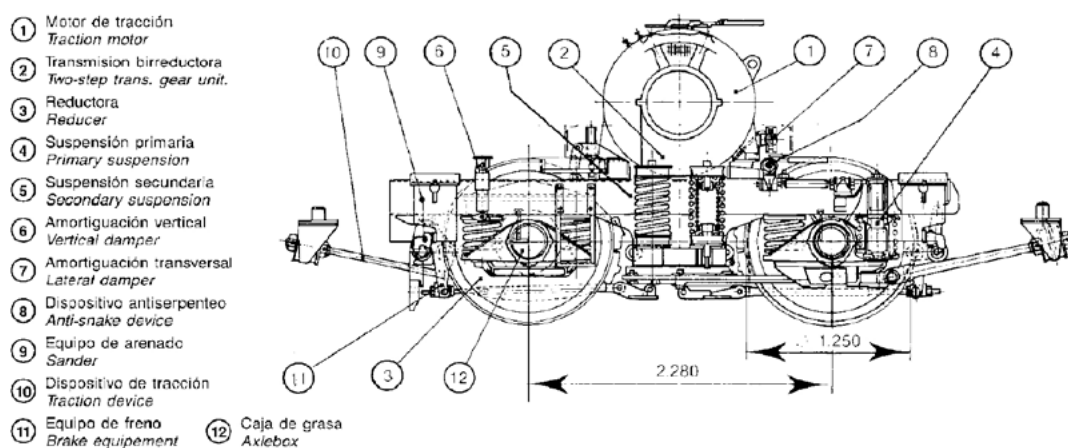
■ Fig. 3.1

## DIVERSOS SISTEMAS DE TRACCIÓN



■ Fig. 3.2

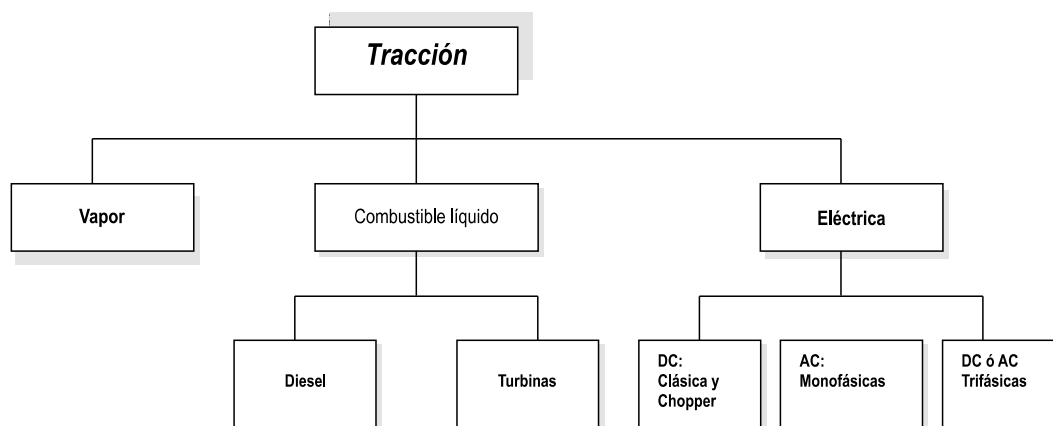
Otra clasificación se refiere al número de ejes y a cuántos de los mismos están motorizados, así como a la disposición del motor de accionamiento, sobre todo en locomotoras eléctricas. En el siguiente esquema incluimos un ejemplo de la locomotora eléctrica 269 de RENFE.



■ Fig. 3.3

Volviendo al criterio inicial que es el que vamos a utilizar en este texto, la diferenciación más usual en locomotoras se ajusta al siguiente diagrama:

#### A) Según el tipo de tracción que las acciona:



■ Fig. 3.4

De las locomotoras a vapor, que hemos tratado ya en el primer punto introductorio, nos referiremos en el siguiente apartado pues, aunque se encuentran casi desaparecidas en occidente hay países en que se encuentran aún en servicio, debido a la falta de recursos para proceder a su reposición y mantenimiento, y por el inconveniente de la disponibilidad del combustible, al tener que importarlo.

