



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Arquitectura general de aeronaves

Apellidos y nombre: García-Cuevas González, Luis Miguel (luiga12@mot.upv.es)¹
Carreres Talens, Marcos (marcarta@mot.upv.es)¹
Tiseira Izaguirre, Andrés Omar (anti1@mot.upv.es)¹

Departamento/Centro: ¹Departamento de Máquinas y Motores Térmicos
Universitat Politècnica de València

Índice general

1. Resumen	2
2. Objetivos	2
3. Introducción	2
4. Desarrollo	2
4.1. Conceptos básicos	2
4.2. Materiales utilizados	4
4.3. Estructura del fuselaje	4
4.3.1. Fuselajes reticulados	4
4.3.2. Fuselaje monocasco	6
4.3.3. Fuselaje semimonocasco	6
4.4. Estructura del ala y de los estabilizadores	8
5. Cierre	9
Bibliografía	10

1 Resumen

La estructura primaria de las aeronaves puede realizarse en una gran variedad de modos distintos. De entre todos estos modos, hay cinco que destacan por motivos históricos y por lo habitual de su uso. Este documento hace una introducción somera a estos tipos de estructuras. En él se discutirán, entre otras cosas, los materiales utilizados en las estructuras de aeronaves, las estructuras del fuselaje y las estructuras del ala y los estabilizadores.

2 Objetivos

Tras leer detenidamente este documento, el lector ha de ser capaz de:

- Conocer la nomenclatura relevante en las estructuras aeronáuticas.
- Comprender los mecanismos de deformación elástica y plástica de las estructuras.
- Conocer los materiales utilizados en las estructuras aeronáuticas a lo largo de la historia y en la actualidad.
- Conocer los distintos tipos de estructuras de fuselaje, ala y estabilizadores utilizados a lo largo de la historia y en la actualidad.
- Analizar el rol de los distintos elementos del fuselaje en su estructura.
- Analizar el rol de los distintos elementos estructurales del ala y los estabilizadores en el global de la estructura.

3 Introducción

Las aeronaves, al igual que otros vehículos, han de soportar una gran variedad de cargas estructurales a lo largo de su vida útil. Dado el elevado interés en reducir el peso estructural de las mismas, las estructuras de las aeronaves suelen ser especialmente ligeras y han de optimizarse al máximo. Esto da lugar a que algunos estados de cargas que en otro tipo de configuraciones estructurales no son especialmente críticos en las aeronaves tengan que ser enfrentados con especial cuidado.

4 Desarrollo

4.1 Conceptos básicos

La estructura primaria de una aeronave (la que, en caso de fallo, pone en peligro la integridad de la aeronave) suele estar formada por elementos asimilables a vigas o a paneles: al menos una de las dimensiones del elemento es mucho menor que las otras dos. Estas estructuras soportan, según el caso, cargas de tracción, compresión, cizalladura, torsión y flexión. La Figura 1 presenta una viga de longitud original L y sección A sometida a una fuerza F . Las cargas suelen medirse como fuerza por unidad de área, en lo que se conoce como **esfuerzo**, σ . Debido a estas cargas se producirán **deformaciones**, ϵ (cambio en la longitud del elemento ΔL entre la longitud original, L). Dichas deformaciones pueden ser elásticas o plásticas:

Deformación elástica: deformación que desaparece al retirar la carga. Se da para esfuerzos suficientemente bajos (hasta el punto P en la Figura 1), y es proporcional a los mismos.

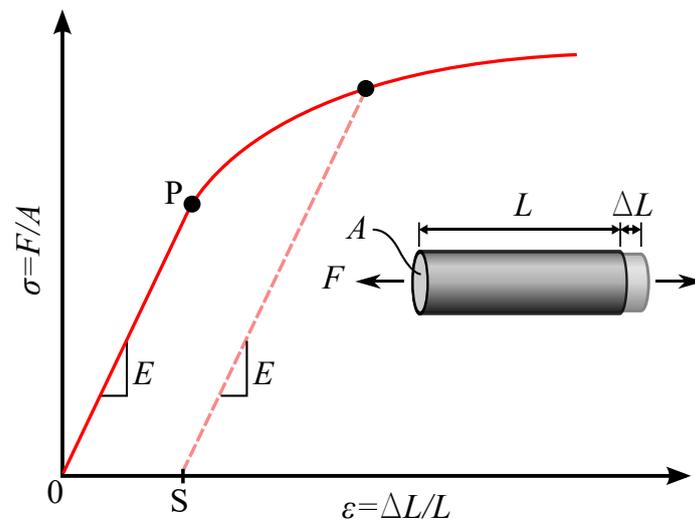


Figura 1: Diagrama esfuerzo-deformación para una viga de longitud L y sección A sometida a una fuerza F .

