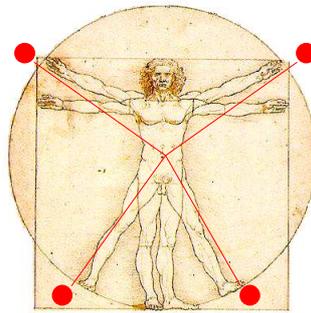


TECNOLOGÍ@ y DESARROLLO

Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

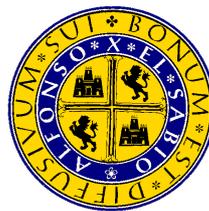
VOLUMEN XI. AÑO 2013

SEPARATA



EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS TRENES DE ATERRIZAJE EN LAS AERONAVES

Rafael Trallero, Ricardo Atienza y Malte Frövel



UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO
Escuela Politécnica Superior
Villanueva de la Cañada (Madrid)

© Del texto: Rafael Trallero, Ricardo Atienza, Malte Frövel
Mayo, 2013.

<http://www.uax.es/publicacion/evolucion-historica-de-los-trenes-de-aterizaje-en-las-aeronaves.pdf>

© De la edición: *Revista Tecnol@ y desarrollo*
Escuela Politécnica Superior.
Universidad Alfonso X el Sabio.
28691, Villanueva de la Cañada (Madrid).
ISSN: 1696-8085

No está permitida la reproducción total o parcial de este artículo, ni su almacenamiento o transmisión ya sea electrónico, químico, mecánico, por fotocopia u otros métodos, sin permiso previo por escrito de la revista.

EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS TRENES DE ATERRIZAJE EN LAS AERONAVES

Rafael Trallero^(a), Ricardo Atienza^(b) y Malte Frövel^(c)

- (a) Ingeniero Aeronáutico. Centro de Ensayo de Programas Aeroespaciales
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial 'Esteban Terradas'.
Profesor de Grado en Ingeniería Aeroespacial
Escuela Politécnica Superior, Universidad Alfonso X el Sabio.
Teléfono: 918 105 793, e-mail: tralvel@uax.es
- (b) Doctor Ingeniero Aeronáutico. Jefe del Centro de Ensayo de Programas Aeroespaciales
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial 'Esteban Terradas'.
Jefe de Estudios de Grado en Ingeniería Aeroespacial
Escuela Politécnica Superior, Universidad Alfonso X el Sabio.
Teléfono: 918 105 793, e-mail: ratiepas@uax.es
- (c) Doctor Ingeniero Industrial . Departamento de Materiales y Estructuras
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial 'Esteban Terradas'.
Profesor de Grado en Ingeniería Aeroespacial
Escuela Politécnica Superior, Universidad Alfonso X el Sabio.
Teléfono: 918 109 168, e-mail: mfrov@uax.es

RESUMEN:

Este artículo ofrece una visión histórica de carácter divulgativo acerca de la evolución que ha sufrido el diseño de los trenes de aterrizaje de las aeronaves a lo largo de los años, desde los más simples elementos estructurales en los inicios de la aviación hasta las modernas configuraciones actuales dotadas de amortiguadores oleoneumáticos y multitud de sistemas adicionales.

PALABRAS CLAVE: Tren de aterrizaje, Aeronave, Evolución.

ABSTRACT:

This work shows an historical and divulgative review about the evolution of the landing gear design of airplanes along the years, from the basic structural elements in the origins of aviation to the nowadays modern configurations equipped with oleoneumatic dampers and many other additional systems.

KEY-WORDS: Landing gear, Undercarriage, Airplane, Evolution.

SUMARIO: 1. Introducción 2. El tren de aterrizaje convencional (tren de rodadura) 3. Evoluciones alternativas del tren de aterrizaje 4. Conclusiones 5. Referencias

SUMMARY: 1. Introduction 2. The landing gear 3. Alternative evolutions of undercarriages 4. Conclusions 5. References

<http://www.uax.es/publicacion/evolucion-historica-de-los-trenes-de-aterrizaje-en-las-aeronaves.pdf>

1. Introducción

El tren de aterrizaje es el sistema de una aeronave que le permite llevar a cabo sus operaciones en tierra. Su evolución histórica ha sido considerable a lo largo de los años ya que las funciones exigidas en su diseño han ido aumentando conforme las normas aplicables imponían más y más requisitos en su estructura. No obstante, dicho sistema solamente tiene relevancia cuando el avión se encuentra en contacto con el suelo ya que en el resto de situaciones (el vuelo) constituye un peso muerto. Es por ello que su diseño siempre se ha estudiado con la vista puesta en la minimización de su peso.

En la actualidad el tren de aterrizaje debe ser diseñado para absorber la energía cinética vertical del avión durante el aterrizaje hasta niveles tolerables en el resto del aparato y llevar a cabo todas las operaciones de rodadura en tierra (desplazamientos, giros, remolque, aceleraciones y deceleraciones en el despegue y aterrizaje respectivamente...) dentro de unos niveles vibratorios adecuados.

2. El tren de aterrizaje convencional (tren de rodadura)

El primer aeroplano que realizó un vuelo sostenido en la Historia de la humanidad fue el de los hermanos Wright en 1903 [2]. Dada su sencilla configuración, sus escasos 225 kg, y que la prioridad de sus diseñadores consistía en lograr simplemente el vuelo antes que en optimizar cualquiera de sus elementos, no se reparó demasiado en el diseño del tren de aterrizaje. Estaba formado por unos patines que deslizaban sobre el terreno al estilo de los trineos arrastrados por perros que se empleaban en las zonas árticas.



Figura 1. Aeroplano Kitty Hawk de los hermanos Wright [2].

Aparentemente los primeros modelos de tren de aterrizaje provistos de ruedas surgen en Europa en torno a 1907, de la mano de Voisin, seguido rápidamente por otros diseños como los de Delagrange, también en 1907, Farman, Bleriot, Curtiss, Cody y Ellehammer en 1908 y McCurdy, Roe y Short en 1909; aeroplanos todos ellos diseñados todavía como prototipos.

Los primeros aviones que de verdad comenzaron a construirse en serie tuvieron lugar en la Primera Guerra Mundial. Eran de pequeño tamaño, muy ligeros, contruidos en madera y lona, y volaban a velocidades muy bajas en comparación con los aeroplanos actuales, permitiendo un diseño sencillo y rápido del tren de aterrizaje. En esencia, se trataba de una o varias barras conectadas entre sí formando una estructura reticulada que se unía al fuselaje en unos determinados puntos de anclaje, y sobre la cual se añadían unos ejes que giraban libremente para incorporar las ruedas. La configuración típica en forma de V, con la rueda posicionada en el vértice, era propia de esta época. El fuselaje del aeroplano se constituía como la única parte de la estructura capaz de soportar las cargas introducidas por el tren y es por ello que no existen modelos de aeronaves, como ocurrirá en años posteriores, en donde el tren se localice debajo de las alas. Una de las desventajas de esta configuración era que al estar el tren situado bajo el fuselaje su vía era pequeña y la estabilidad de rodadura durante el despegue y aterrizaje se veía perjudicada.

Al volar a baja velocidad estos trenes no necesitaban un sistema de retracción ya que su influencia en la aerodinámica del aparato era escasa. Como la velocidad de aterrizaje también era limitada, el hecho de que las pistas fueran de tierra o césped no suponía tampoco un problema estructural a la hora de diseñar el tren. Su estructura se calculaba con el mismo factor de carga que el máximo del aeroplano y, dado que la velocidad vertical de aterrizaje apenas superaba los 4 ó 5 m/s (15 ft/s), aguantaban perfectamente las cargas en sentido longitudinal. No ocurría lo mismo, sin embargo, en sentido lateral; su escasa resistencia estructural se hacía notar en presencia de viento cruzado y la rotura del tren por este motivo era bastante común en estos años. Finalmente, al tratarse de aviones militares, tampoco existían requisitos especiales en cuanto a transmisión de cargas hacia el resto del vehículo.

En general estos trenes no disponían de ningún sistema de amortiguación específico. El efecto amortiguador tenía que ser obtenido necesariamente de la configuración de barras que constituía el propio tren, así como de la forma en la que se unía la rueda al resto del sistema. En los modelos Sopwith Camel [3] y SPAD VII [4], típicos de esta época, el eje de la rueda se acoplaba mediante un conjunto de cuerdas elásticas que permitían hasta cierto punto el movimiento vertical de dicho eje (10 cm como máximo), con lo que el impacto o las vibraciones de las aeronaves durante el aterrizaje o las operaciones en tierra podían ser parcialmente amortiguadas.