Debemos recordar también que el motor de vapor tiene un rendimiento un 30% inferior a aquellos basados en ciclos de Rankine. Por ejemplo, un rendimiento típico de un motor Diesel puede ser del 38% frente al 15% de un motor de vapor; razón ésta básica, junto al mantenimiento mucho más costoso, que hizo desaparecer el vapor a favor de los motores diesel y eléctricos en occidente.

### **B) Según el servicio a que se destinan**

Básicamente las locomotoras se dividen en este sentido en tres tipos: locomotoras de maniobras, locomotoras de carga de medios y largos recorridos y, por último, locomotoras para servicios de viajeros que llegan a alcanzar los 220 km/h, como las últimas 252 de RENFE de 90 toneladas.

Las locomotoras de maniobras, eléctricas o diesel, pueden tener un diseño diferencial que permite conducir con buena visibilidad en ambos sentidos de marcha.

Su velocidad máxima no suele superar los 120 km/h y su peso en servicio suele estar alrededor de los 80.000 Kg. Es lógico que tengan una gran capacidad de tracción (de 120 a 250 kN) y sean sencillas de manejar y muy robustas. Se incluyen algunas figuras a continuación



**Fig. 3.5**

Reflejo a continuación, como resumen, una figura utilizada en mis clases sobre clasificación de locomotoras según el tipo de servicio que realizan y el tipo de tracción que incorporan:

## Clasificación de las locomotoras

- **Por el tipo de servicio:**

1. Locomotoras de cargas
2. Locomotoras de viajeros
3. Locomotoras de maniobras

- **Por el tipo de tracción:**

1. Locomotoras de vapor
2. Locomotoras diesel
3. Locomotoras diesel-eléctricas
4. Otras: vapor, turbinas, bio-diesel



■ Fig. 3.6

### 3.1.1. Locomotoras de vapor

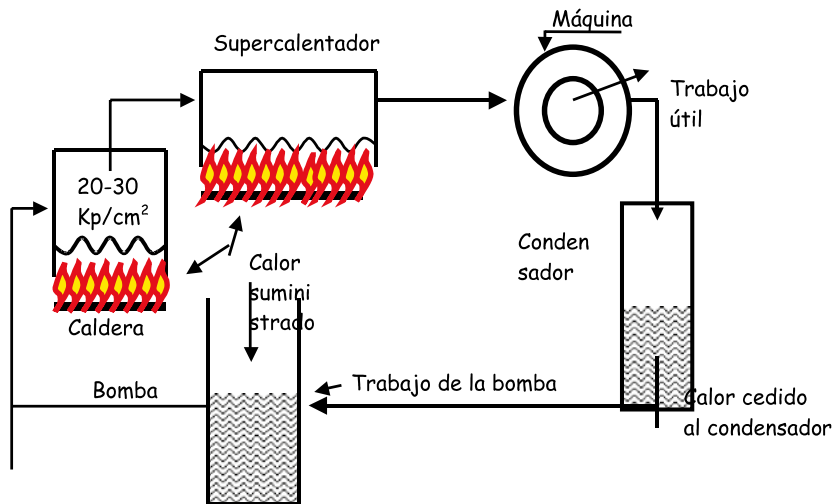
#### *Generalidades de la máquina de vapor*

Si bien, como hemos anticipado, a algún lector pueda extrañarle que en un libro actual de ferrocarriles tratemos estas máquinas, resaltamos nuevamente su concepto de precursoras de toda la tracción, aparte del hecho de que sigan utilizándose en muchos países de Asia, África y Latinoamérica.

Instalaciones motrices de vapor son las que utilizan el agua, en sus fases: líquida y vapor, como medio de trabajo. Una instalación completa tiene tres funciones principalmente:

- a) Producción de una corriente continua de vapor a alta presión y temperatura a partir del agua a las condiciones ordinarias.
- b) Transformación de la energía utilizable de la corriente en trabajo mecánico.
- c) Enfriamiento de la corriente, para una vez que nos hemos aprovechado de su energía, pase a la fase líquida que habíamos partido.

Las partes esenciales de una instalación de este tipo son: la caldera, con el supercalentador y la bomba, la máquina propiamente dicha que puede ser una máquina alternativa o una turbina de vapor, y el condensador.