Bajo cargas axiales, el coeficiente de proporcionalidad es el *módulo elástico* o *módulo de Young* (E), de modo que se tiene la siguiente relación:

$$\frac{\Delta L}{L} = \epsilon = E \cdot \frac{F}{A} = E \cdot \sigma \quad (1)$$

Deformación plástica: es aquella que deja una deformación residual al retirar la carga. En la zona de comportamiento plástico la deformación deja de ser proporcional al esfuerzo.

Dado que ha de mantenerse la forma de la estructura, las aeronaves se diseñan procurando, en general, que no se sobrepase el esfuerzo que provoca deformación plástica. Este esfuerzo, el límite entre la zona elástica y plástica, se denomina *límite elástico*. Nótese que, por debajo del límite elástico, el comportamiento lineal es análogo al de un muelle, en el que la constante de rigidez del mismo es $E \cdot A/L$.

Las estructuras podrán soportar, por lo general, un esfuerzo superior al límite elástico antes de colapsar o romper. El esfuerzo máximo que soporta una zona de la estructura es su *esfuerzo de rotura*.

Cuando una estructura se ve sometida a una compresión, es posible que falle incluso antes de llegar a superar su límite elástico. Este tipo de fallo es una inestabilidad estructural que se denomina *pandeo*. El esfuerzo de pandeo es más grande cuanto mayor sea el módulo de Young del material, mayor sea su sección y menor sea la longitud del elemento estructural. Para una misma sección y un mismo material, cuanto mayor sea la longitud de la estructura más fácil es que se produzca el pandeo. Para evitarlo, se puede optar por múltiples caminos: modificar el material, aumentar la sección o reducir la longitud del elemento. De entre todas las opciones, la óptima suele consistir en reducir la longitud. Una forma de lograrlo es colocar apoyos en el elemento estructural: de ese modo, pasa a comportarse como varios elementos de menor longitud, con una carga de pandeo mayor.

Buena parte de los elementos de la estructura primaria de una aeronave se diseñan de modo que fallen debido a que alcancen su límite elástico con un esfuerzo similar al que provoca el pandeo, buscando así minimizar el peso estructural.

Cuando se producen cargas cíclicas, se produce el fenómeno de la fatiga del material y el crecimiento de grietas existentes en el mismo, por lo que es necesario realizar inspecciones periódicas para asegurar la seguridad de la operación.

4.2 Materiales utilizados

En los orígenes de la aviación era común contar con aeronaves construidas en madera, tela y cable de acero. Esto presentaba una serie de inconvenientes:

- En la tela se condensa la humedad ambiental al aumentar la altitud de vuelo. Dicha humedad, ya en tierra, puede producir que la tela se pudra. Además, la tela tiene una capacidad para soportar cargas muy limitada.
- La madera también presenta problemas debido a la humedad. No sólo puede pudrirse: además, la humedad hace que se deforme.
- El acero es un material muy denso.

En la actualidad, la mayor parte de la estructura está fabricada en metal. De entre todas las aleaciones utilizables, las **aleaciones ligeras de aluminio** son las más importantes. Tienen una resistencia específica elevada y una baja densidad. Otros materiales, como el acero o el titanio, requieren (en general) de un mayor peso estructural para soportar los mismos esfuerzos que el aluminio.

Las aleaciones de **titanio** son también comunes, aunque mucho menos que las de aluminio. Se utilizan en elementos que tengan que tolerar cargas térmicas elevadas, ya que el aluminio pierde su capacidad resistente a temperaturas mucho menores que el titanio.

El **acero inoxidable** es extremadamente resistente, pero tiene una densidad elevada. Sólo algunos elementos, robustos y compactos, sin grandes problemas de pandeo, se fabrican en acero. Un ejemplo claro es el del tren de aterrizaje.

Cada vez se utilizan más, además, los **materiales compuestos**. Están formados por láminas de tejido (generalmente *fibra de carbono*) unidas por una matriz de resina (generalmente *resina epoxi*). El material compuesto es extremadamente ligero y puede permitir reducir el peso de la estructura, pero tiene problemas de resistencia a impacto.