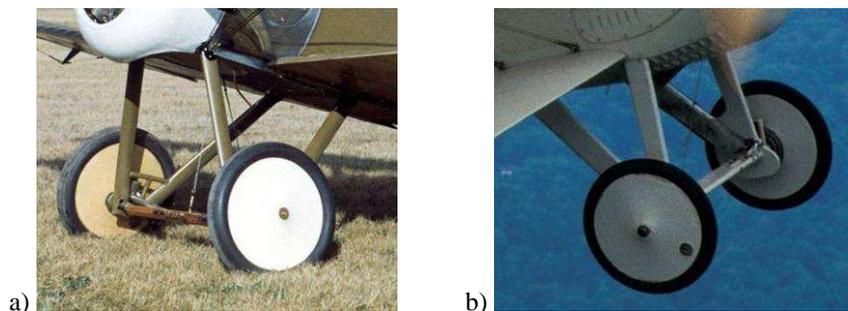


Figura 2. Aeroplanos Sopwith Camel (a) [3] y SPAD VII (b) [4].

Los neumáticos también eran simples, de pequeño tamaño (a veces se empleaban incluso ruedas de bicicleta de la época) y no disponían de ningún sistema de seguridad, en el caso de que por ejemplo se produjera un pinchazo o reventón, ni tampoco sistema de frenos, pues la baja velocidad de aterrizaje lo hacía poco necesario.

Las dos fotografías que se muestran a continuación, así como las dos anteriores, dan una idea de la sencillez de su diseño. La de la izquierda pertenece al triplano Fokker DR-1, famoso por ser pilotado por el aviador Manfred v. Richthofen (“Barón Rojo”) [4], y la de la derecha pertenece al modelo Albatros B.II [6], ambos desarrollados en Alemania.

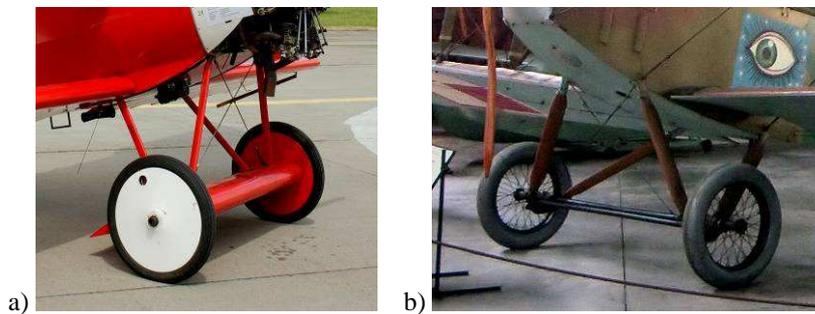


Figura 3. Aeroplanos Fokker DR.1 (a) [5] y Albatros B.II (b) [6].

Es destacable también que, dado que el tren principal se posicionaba muy cerca del motor, el centro de gravedad siempre quedaba situado por detrás y la configuración de triciclo invertido era habitual en este tipo de aparatos. Aunque en las fotografías no se observa, el tren auxiliar no estaba formado por una rueda de pequeño tamaño con control de dirección, como ya era habitual en los aeroplanos de la Segunda Guerra Mundial, sino que estaba constituido por un patín que deslizaba sobre el terreno parecido al de los prototipos mencionados en párrafos anteriores. Este diseño obligaba a que los operarios en tierra tuvieran que desplazar y orientar el avión, desde el lugar de estacionamiento hasta la cabecera de la pista, y viceversa, de forma totalmente manual.

En el periodo de entreguerras, hacia 1920, tuvieron lugar los primeros diseños de trenes de aterrizaje retráctiles y se comenzaron a diseñar sistemas de suspensión específicos. Las mejoras aerodinámicas produjeron un rápido incremento en la velocidad de vuelo y el tren comenzaba a ser un obstáculo desde el punto de vista aerodinámico, por lo cual se hacía necesario implementar un dispositivo que lo ocultara dentro del fuselaje. Los desarrollos de la época consiguieron un ahorro en la resistencia aerodinámica del vehículo en torno al 10%. Por otro lado, el empleo de las primeras aleaciones de aluminio, en sustitución de la madera y lona, incrementó el peso de los aeroplanos y obligó al uso de amortiguadores cada vez más eficientes. Adicionalmente, el aumento en la velocidad de aproximación y aterrizaje hizo evidente la necesidad de desarrollo de sistemas efectivos de frenos, dando origen a los primeros mecanismos.

Ejemplos de los primeros aeroplanos que poseían trenes de aterrizaje total o parcialmente retráctiles son el Lockheed Model 8D Altair (1930), el bombardero Y1B-9 (1931), el caza Grumman FF-1 (1932) y el Douglas DC-1 (1933). Sin embargo la mayoría de estos aviones no pasaron de ser prototipos. No hay que olvidar que a pesar de las ventajas que ofrecía este avance, su implantación no fue tan rápida y la mayoría de los aparatos que se construían en esta época todavía se diseñaban con trenes fijos; si bien es cierto que para estos casos se empleaban carenas aerodinámicas que disminuían la resistencia durante el vuelo (aunque también aumentaban el peso), tal y como figura en los modelos Lockheed Winnie Mae [7] y Granville Gee Bee R-1 Super-Sportster [8].

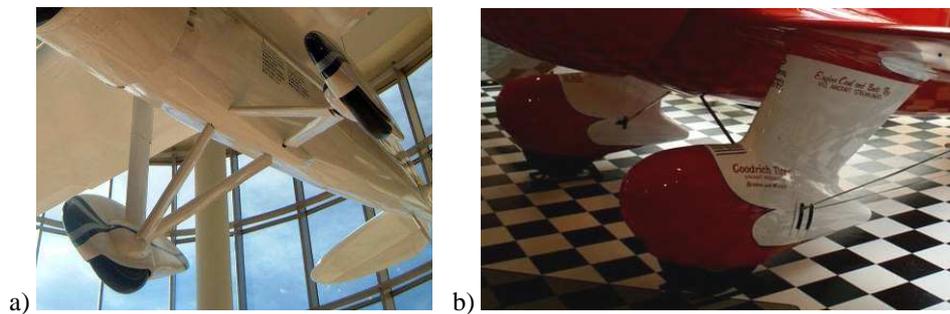


Figura 4. Aeroplanos Lockheed Vega 'Winnie Mae' (a) [7] y Gee Bee Super-Sportster (b) [8].

Realmente los dos primeros aeroplanos que de verdad comenzaron a construirse en serie con tren de aterrizaje retráctil, y que dieron comienzo a un cambio definitivo de diseño, fueron el Douglas DC-2 [9] y el Boeing 247D [10], en 1934.

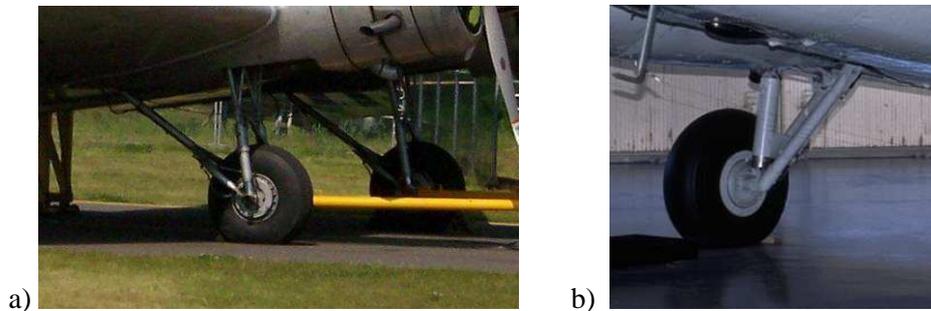


Figura 5. Aeroplanos Douglas DC-2 (a) [9] y Boeing 247D (b) [10].

Los amortiguadores de esta época solían estar formados por barras telescópicas que se unían entre sí mediante discos de goma o muelles como los que se encuentran en el trimotor estadounidense Ford 4AT [1] y [11] (Figura 6), de 1932. En 1935 se construyó el primer tren de aterrizaje con doble pata telescópica, montado en el Fairchild Packet C-119, cuyo diseño se consolidó y extendió años más tarde formando parte de la mayoría de los bombarderos estadounidenses de la Segunda Guerra Mundial y de los primeros aviones comerciales.

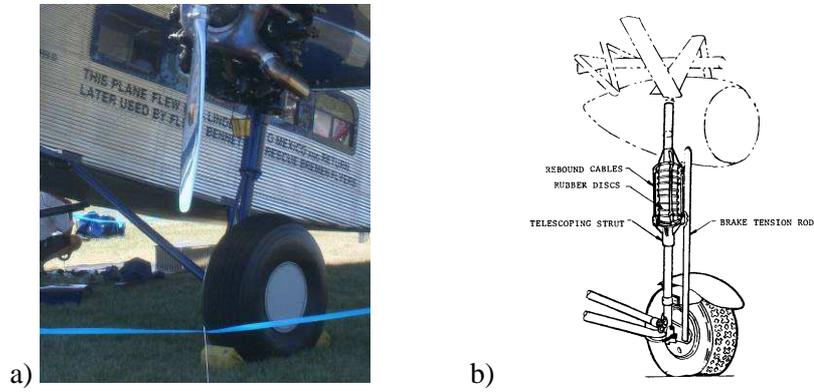


Figura 6. Aeroplano Ford 4AT Trimotor. Fotografía [11] (a) y esquema [1] (b).