■ Fig. 3.7

De la caldera va al supercalentador donde se eleva aún más la temperatura del vapor y así pasa a la máquina propiamente dicha, donde al expandirse produce trabajo útil. Finalmente el vapor húmedo atraviesa el condensador, donde pasa a la fase líquida, se enfría seguidamente hasta la temperatura ambiente, completando el circuito.

El ciclo termodinámico, que recorre el agua en la instalación de vapor, en el caso de que se realice por vía reversible, es decir sin rozamientos y sin pérdidas, es el *ciclo de Rankine*.

### 1) Órganos en que tienen lugar las distintas fases de una instalación de vapor

- a) **Producción de vapor:** La caldera tiene por objeto producir una corriente continua de vapor de agua a una presión elevada y a la temperatura de ebullición que corresponde a esa presión. Para ello se transmite al agua el calor de la llama procedente del quemador.

Existen dos tipos de calderas denominadas de *tubos de humo*, de las que los gases calientes circulan por tubos y el agua o el vapor se encuentra alrededor de éstos, y las de *tubos de agua*, en las que el agua o vapor circulan por el interior de los tubos, estando éstos rodeados exteriormente por los gases calientes.

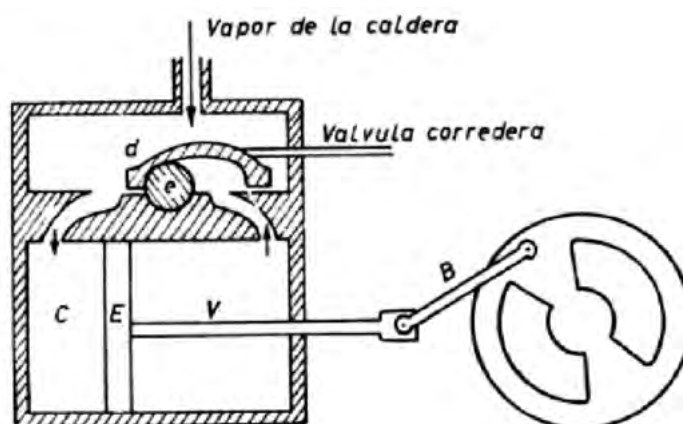
- b) **La bomba:** Es necesaria para que se eleve la presión del agua y la impulse a fin de que podamos introducir el agua a la caldera.

- c) **El supercalentador:** Es una fuente de calor, donde seguimos aumentando el calor hasta unos 600 °C (límite metalúrgico), el objeto es el de aumentar la eficiencia de la instalación, ya que cuanto mayor sea la temperatura al empezar la expansión en la máquina propiamente dicha, mayor será el trabajo útil obtenido.

## 2) Órganos para la transformación de la energía utilizable del vapor en trabajo

La máquina alternativa, consiste en un cilindro **c** en cuyo interior se mueve el émbolo **e**, unido al volante por medio del vástago **v** y la biela **b**.

El distribuidor **d** tiene por objeto que el vapor entre y salga en el cilindro en los momentos oportunos. En la posición indicada en la figura 12, la parte izquierda del cilindro comunica con la caldera, mientras que la derecha esta en comunicación con el condensador por el tubo que parte de **e**. El émbolo será empujado de izquierda a derecha, simultáneamente se mueve el distribuidor cerrando la admisión, con lo que el vapor se expande hasta que el distribuidor establece comunicación con el condensador, en cuyo momento empieza la admisión en la otra parte del cilindro.



■ Fig. 3.8

La potencia de una máquina de vapor se expresa muy fácilmente por la fórmula:

$$W = (P_m \cdot L \cdot A \cdot n) / (100.75.60)$$

W: Potencia en CV

$P_m$ : Presión media en  $K_p/cm^2$

L: Carrera en cm

A: Superficie del émbolo en  $cm^2$

n: Revoluciones por minuto

### 3) *Rendimientos de una máquina alternativa de vapor*

El rendimiento de una máquina se define como la relación entre el trabajo útil que produce y la energía utilizable del vapor que se le entrega. El rendimiento de estas máquinas es pobre, no superando el 30 por 100.

Sus pérdidas más importantes son las que se producen en el escape, y consisten en el calor latente del vapor a la salida de la máquina, del orden del 15 por 100; las pérdidas de calor a través de las paredes, fugas a través del émbolo y válvulas, y las pérdidas por rozamiento.