Los revestimientos, tanto si son de aluminio como si son de material compuesto, deben pintarse para tolerar las inclemencias climatológicas y evitar los daños por la humedad: el aluminio debido a la corrosión y el material compuesto debido a la sustitución de la resina por agua.

4.3 Estructura del fuselaje

Los tipos de fuselaje más importantes son:

4.3.1 Fuselajes reticulados

Formados por una serie de barras y cables que soportan toda la carga (de manera similar a un puente, como se observa en la Figura 2), más un revestimiento que sólo da la forma exterior. Este revestimiento se fabrica, generalmente, en tela. La Figura 3 muestra ejemplos de los distintos tipos de fuselajes reticulados que se pueden encontrar:

- **Fuselaje de Pratt** (Figura 3a)
La estructura está formada por unas vigas que recorren el fuselaje a lo largo de su eje longitudinal, llamados **largueros**. Los largueros están unidos entre sí por pequeñas vigas

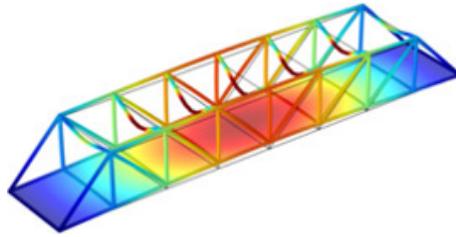


Figura 2: Ejemplo de estructura reticulada.

verticales y horizontales llamadas **montantes**. Para soportar los esfuerzos de cortadura, se usan cables **tensores** que trabajan a tracción. Es una estructura común en los comienzos de la aviación. Cuando no se utilizaba revestimiento, este tipo de fuselajes pecaba de una gran resistencia aerodinámica en vuelo.

- **Fuselaje de Warren** (Figura 3b)

En este caso, se sustituyen los cables tensores por vigas diagonales, capaces de soportar tanto tracción como compresión. Se consigue así una estructura más rígida, más difícil de deformar. Es una estructura común en los comienzos de la aviación. Se solía fabricar en madera o en acero, aunque también hay casos en aleaciones de aluminio. Cuando no se utilizaba revestimiento, este tipo de fuselajes pecaba de una gran resistencia aerodinámica en vuelo.

- **Fuselaje geodésico** (Figura 3c)

Está formado por una serie de vigas que siguen los arcos de longitud mínima sobre la forma del fuselaje. En este tipo de estructuras, los esfuerzos de compresión son compensados por los esfuerzos de tracción y se minimiza el peso estructural para soportar un determinado estado de cargas. Es mucho más eficiente que los fuselajes de Pratt y Warren, pero su complejidad aumenta los costes de fabricación y mantenimiento. Ante un fallo de parte de la estructura, las cargas se reparten en el fuselaje geodésico de forma eficiente: en la Segunda Guerra Mundial se podían encontrar aviones volando con este fuselaje con una buena parte del mismo destruido.



(a) Blériot XI (Herzog 2011)

(b) Piper PA18 (Blücher 2007)

(c) Vickers Wellington (Wilson 2011)

Figura 3: Ejemplos de los distintos tipos de fuselajes reticulados utilizados en aviación.

4.3.2 Fuselaje monocasco

En este tipo de fuselaje, ejemplificado en la Figura 4, el revestimiento es grueso y soporta la mayor parte de las cargas. Originalmente se construía en madera, aunque actualmente se construye en aleaciones ligeras y materiales compuestos.

Los fuselajes monocasco pueden estar reforzados mediante **cuadernas** (en lo que se conoce como **fuselaje monocasco reforzado**), que dan la forma al mismo. Además, como el revestimiento no soporta eficientemente los esfuerzos de compresión, se pueden añadir otros refuerzos extra.

El fuselaje monocasco utiliza un revestimiento extremadamente grueso para soportar las cargas de pandeo. Es posible soportarlas con mucho menos peso utilizando un revestimiento mucho más fino y una gran cantidad de apoyos, como veremos a continuación.