Otro factor que ayudó en la mejora de la suspensión, aunque a una escala menor, fue el empleo de ruedas cada vez más grandes y la utilización de neumáticos a presión. Sin embargo, las limitaciones en tamaño y la pobre eficiencia de estos elementos, que en el mejor de los casos no superaba el 47%, dejaba claro que la absorción de energía debía ser conseguida por medio de amortiguadores específicamente diseñados para tal fin. Cargas sobre el terreno de 14.000 kg por rueda, diámetros totales de 1,6 m y presión de inflado en torno a 0.03 bar eran frecuentes en esta época, pero ya se empezaba a vislumbrar la necesidad de pistas de asfalto con mejores características que permitieran reducir tales dimensiones.

Se extendió en la época de entreguerras, y se consolidó después durante la Segunda Guerra Mundial, el empleo de una rueda de cola direccional y maniobrada por el piloto desde la carlinga. De este modo se prescindió de los operarios en tierra en lo referente a desplazamientos de la aeronave por el aeródromo. Además, se tenía conocimiento también del bamboleo que sufre una rueda direccional cuando el eje de giro cruza el eje de la pata principal y se solían diseñar haciendo que el primero se colocara por detrás del segundo (Figura 7 [12]); en la actualidad se construyen trenes de aterrizaje con dos ruedas en paralelo para limitar este problema.



Figura 7. Tren de cola del Heinkel He-111 [12].

Durante la Segunda Guerra Mundial, la mayoría de los cazas ya disponían de trenes de aterrizaje retráctiles, mientras que en los bombarderos, cazabombarderos, aviones de reconocimiento o de transporte, y aviones de entrenamiento, el ocultamiento del tren era en ocasiones parcial o directamente inexistente, pues la menor velocidad de vuelo no lo hacía prioritario.

Como curiosidad se puede también hacer mención de proyectos secretos alemanes, que nunca llegaron a materializarse en esta época, acerca de aeronaves de despegue y aterrizaje vertical cuya configuración de tren resultaba a todas luces original. Tal es el caso del Heinkel Wespe [13], que después fue adaptado por EE.UU. en su modelo Convair XFY-1 Pogo [14] en 1954.

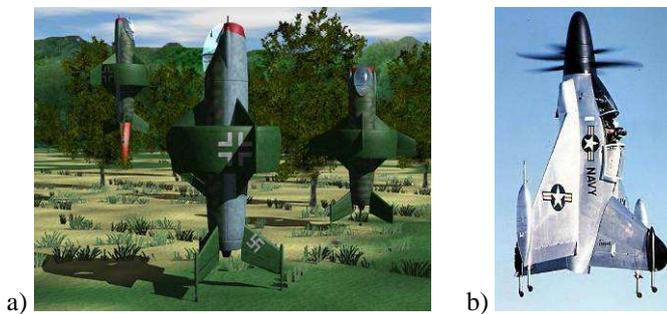


Figura 8. Recreación del Heinkel Wespe (a) [13] y modelo real del Convair XFY-1 (b) [14].

Tras la Segunda Guerra Mundial y el comienzo de la Guerra Fría el avance tecnológico aeronáutico y espacial continuó sin descanso, y la aparición de líneas aéreas comerciales como motor económico de los países introdujo nuevas vías de mejora en las aeronaves y por extensión en los trenes de aterrizaje. Una de las primeras características que se fueron imponiendo paulatinamente fue la utilización de configuraciones en triciclo normal y el abandono del triciclo invertido tan popular en los años precedentes. Las principales ventajas consistían en que daba al piloto una visión más amplia del entorno, especialmente en las operaciones de rodadura, los procesos de carga y descarga se hacían más cómodamente al tener la aeronave una orientación horizontal, la resistencia aerodinámica disminuía en los despegues y remitía la tendencia al picado del aparato durante las frenadas. Sirvan como ejemplos los Boeing B-17 *Flying Fortress* [15] (más antiguo) y B-29 *Superfortress* [16] (más moderno), ambos empleados en la Segunda Guerra Mundial.



a)



b)

Figura 9. Configuración abandonada de triciclo invertido en un Boeing B-17 (a) [15] y nueva configuración de triciclo normal en un Boeing B-29 (b) [16].

En la actualidad la configuración del triciclo se ha sofisticado en un sin fin de variantes hasta incluir trenes adicionales adyacentes, sobre todo en los aviones más grandes, pero siempre intentado mantener las ventajas de la configuración básica. Por ejemplo, el Airbus A-380 [17] posee 4 trenes principales en las proximidades del centro de gravedad mientras que mantiene uno sólo, como es habitual, en el morro.



Figura 10. Configuración del tren de aterrizaje de un Airbus A-380 [17].

Otro de los avances fue el empleo de carretones (bogies, en inglés) en el tren principal. El aumento de peso de las aeronaves junto con los requisitos de flotabilidad obligaba a buscar la forma de incrementar la superficie de contacto con el suelo sin aumentar el número de patas. Durante la Segunda Guerra Mundial era típico el empleo de trenes con uno o dos neumáticos por eje (Figura 9), pero posteriormente se fueron imponiendo estructuras intermedias capaces de albergar 4 ó 6 neumáticos en un único elemento. La aeronave británica Bristol Brabazon o la estadounidense Boeing B-36 estimularon el desarrollo, mejora y consolidación de estos sistemas y permitieron la utilización de ruedas de 1 m de diámetro y cargas superficiales por elemento de 22.500 kg. Más recientemente se desarrollaron los Boeing B747 [18] y B777 [19]. El B747, más antiguo, lleva 16 ruedas en el tren principal distribuidas en 4 ejes mientras que el B777, más moderno, ha logrado incorporar 12 ruedas en tan sólo dos patas, con el consiguiente ahorro en peso. El tren de morro mantiene la característica de poseer dos ruedas en paralelo; condición que no se debe necesariamente a cuestiones estructurales

sino más bien a requisitos de seguridad, para no perder la dirección del aparato en caso de estallido de uno de los neumáticos.

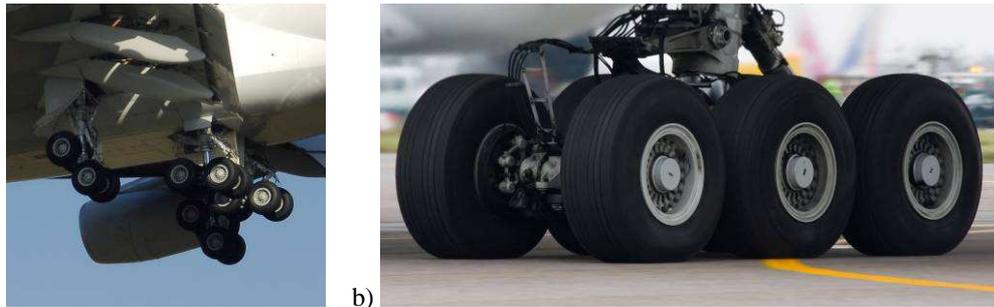


Figura 11. Carretones de 4 ruedas en el tren principal de un Boeing B747 (izquierda) [18] y de 6 ruedas en el B777 (derecha) [19].

En general, aeronaves con MTOWs (*Maximum Take Off Landing – Máximo peso al despegue*) comprendido entre 20.000 kg y 90.000 kg suelen necesitar típicamente dos ruedas por pata, aunque también existen casos de empleo de esta configuración en aparatos con un MTOW de 110.000 kg (lo que muestra un claro ejemplo de optimización estructural), mientras que MTOWs comprendidos entre 100.000 kg y 200.000 kg suelen utilizar carretones de 4 ruedas. Para pesos superiores se pueden emplear carretones de 6 ruedas como en el caso del B777 con sus 300 T de peso, o hacer uso de más de dos patas con 4 ruedas cada una como en el B747-8 de 400 T. En el caso de 6 ruedas, para facilitar los giros de la aeronave durante las operaciones de rodadura, los carretones pueden incluir un sistema de direccionamiento que actúa en la última pareja de ruedas y que permite el giro de ésta de forma automática cuando por ejemplo la rueda de morro se orienta más de 13° a derecha o izquierda. Con ello se ahorra desgaste de neumático, se disminuye el radio de giro y el empuje de maniobra decrece.

Para aumentar todavía más el número de ruedas se emplean otras configuraciones estructurales, no basadas en carretones, en las que se colocan todas las parejas de ruedas en serie manteniendo cada una su propio amortiguador, mejorando de este modo la transmisión de cargas al fuselaje. Esta configuración es típica de aviones de transporte en los que la distancia de la aeronave al suelo debe ser mínima para facilitar los procesos de carga, de ahí que los amortiguadores se posicionen de forma inclinada. Ejemplos de ello son las 14 ruedas por ensamblaje del Antonov AN-225 [20] Mriya o las 10 ruedas del Antonov AN-124 [21]. Esta solución, no obstante, también ha sido empleada más recientemente para el caso de trenes con 6 neumáticos, como en el caso del Airbus A400M [22].