### 4) *Tipos especiales de máquinas de vapor alternativas*

Se desarrollaron con el fin de aumentar las características y rendimientos de estas máquinas. Pueden remarcarse las siguientes:

- *La máquina de doble efecto*, en que la presión de vapor actúa alternativamente por una y por la otra cara del émbolo, obteniéndose dos carreras motrices por vuelta que, además de duplicar la potencia, hace la marcha más uniforme.
- *La máquina Compoun*, en la que la expansión del vástago tiene lugar en dos o más cilindros, tiene la ventaja que disminuyen las pérdidas considerablemente.

### 5) *Turbina de vapor*

La turbina está formada por una corona de conductos fijos al cárter denominados toberas, donde se expande adiabáticamente vapor, con lo que aumenta su energía cinética a expensas de la energía térmica que posee (la corriente aumenta su velocidad y disminuye su temperatura y presión), a la vez que estos conductos guían a la corriente de manera que incida tangencialmente sobre otra corona formada por una especie de paletas, denominadas álabes, movibles, que van empotrados en un disco montado sobre el árbol de la máquina. Estos álabes absorben la energía de la corriente que es la que se aprovecha para movimiento de la máquina. Las turbinas de vapor se clasifican en axiales o radiales, según que la corriente fluya en la dirección del eje de la máquina o en sentido perpendicular.

Su rendimiento, que se define también como la relación del trabajo producido en la turbina, y la energía utilizable de la corriente, es muy alto, superior al 80 por 100. Ahora están volviendo a ser objeto de estudio de aplicación para locomotoras, sobre todo para aquellas que trabajan a regímenes de velocidades muy constantes y durante mucho tiempo, como es el caso de los transportes de mercancías que recorren miles de kilómetros en Estados Unidos.

## 6) Locomotoras de vapor

Fue el primer medio empleado en la tracción ferroviaria a principios del siglo XIX (primera locomotora de Trevithick y locomotora *The Rocket*, de Stephenson), ya tratados. Está compuesta de una caldera para la producción de vapor, de una máquina motora y distribuidora y de un carro con tender o sin él. El vapor se produce, como se ha dicho, en una caldera, de vapor saturado o recalentado, con hogar interno, sistema tubular y tiro forzado; sobre la caldera se halla situado un cilindro llamado *cúpula*, desde el cual el vapor, mediante conductos adecuados, va a alimentar los cilindros motores. Los residuos de la combustión salen por una chimenea de tiro forzado, en la que se reúne con ellos el vapor procedente de los cilindros. El vapor a presión llega a la máquina motora, a simple o doble expansión, mediante un distribuidor de válvulas que lo introduce en los cilindros, de tal modo que provoca el movimiento alternativo de los émbolos. Éstos están unidos a las ruedas motoras mediante un sistema de bielas y manivelas, que transforman el movimiento rectilíneo alterno en movimiento circular uniforme. Las partes descritas se completan con numerosos órganos accesorios: bomba de alimentación de agua, reguladores de presión a vapor, indicadores del nivel y de la presión, recalentadores, silbatos, etc.