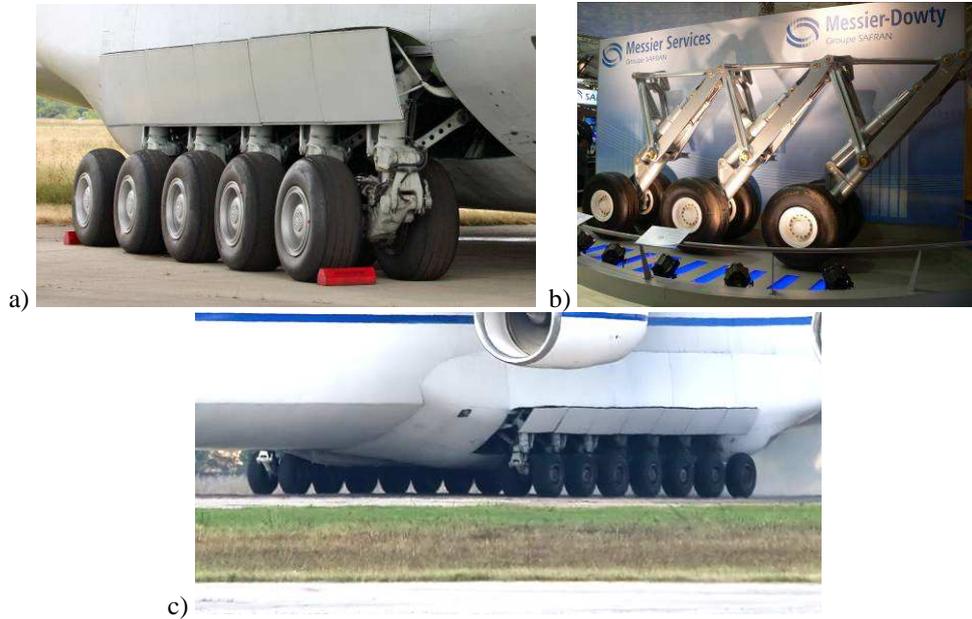


Figura 12. Tren de aterrizaje principal del Antonov AN-124 (a) [21], estructura del tren del Airbus A400M (b) [22] y tren del AN-225 (c) [20].

El sistema de suspensión es otro de los elementos que más se ha investigado a lo largo de los años. Aunque ya se han hecho algunas referencias en párrafos anteriores se presenta ahora una breve evolución histórica del mismo.

La función del sistema de suspensión es absorber la energía cinética del avión durante el aterrizaje y reducir las cargas transmitidas al fuselaje hasta niveles tolerables en el resto de operaciones. En la actualidad el amortiguador es el elemento que más contribuye al peso del tren de aterrizaje.

Inicialmente, Primera Guerra Mundial, la amortiguación se conseguía mediante el empleo de cables elásticos por medio de los cuales se unían las ruedas a la estructura del tren. Tal era el caso de los modelos Sopwith Camel y SPAD VII, Figuras 3 y 13 [1], en donde se observa cómo se le dotaba a la rueda de cierto grado de movimiento vertical.

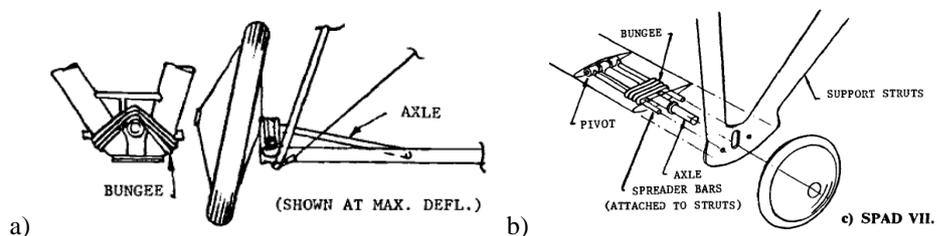


Figura 13. Amortiguadores de los modelos Sopwith Camel (a) [1] y SPAD VII (b) [1].

Por los años 30 se comenzaron a emplear bloques o pastillas de goma como los utilizados en el Ford 4AT Trimotor (Figura 6) y durante la Segunda Guerra Mundial se extendió el uso de muelles de acero (en forma de bobinados o anillos) como los que llevaba el Junker JU-88, o de goma como el que fue empleado en el De Havilland DH-98 Mosquito. Básicamente, un amortiguador de goma estaba formado por un cilindro exterior dentro del cual se desplazaba el vástago y en cuyo interior se colocaban las pastillas de este material, Figura 14 [1], de modo que el aspecto exterior era muy parecido al de los amortiguadores actuales. También por esta época se comenzaron a implantar los primeros amortiguadores hidráulicos (también llamados amortiguadores líquidos) desarrollados por Dowty.

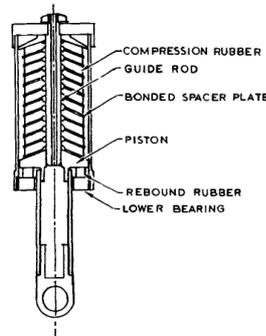


Figura 14. Amortiguador típico basado en bloques de goma [1].

Tras la Segunda Guerra Mundial la mayoría de los amortiguadores basados en muelles de acero fueron desechados porque su eficiencia apenas superaba el 60% y su peso era mucho mayor que los nuevos modelos que se estaban investigando. De hecho el amortiguador hidráulico de Dowty ya proporcionaba una eficiencia del 75-90%, muy similar a los amortiguadores actuales y venció con creces las prestaciones de los otros desarrollos. También se probaron amortiguadores basados en aire, pero su eficiencia no dio el resultado esperado, eran muy pesados y no permitían la lubricación interna, con lo que su mantenimiento era complejo y caro.

Los amortiguadores hidráulicos, no obstante, presentaban algunos inconvenientes. Tenían buenas características a fatiga debido a su robusta construcción, pero era precisamente ésta la característica que los hacía enormemente pesados. Además su eficiencia disminuía cuando trabajaban en condiciones de baja temperatura y debido a la alta presión interna (del orden de 3 MPa) resultaba que solamente podían ser presurizados cuando la aeronave se apoyaba sobre actuadores externos. Finalmente, las juntas tenían que ser muy resistentes para evitar fugas y en consecuencia las fricciones internas eran elevadas. Por todo ello la evolución se orientó hacia a un nuevo tipo de diseño que culminó en el amortiguador oleoneumático, Figura 15 [1].

Son los amortiguadores usados por excelencia en todo el mundo en la actualidad. Tienen la mejor eficiencia, disipan la energía de la mejor manera posible, recuperan su posición de equilibrio de forma controlada y tienen la mejor relación eficiencia/ peso de todos los desarrollos existentes.

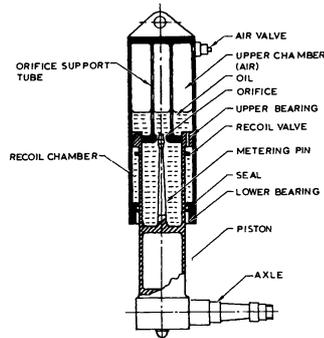


Figura 15. Amortiguador oleoneumático [1]

En esencia consiste en un cilindro que alberga una mezcla de aceite y gas (normalmente aire seco o nitrógeno) separados por un tabique que presenta un orificio interior. Cuando el vástago sube, el aceite es obligado a pasar a la cámara inferior a través del orificio y el flujo es controlado mediante una varilla central, cuya sección variable está cuidadosamente diseñada. Una vez que la carga desaparece el sistema recupera su extensión natural gracias a la propia presión interna del fluido y gas. La eficiencia de este amortiguador ronda el 80-90%.

Desde hace mucho tiempo este amortiguador se ha impuesto al resto, y ha sido y sigue siendo objeto de estudio e investigación. Consecuencia de su aprovechamiento son algunas configuraciones diferentes de tren que se muestran en la Figura 16 [23], donde se puede observar un tren de tipo Cantilever (también llamado telescópico), otro de tipo articulado (también llamado de palanca) y otro semiarticulado. El Cantilever es el más usado en todo el mundo, presenta mayor eficiencia en peso y su geometría puede soportar cargas de arrastre y laterales. El único inconveniente es que la carrera del amortiguador es más larga y ocupa un volumen mayor; a menos que el vástago se pueda comprimir antes de retraer el tren se necesita un compartimento más amplio en el fuselaje para alojarlo. Por otro lado, el articulado es empleado cuando la altura de la aeronave con respecto al suelo es baja o el espacio para almacenar el tren en el fuselaje es limitado. También presenta la ventaja de que el amortiguador puede ser reemplazado in situ sin mayor esfuerzo, pero tiene el inconveniente de no soportar cargas laterales ni de arrastre. El semiarticulado es un caso intermedio en el que el amortiguador tiene componente estructural y también soporta cargas laterales y de arrastre, sin embargo su uso no está muy extendido.