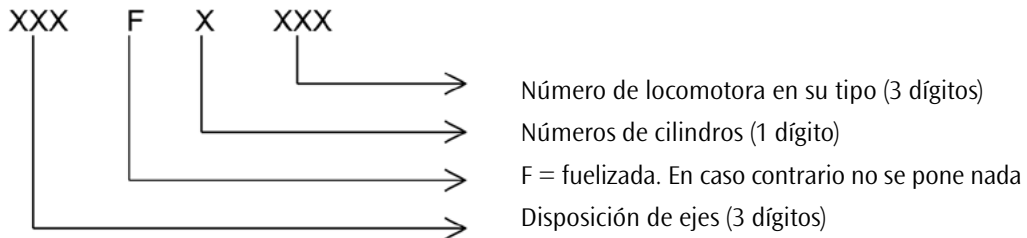


■ Fig. 3.9

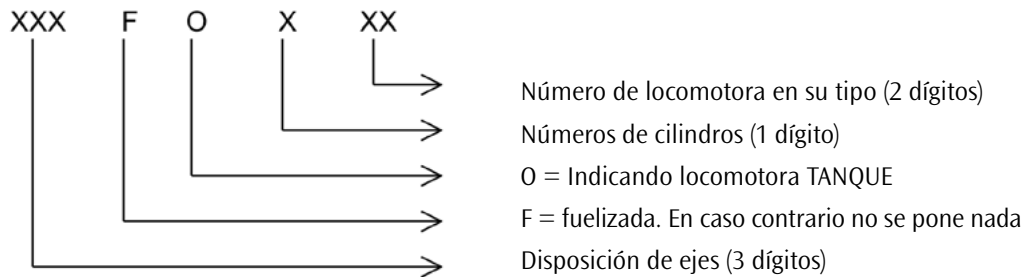
El aparato motor está contenido y soportado por el carro, compuesto por un chasis, una carrocería y un sistema de ejes con ruedas; detrás de la locomotora va el tender, o vagón con el repuesto de carbón y agua para proveerla. Algunos tipos de locomotoras modernas de vapor no están accionadas por motores de émbolos, sino por turbinas de vapor.

### **Clasificación RENFE**

#### **a) Locomotoras tipo NORMAL:**



#### **b) Locomotoras tipo TANQUE**



#### **c) Locomotoras MALLET y GARRAT**

La numeración sigue las reglas anteriores 1 y 2, pero los índices de la disposición de ejes, se calculan sumando los correspondientes a cada parte.

### **7) Algunas características de la tracción vapor**

- Para generar vapor se han utilizado madera, carbón o fuel-oil, aunque el combustible más utilizado ha sido el carbón.
- Debido al mecanismo biela-manivela, con salida directa desde los cilindros de expansión, para desarrollar grandes esfuerzos de tracción se necesitan ruedas tractoras de diámetro pequeño (2100-1500 mm), mientras que para alcanzar grandes velocidades se necesitan ruedas de gran diámetro (1700-2000 mm). Esto reclasifica a las locomoto-

ras de vapor en locomotoras para mercancías (ruedas pequeñas) y locomotoras para pasajeros (ruedas grandes). Ya se ve que la utilización de la locomotora de vapor es específica desde su diseño.

- Para aumentar el peso adherente, y por tanto el esfuerzo de tracción sin rebasar los pesos por ejes aconsejables (20 tm / eje), es necesario aumentar el número de ejes tractores y ejes libres. Tradicionalmente las locomotoras para mercancías tenían 4 o más ejes tractores y las locomotoras para pasajeros tenían 3 o 4 ejes tractores.
- Sobrepassar 5 ejes tractores bajo un bastidor rígido podía ocasionar problemas de inscripción de la locomotora en curva, esto dio lugar al desarrollo de las locomotoras articuladas de tipo Mallet o Garrat.
- Para aumentar la eficiencia de la locomotora se desarrollan diversas técnicas, entre las que cabe destacar la del recalentamiento del vapor antes de entrar en los cilindros, y el sistema de doble expansión del vapor (Compound), primero en los cilindros de alta presión y posteriormente en los de baja presión, con mayor diámetro (Fuerza = Presión x Superficie).

#### 8) *Algunos inconvenientes de la tracción vapor*

- Reducida relación/peso. Contando el ténder, apenas el 50% del peso total de la locomotora podía aprovecharse como adherente.
- Necesidad de dobles y triples tracciones en perfiles duros (puertos de montaña con rampas de hasta 20 mm/m).
- Bajo rendimiento energético (potencia / combustible). Se estima que el rendimiento específico de una locomotora de vapor es del orden de 15 veces inferior al de una locomotora Diesel y 20 veces inferior al de una locomotora eléctrica.
- Frecuentes paradas de trayecto para aprovisionamiento, sobre todo de agua.
- Dificultad de inversión de marcha, siendo necesario el establecimiento de placas giratorias específicas para tal maniobra.
- Mantenimiento relativamente frecuente y caro.
- Contaminación.

A pesar de estos inconvenientes, siguen en servicio en el mundo un gran número de locomotoras de vapor, la mayoría con fines turísticos, pero debemos rendir un reconocimiento especial a este tipo de máquinas, auténticas precursoras del ferrocarril en el mundo. La siguiente foto, correspondiente a un viaje histórico turístico en el Metro de Londres se incluye a esos efectos.