Tanto los modelos articulados como semiarticulados comenzaron a emplearse tras la Segunda Guerra Mundial, cuando la sustitución de las hélices por motores a reacción provocó que la altura típica de la aeronave respecto del suelo disminuyera considerablemente y en consecuencia el tren no necesitaba ser diseñado con tanta longitud.

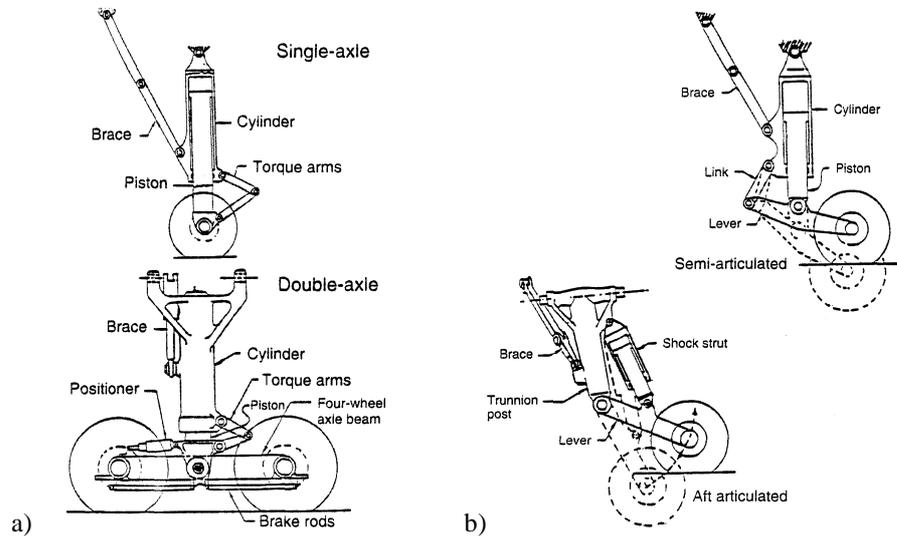


Figura 16. Ejemplos de tren tipo telescópico (a), semiarticulado (b arriba) [23] y articulado (b abajo) [23].

La Figura 17 [1] muestra la eficiencia y relación eficiencia/peso de los amortiguadores desarrollados a lo largo de los años. En ella se observa cómo han ido mejorando no sólo en prestaciones sino también en optimización y la razón por la que los amortiguadores oleoneumáticos se han impuesto al resto.

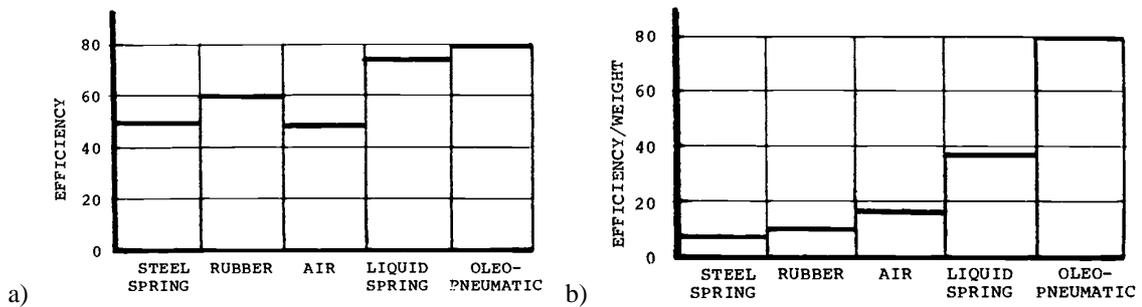


Figura 17. Eficiencias de los diferentes tipos de amortiguadores (a) [1] y relaciones eficiencia/peso (b) [1].

Aparte de las diferentes configuraciones que puede adoptar el tren de aterrizaje como consecuencia del sistema de suspensión empleado (Figura 16), también se produce una variación enorme de diseños cuando se considera la geometría del sistema de extensión y retracción del tren. La Figura 18 [24] muestra algunas combinaciones esquemáticas del aspecto que adopta el tren de aterrizaje en función de dicho mecanismo, y la Figura 19 [24] muestra un ejemplo real de la secuencia de retracción de un tren tipo tándem correspondiente al bombardero británico Avro Vulcan (1953). Para conocer en detalle las características de cada uno de los ejemplos mostrados, con sus ventajas e inconvenientes, se invita al lector a consultar la bibliografía existente sobre el tema.

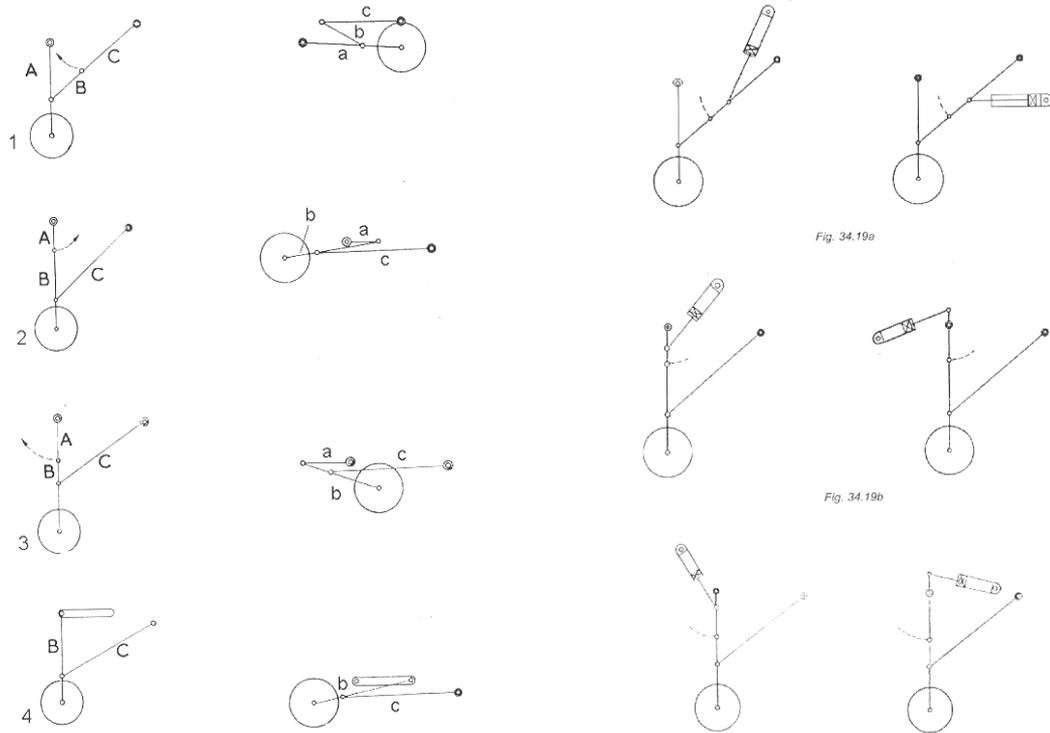


Figura 18. Ejemplos de diferentes geometrías del tren en función del sistema de retracción/extensión empleado [24].

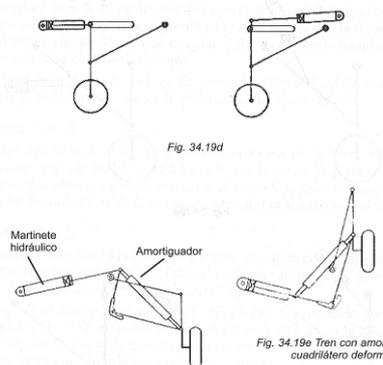


Figura 18 (cont.). Ejemplos de diferentes geometrías del tren en función del sistema de retracción/extensión empleado [24].

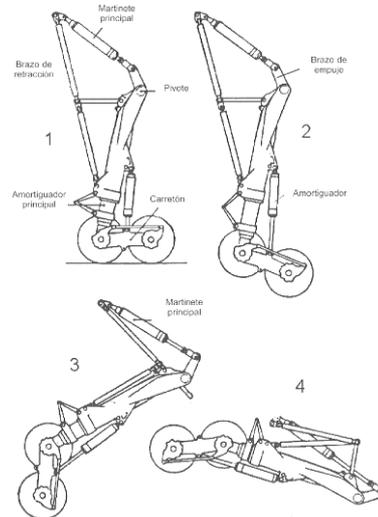


Figura 19. Secuencia de retracción del tren tipo tándem del Avro Vulcan [24].

Para terminar la evolución de los sistemas de suspensión no se puede dejar de mencionar que no todos los aviones se han aprovechado de tal evolución a lo largo de la historia. Tal y como se ha comentado en párrafos anteriores, las aeronaves pequeñas, vehículos cuya comercialización obliga a que el coste de compra, operación y mantenimiento esté muy ajustado, han seguido utilizando sistemas de suspensión similares a los primeros modelos (amortiguadores basados en gomas, muelles u otras configuraciones sencillas) sólo que optimizados estructuralmente y fabricados con materiales actuales. No debe olvidarse que este tipo de aviones tiene unas prestaciones muy bajas en comparación con los grandes aviones de transporte comercial, y por lo tanto sus requerimientos son también mucho menores; razón por la cual se entiende el hecho de que configuraciones tan antiguas tengan todavía vigencia. Para el resto de aviones el amortiguador oleoneumático es la mejor opción.

El ejemplo más típico de amortiguador sencillo son las ballestas. Se suelen emplear como tren principal en aviones ligeros y consisten en un tubo cuya parte superior se ancla al fuselaje mientras que en la parte inferior se acopla la rueda. La deflexión del tubo proporciona el efecto suspensor y amortiguador. Este sistema es muy sencillo mecánicamente y no tiene apenas mantenimiento pero presenta el problema de generar un desgaste desigual en los neumáticos porque en función del peso del aparato la vía del tren se abre más o menos al contacto con el suelo.

Otro ejemplo son los cordones elásticos, menos utilizados en la actualidad, pero que pueden verse todavía en aviones antiguos dedicados al tratamiento de cosechas (aviones agrícolas). Los cordones de caucho son entrelazados de manera adecuada y con ello se consigue el amortiguamiento de las cargas introducidas por las ruedas.

Otros sistemas que forman parte del tren de aterrizaje, como son el actuador de direccionamiento del tren de morro (o del carretón de 6 ruedas), el sistema de extensión y retracción junto con sus

dispositivos de bloqueo, los amortiguadores de bamboleo, las articulaciones de torsión de las patas (compás), los amortiguadores de cabeceo y articulaciones de frenada de los carretones, etc... han sido también considerados con interés a lo largo de los años pero su investigación suele ir encaminada a la resolución de problemas de carácter más operativo, como la transmisión de vibraciones, la resistencia a fatiga y la corrosión.

Los frenos y los neumáticos son otros elementos que se han estudiado mucho para disminuir los costes de mantenimiento pero su influencia en la disminución de peso global del tren ha sido más bien escasa, consiguiéndose un ahorro del 20% en peso por neumático cuando se comenzaron a emplear neumáticos radiales en sustitución de los convencionales.

Como ejemplo final de solución de compromiso entre los diseñadores del fuselaje, los ingenieros de la aerodinámica, los constructores de pistas de aterrizaje y los operadores de las aeronaves en tierra se puede citar el tren principal del C5-B Galaxy [1] y [25]. Posee un carretón de 6 ruedas dotadas de control automático de inflado que proporciona una flotabilidad adecuada al tipo de pista, las ruedas están distribuidas de manera que los neumáticos posteriores no siguen exactamente el mismo trazado que las ruedas precedentes, cuenta con dos amortiguadores que actúan simultáneamente lo que le confiere mayor rendimiento en pistas de firme irregular, tiene un sistema de altura que le permite bajar el nivel del fuselaje a 1,65 metros del suelo para las operaciones de carga y descarga, y finalmente dispone de un sistema de direccionamiento de todo el conjunto que le permite girar el tren principal 20° a derecha e izquierda para poder llevar a cabo aterrizajes con viento cruzado sin necesidad de corregir súbitamente la trayectoria de la aeronave en el momento de contacto.

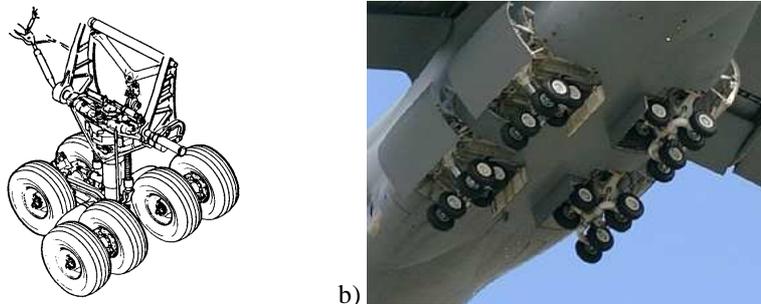


Figura 20. Esquema (a) [1] y modelo real del tren de aterrizaje del Lockheed C-5B Galaxy (b) [25].

Toda la exposición que se ha mostrado en los párrafos precedentes proporciona una idea somera de cómo ha sido la evolución de los trenes de aterrizaje a lo largo del tiempo; sistemas que son empleados en el 99% de la aviación mundial y que están basados en el empleo de ruedas, de ahí su denominación de ‘trenes de rodadura’. Sin embargo se han investigado paralelamente otras configuraciones de trenes de aterrizaje que no hacen uso de la rueda, para aquellos casos en los que dicho elemento suponía más un problema que una solución, estudiando sus ventajas e inconvenientes, y la posibilidad de que pudieran sustituir a los trenes convencionales. A continuación se comentan muy brevemente algunas de estas alternativas.

3. Evoluciones alternativas del tren de aterrizaje

3.1 El tren de aterrizaje basado en orugas

Las orugas son dispositivos que sirven para aterrizar en pistas blandas, propias de terrenos embarrados, fangosos o zonas desérticas con presencia de dunas. La idea general era obtener un tren de aterrizaje con una gran área de contacto sobre el terreno que permitiera aumentar la flotabilidad de la aeronave y evitar que ésta quedara atrapada. La mayoría de los desarrollos lograron su objetivo pero a costa de aumentar el peso del conjunto de forma considerable, en torno a un 2%. Sin embargo la complejidad de estos sistemas así como la dificultad de su montaje y desmontaje llevaba aparejado un aumento en los costes de mantenimiento. Otros problemas asociados a su operación fueron que en los aterrizajes con viento cruzado la oruga tendía a salirse de las ruedas, las altas revoluciones alcanzadas provocaban fallos estructurales en la propia oruga, la conexión mecánica de ésta con los rodamientos originaba problemas adicionales durante el frenado y transmitía cargas excesivas sobre el fuselaje, y por último, la retracción del tren se volvía más complicada porque la oruga hace que el sistema sea mucho más voluminoso que en el caso de un tren convencional. Ejemplos de trenes de aterrizaje con oruga se encuentran en las aeronaves Fairchild C-82, Boeing B-50, Bonmartini [1], y más modernamente en la aeronave experimental Convair XB-36 [26].

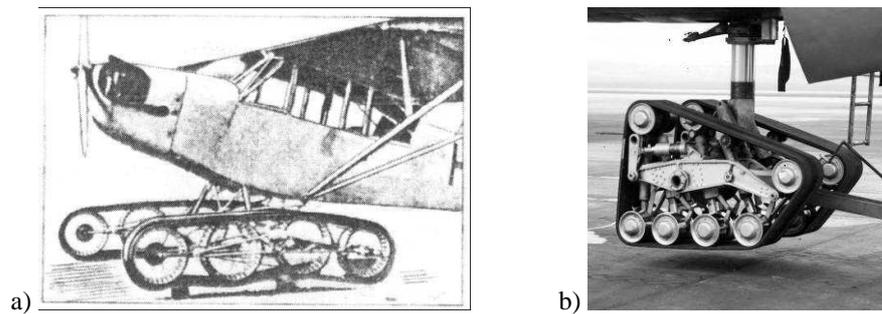


Figura 21. Tren de aterrizaje basado en orugas, Bonmartini (a) [1] y Convair XB-36 (b) [26].

Se dio la circunstancia de que con el tiempo los desarrollos de trenes sin oruga, especialmente mediante el uso de ruedas de mayor diámetro, permitió emplear sistemas convencionales en zonas donde se pensaba que solamente una oruga podía aterrizar. Como consecuencia de ello, en la mayoría de los aparatos las orugas fueron sustituidas por ruedas y su empleo quedó relegado a situaciones de último recurso.

3.2 El tren de aterrizaje basado en colchones de aire

Los colchones neumáticos son apropiados en pistas blandas, más incluso que con orugas, y sobre pistas de agua, nieve o hielo. También pueden ser empleados en ciénagas o marismas. Consiste en un colchón situado en la parte inferior de la aeronave que recorre el perímetro de ésta. Se infla por la parte superior y se permite la salida del aire a presión por la parte inferior siguiendo la línea

perimetral. Su modo de funcionamiento es similar al de los hovercraft y la geometría de su diseño hace que proporcione un área de contacto con el suelo muy elevada, por lo que la presión necesaria para la sustentación no suele ser muy alta. Los principales inconvenientes son que necesita un sistema de energía que actúe en todo momento con independencia de que los motores de la aeronave estén o no activados, no tiene capacidad de frenada, levanta una nube de polvo que pueden perjudicar la visión del piloto, y al no tener rozamiento con el suelo no permiten ningún tipo de direccionamiento por sí solo. Sin embargo tiene la ventaja de no presentar el menor problema en un aterrizaje con viento cruzado y permiten regular la altura del aparato a voluntad en operaciones de carga y descarga. Estudios realizados por la compañía estadounidense Bell Aerospace indican que con este sistema se consigue un tren de aterrizaje con un peso en torno al 3% del peso total de la aeronave, cuando con trenes convencionales se sitúa en torno al 5%. Ejemplos de estos desarrollos son el estadounidense Laker LA-4, versiones especiales del canadiense De Havilland CC-115 Buffalo [1] y [27] de 1967, y el Australiano Jindivik.