■ Fig. 3.10

### 3.1.2. Locomotoras Diesel

#### *Reseña histórica*

La aplicación al ferrocarril, de la tracción que utiliza la fuerza motriz del motor de explosión o de combustión interna, transportado por el mismo vehículo, ha seguido históricamente una marcha análoga a la de otros tipos de tracción. Es decir, que comenzó a utilizarse en pequeños transportes industriales y mineros, sirviendo su empleo como ensayo, hasta llegar a la utilización realmente ferroviaria.

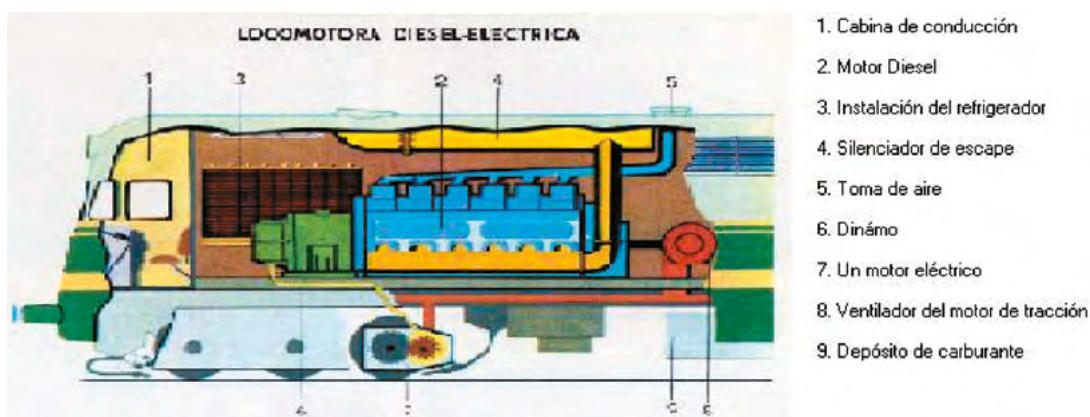
El primer periodo de ensayo, puede resumirse de la siguiente manera:

- En 1891, DAIMLER construyó una locomotora industrial, con motor de gasolina de 4 CV, transmisión por engranajes.
- En 1892 el americano PATTON, construyó una locomotora benzoeléctrica.
- También en 1892, OTTO y LANGEN en Europa, prepararon un vagón con motor a petróleo de 8CV utilizando embrague de fricción, engranajes y cadenas.
- En 1895, la casa DEUTZER GASMOTOREN FABRIK, construyó una locomotora con motor de gas vertical de 12 CV, que movía por medio de correas una dinamo.

- Después de este periodo de ensayos, aparecieron numerosas aplicaciones industriales que desembocaron ya en la utilización ferroviaria. Cronológicamente la marcha fue la siguiente:
- En 1902 en North Eastern Railway de Inglaterra utilizó un automotor de 85 CV, de transmisión eléctrica.
- También en 1902 la casa DION-BOUTN construyó automotores con transmisión eléctrica, y motor de 35 / 70 CV automotores que, en 1936 funcionaban todavía en Rumania.
- En 1904 la compañía Brill de Filadelfia, construyó el primer automotor americano benzo-eléctrico.
- En 1909 la DEUTZ en colaboración con AEG preparó, en Alemania, los primeros automotores benzo-eléctricos de 100CV, motor DEUTZ.
- En 1913, la ATLAS realizó la primera aplicación del motor Diesel a automotores.
- En 1917, la Sulzer con la B.B.C., construyeron un automotor Diesel – eléctrico de 250CV.
- En 1920 la Pelar-Deva, por su parte, construyo también automotores Diesel-eléctricos de 160 y 250 CV.

A partir de la fecha se ha estudiado la utilización de este tipo de tracción y son numerosas las casas que se dedican a la construcción de automotores y locomotoras.

En cuanto a las transmisiones, en países montañosos se emplearon transmisiones eléctricas, mientras que en los llanos interesa más la transmisión mecánica perfeccionada tal y como veremos. La transmisión hidráulica ha sido la última aparición y, como veremos, una de las más utilizadas en la actualidad.



■ Fig. 3.11