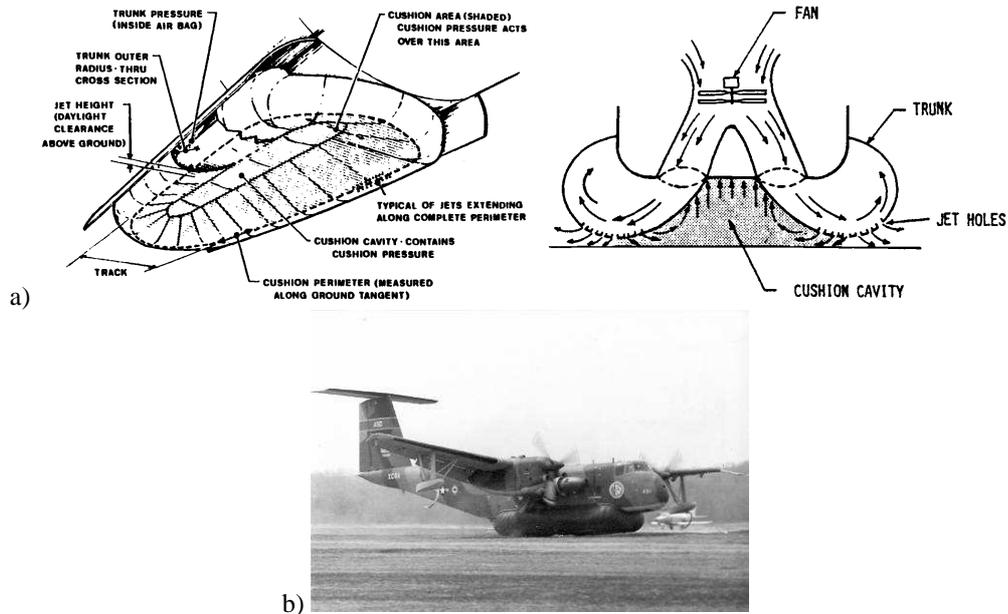


Figura 22. Esquemas de funcionamiento del colchón de aire (a) [1] y colchón real de la aeronave De Havilland CC-115 Buffalo (b) [27].

3.3 El tren de aterrizaje basado en skies

Para terrenos con nieve o hielo los esquís son los sistemas más adecuados. Aumentan la superficie de contacto de forma considerable, requieren muy poco mantenimiento y pueden ser fabricados con materiales muy livianos, ya que la fuerza de rozamiento es muy pequeña (no debe olvidarse que el coeficiente de rozamiento entre el esquí y la nieve suele ser del orden de 0.03). No obstante, precisamente el bajo coeficiente de rozamiento hace que la presencia de viento lateral sea un problema

ya que no permite el control de la aeronave por este medio. Para solucionarlo, algunas aeronaves portan unas pequeñas ruedas que se bajan por debajo del esquí y se hunden parcialmente en la nieve cuando resulta necesario. En otras ocasiones los aviones combinan ambos sistemas para poder dar más versatilidad de aterrizaje al aparato; sin embargo con ello se pierde la idea original de buscar un sistema alternativo al tren convencional que conlleve una disminución del peso. Ejemplos de aviones dotados de esquís son: el Lockheed LC-130 [28] y el De Havilland Twin Otter [29].

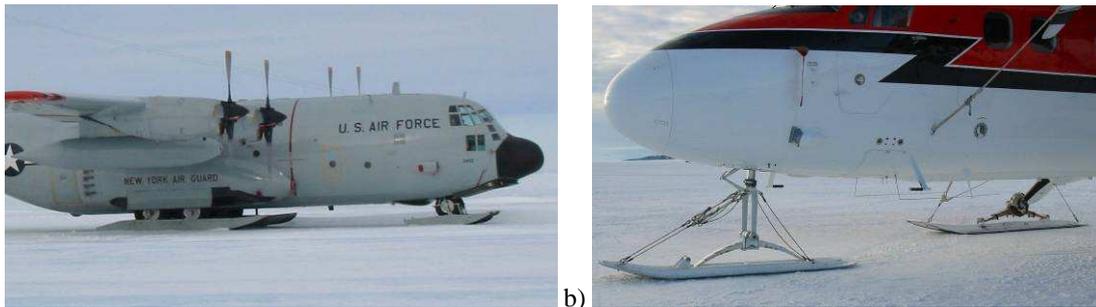


Figura 23. Tren de aterrizaje combinado del Lockheed LC-130 (a) [28] y tren basado exclusivamente en esquís del De Havilland Twin Otter (b) [29].

Nótese que el segundo ejemplo se trata de una avioneta de uso exclusivo en zonas polares. No dispone de ruedas para otras zonas de aterrizaje y presenta la característica de que el tren de morro utiliza un sistema doble de amortiguación. Dispone de un amortiguador convencional en la zona superior del eje y una ballesta que hace las veces de amortiguador y muelle. Además el bulón situado en el punto de unión al eje permite el basculamiento del esquí. En el tren principal, en cambio, la suspensión está basada en unas pastillas de goma situadas en la raíz de los brazos que salen desde la parte inferior del fuselaje permitiendo su balanceo. Esta configuración, ya se mencionó anteriormente, es típica de aeronaves pequeñas en las que no se quiere elevar el precio de comercialización.

3.4 El tren de aterrizaje basado en flotadores

Son el tren de aterrizaje por excelencia para llevar a cabo amerizajes. Al igual que en el caso anterior son livianos y de escaso mantenimiento pero su uso queda restringido a dichas superficies. Es por ello que apenas existen aeronaves dotadas exclusivamente de flotadores; la mayoría lleva un tren convencional con una o varias ruedas que se suben y bajan por debajo de la línea de los flotadores según se requiere. La imagen de la izquierda, Figura 24, muestra un Canadair CL-215-T-UD-1330 [30] antiincendios del Ejército del Aire español. Como se ve, el aparato posee dos flotadores de pequeñas dimensiones bajo las alas que solamente cumplen la función de que éste no se hunda lateralmente sobre el agua, mientras que la cabina de carga realiza la doble misión de flotador principal y de depósito de agua para sus operaciones antiincendios. Además, dispone de ruedas convencionales que se extienden cuando el aparato aterriza en las bases aéreas terrestres. En la imagen de la derecha se observa un Air Tractor AT-802F [31], con una dotación de ruedas retráctiles en cada flotador que hace las veces de tren principal y de morro. El diseño de los flotadores incluye, aparte

lógicamente de un cálculo de flotabilidad, un estudio de la dinámica de la aeronave durante el amerizaje para impedir que ésta pique hacia delante. También se estudia el efecto aerodinámico de estos elementos durante el vuelo.

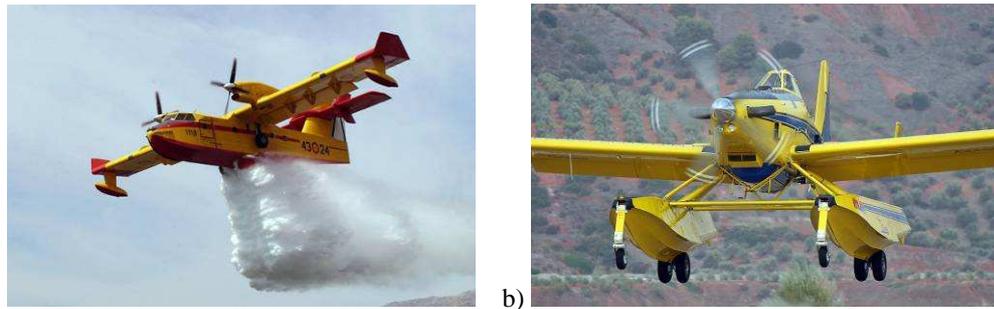


Figura 24. Trenes de aterrizaje combinados flotador/ruedas de un Canadair CL-215-T-UD-1330 (a) [30] y un Air Tractor AT-802F (b) [31].

Finalmente, Currey, N. S. (1988) [1] proporciona un gráfico que da una idea del coste en peso que se produce al incorporar estos sistemas de aterrizaje no convencionales en las aeronaves. Como se puede ver, cualquier sistema alternativo a las ruedas es más pesado sobretodo si el tren se aterriza es combinado. La única excepción proviene del colchón de aire (ACLS), que viene a ser del mismo orden.

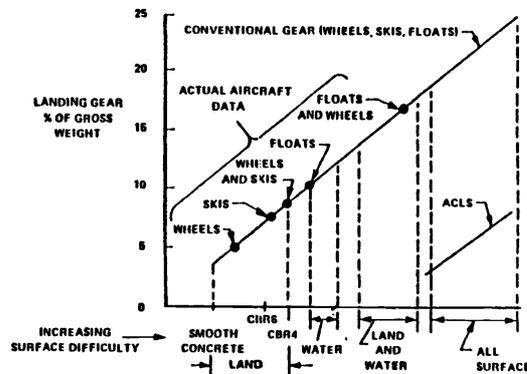


Figura 25. Porcentaje en peso de trenes de aterrizaje convencionales, no convencionales o combinados respecto del peso total de la aeronave [1].

4. Conclusiones

Como resumen de todo lo expuesto en este artículo, se puede decir que queda manifiestamente clara la complejidad que lleva aparejado el diseño, desarrollo y mantenimiento de un tren de aterrizaje.

Conforme a lo largo de la historia las aeronaves llegaban a ser más rápidas y pesadas se ha ido producido una sofisticación indiscutible en sus diseños, consecuencia tanto de requisitos estructurales y operativos como de especificaciones impuestas por las normas aplicables. Los primeros trenes de aterrizaje no eran más que patines deslizantes que rápidamente fueron sustituidos por ruedas de pequeño tamaño, y, sus sistemas de amortiguación, basados en gomas elásticas y estructuras reticuladas, eran sencillos pero suficientemente válidos en aviones construidos a base de madera y lona. Cuando se comenzaron a construir de metal y sus prestaciones aumentaron se introdujeron las ruedas direccionales, se impuso la retracción en el diseño del tren, se emplearon neumáticos a presión y se desarrollaron los primeros amortiguadores hidráulicos. Finalmente, cuando los aviones se constituyeron como motor económico de los países y el peso y velocidad de los mismos se incrementaba sin parar, se dio origen a nuevas configuraciones de tren, a desarrollos a partir de aleaciones ligeras más resistentes e investigaciones con materiales compuestos, a incrementos en el número de amortiguadores, se comenzaron a utilizar carretones, etc... convirtiendo el tren de aterrizaje en una verdadera obra de ingeniería.

Diseños alternativos fueron inevitables para aterrizar sobre terrenos blandos, y de ahí surgieron nuevas ideas como las orugas, los flotadores, los esquíes o los colchones de aire, aunque su uso quedó definitivamente restringido a estas situaciones tan particulares.

5. Referencias

- [1] CURREY, N. S. (1988). "Aircraft Landing Gear Design: Principles and Practices", pp. 1-15. AIAA Education Series, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, EE.UU.
- [2] "Galería de La Bodegona", colección Muenchen (24 de marzo de 1998). Extraído el 28 de enero de 2010 desde <http://picasaweb.google.com/labodegona/Muenchen#5181779697469718658>.
- [3] National Museum of the US Air Force. Extraído el 27 de enero de 2010 desde http://www.nationalmuseum.af.mil/factsheets/factsheet_media.asp?fsID=276
- [4] VAN DE GOOR'S, HENK. Extraído el 10 de diciembre de 2009 desde http://www.vandegoor.com/coppermine/albums/uploads/2006/Wallpapers%20K-T/Old_Rhinebeck_Spad_VII_Replica.jpg.
- [5] JUAN ANTONIO (25 de febrero 2009). "Cine e biografías: iconos da I Guerra Mundial, (II)". Consulta 17 de diciembre de 2009 de <http://yvantres.wordpress.com/2009/02/25/cine-e-biografias-iconos-da-i-guerra-mundial-ii/>.
- [6] MAREK, PIOTR (17 de agosto 2005). Cracow-Rakowice-Czyzyny, Polonia. Extraído el 10 de diciembre de 2009 desde Airliners.net, <http://origin-www.airliners.net/>

<http://www.uax.es/publicacion/evolucion-historica-de-los-trenes-de-aterrizaje-en-las-aeronaves.pdf>

photo/Poland---Air/Albatros-BII-30/0927042/&sid=4ce8c72685f41efbe1418c24eff2b51c.

- [7] LOGAN, W. (16 de enero de 2006). Oklahoma History Center, EE.UU. Extraído el 28 de enero de 2010 desde <http://en.wikipedia.org/wiki/File:OK-Winnie-Mae-replica.jpg>.
- [8] “Galería de Jerome”, colección San Diego Air & Space Museum (2 de febrero de 2008). Extraído el 28 de enero de 2010 desde <http://picasaweb.google.com/lh/photo/3hrmc65F6d4IOsogZqIXhQ>.
- [9] Usuario STAHLKOCHER (3 de septiembre de 2005). Extraído el 10 de diciembre de 2009 desde Wikimedia Commons, http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Douglas_DC-2_Uiver.jpg.
- [10] PASCOE, DEN (marzo de 1983). Rockliffe, Ottawa, Canadá. Extraído el 10 de diciembre de 2009 desde Airliners.net, http://www.airliners.net/photo/California-Standard-Oil/Boeing-247D/0655080/L/&tbl=&photo_nr=18&sok=&sort=&prev_id=0655081&next_id=0655079.
- [11] Usuario TM (27 de julio de 2008). Extraído el 28 de enero de 2010 desde Wikimedia Commons, http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/de/Ford_4AT_Trimotor.JPG.
- [12] SEAMAN, RICHARD. Extraído el 29 de enero de 2010 desde su página web <http://www.richard-seaman.com/Wallpaper/Aircraft/Bombers/He111TakingOff230.jpg>.
- [13] Prototypes.com. Extraído el 28 de enero de 2010 desde <http://prototypes.free.fr/vtol/vtolde/mmwesp4.jpg>.
- [14] Prototypes.com. Extraído el 28 de enero de 2010 desde <http://jpcolliat.free.fr/xfv1/xfv1-3.htm>.
- [15] SEAMAN, RICHARD. Extraído el 29 de enero de 2010 desde <http://www.richard-seaman.com/Wallpaper/Aircraft/Bombers/YankeeLadyTakingOff.jpg>.
- [16] Usuario NEHRAMS2020 (29 de diciembre de 2007). Extraído el 29 de enero de 2010 desde Wikimedia Commons, http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/61/Boeing_B-29_SuperfortressCAM.jpg.
- [17] Usuario ISOL. Extraído el 28 de enero de 2010 desde <http://static.panoramio.com/photos/original/6231013.jpg>.

-
- [18] Extraído el 29 de enero de 2010 de http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/86/Airnz_b747-400_zk-nbt_arp.jpg.
- [19] Extraído el 29 de enero de 2010 desde http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/35/Boeing-777-300_chassis_.jpg.
- [20] MOTTL, DMITRY A. (septiembre de 2008). Extraído el 29 de enero de 2010 desde http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/63/An-225_Mriya_4.jpg.
- [21] Usuario DOOMYCH (22 de agosto de 2009). Extraído el 29 de enero de 2010 desde http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/10/Antonov_An-124._Basic_chassis.jpg.
- [22] MONNIAUX, DAVID (21 de junio de 2007). Extraído el 29 de enero de 2010 desde http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/71/A400M_landing_gear_P1220828.jpg.
- [23] PINK, JACK (marzo, 1996). “Landing Gear Structural Integrity”. Aerospace Engineering Magazine. Extraído el 22 de diciembre desde la página de [shotpeener.com](http://www.shotpeener.com/library/spc/1996001.htm), <http://www.shotpeener.com/library/spc/1996001.htm>.
- [24] ESTEBAN OÑATE, ANTONIO (2001, 4º ed. 2003). “Conocimientos del avión”, pp. 615-688. Thomson Editores Spain, Paraninfo S.A. Madrid (España).
- [25] Airliner.net (18 de junio de 2004). Seattle, EE.UU. Extraído el 1 de febrero de 2010 desde <http://www.airliners.net/photo/USA---Air/Lockheed-C-5B-Galaxy/0601038/L/&refresh=1>.
- [26] Usuario STAHLKOCHER (16 de febrero de 2007). Extraído el 29 de enero de 2010 desde http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3d/Convair_XB-36_nose_landing_gear_detail_061128-F-1234S-034.jpg.
- [27] VISSCHEDIJK, JOHAN (31 de octubre de 2007). Extraído el 1 de febrero de 2010 desde [1000aircraftphotos.com](http://www.1000aircraftphotos.com), <http://www.1000aircraftphotos.com/Contributions/Visschedijk/7012L-1.jpg>.
- [28] Extraído el 1 de febrero de 2010 desde la dirección <http://www.sethwhite.org/images/airfields/sea%20ice%20runway/c130%20on%20skis.jpg>.
- [29] Extraído el 1 de febrero de 2010 desde la dirección <http://www.sethwhite.org/images/airfields/williams%20field/twin%20otter.jpg>.

- [30] REINERT, LEONARDO (16 de noviembre de 2009). “El hidroavión. Notas perdidas en la web”. Extraído el 1 de febrero desde http://1.bp.blogspot.com/_eqb8qL2GKZc/SwG324WydBI/AAAAAAAAACN0/FC7wUfloGvM/s1600/502469.jpg.
- [31] YÁNEZ, ROBERTO (9 de agosto 2005). “Beas de Segura, Jaén”. Extraído el 10 de diciembre de 2009 desde Airliners.net, <http://cdn-www.airliners.net/aviation-photos/photos/5/1/7/0905715.jpg>.