Figura 4: M. Prévost sobre el Deperdussin Monocoque, ganador de la Copa Gordon-Bennett en 1912 al recorrer 200 km en 59 min 45 s. Su construcción le proporcionaba un diseño aerodinámicamente limpio que le permitió aumentar el récord mundial de velocidad a 210 km/h en 1913. (Fotografía de dominio público)

4.3.3 Fuselaje semimonocasco

Es el tipo de fuselaje más habitual en la actualidad. Puede verse como una evolución del fuselaje monocasco reforzado. En su exterior, está formado por un revestimiento fino que pandea con facilidad. Para evitar esto, tal y como se muestra en la Figura 5, se coloca una serie de elementos adicionales a los de su predecesor:

Larguerillos: son una serie de pequeñas vigas que recorren el fuselaje longitudinalmente. Sirven de apoyo al revestimiento, previniendo el pandeo. Al aumentar el número de larguerillos y reducir la distancia entre los mismos, se aumenta el esfuerzo de pandeo. Soportan, además, cargas de compresión y tracción, incluidas las inducidas por la flexión del fuselaje.

Cuadernas: elementos estructurales curvos que dan la forma al revestimiento y sirven de apoyo del mismo y de los larguerillos, a los que son perpendiculares, previniendo el pandeo. Están colocados de forma transversal.

Además, se cuenta con una serie de elementos extra:

Largueros: son vigas que recorren el fuselaje de forma longitudinal, soportando flexión y las posibles cargas axiales.

Mamparos de presión: en caso de que el fuselaje esté presurizado, delimitan la zona presurizada en su parte posterior y anterior, y tienen forma similar a un casquete esférico.

Mamparos de división y marcos: son mamparos planos, utilizados en zonas de concentración de esfuerzos, como en el soporte de los motores, del tren de aterrizaje o del ala.

El revestimiento soporta cargas de tracción, cortadura y torsión, y se une a los demás elementos mediante tornillos o remaches. Es habitual el uso de remaches avellanados de cabeza plana,



(a) Fuselaje del Concorde (William 2010)



(b) Fuselaje del Boeing B787 (dominio público)

Figura 5: Ejemplos de fuselaje semimonocasco.

que quedan a ras del revestimiento para minimizar su resistencia aerodinámica. En el caso de materiales compuestos, en vez de usar remaches se puede hacer uso de resina para pegar unos elementos a otros.

Es interesante notar que las ventanillas han de colocarse entre cuadernas, y que éstas no están demasiado alejadas entre sí para evitar el pandeo de la estructura: es por esto que suelen colocarse a una distancia de alrededor de medio metro unas de otras. Las ventanillas suponen discontinuidades importantes en la estructura, por lo que sus marcos han de estar suficientemente reforzados para soportar la acumulación de tensiones. Alrededor de las ventanillas las grandes tensiones acumuladas facilitan el crecimiento de grietas y la fatiga del material, y puede producirse corrosión con facilidad. Para reducir problemas estructurales, su tamaño se intenta minimizar.

A pesar del aumento de complejidad y de número de elementos, el fuselaje semimonocasco suele pesar menos que el monocasco para soportar el mismo estado de cargas: el colocar apoyos extra para evitar el pandeo es una medida mucho más eficiente que aumentar el espesor del revestimiento.

■ Fuselaje presurizado

Cuando se vuela en altitudes elevadas, la presión parcial de oxígeno del ambiente es demasiado baja para que los humanos del interior de la aeronave puedan mantenerse con vida, por lo que es necesario presurizar la misma. Esto genera grandes cargas debido a la diferencia de presiones entre el interior y el exterior, lo que llega a ser el esfuerzo del fuselaje más importante en este tipo de aeronaves. En caso de que el fuselaje tuviera esquinas duras, se produciría en las mismas una gran acumulación de tensiones, por lo que los fuselajes presurizados se diseñan con sección redonda u ovalada. Para reducir los problemas de la presurización se usan, además, recubrimientos flotantes, que pueden moverse ante cargas de cortadura respecto a las cuadernas.

En los fuselajes presurizados son especialmente problemáticas las discontinuidades en el mismo, como son las ventanas o las puertas, por lo que se requieren marcos especialmente robustos.

Los fuselajes presurizados suelen ser fuselajes semimonocasco, ya que el revestimiento de los mismos soporta las cargas de tracción provocadas por la presurización.

4.4 Estructura del ala y de los estabilizadores

En el caso del ala y los estabilizadores, lo habitual es utilizar una estructura semimonocasco, como se ilustra en la Figura 6. Hay notables excepciones con otros tipos de estructuras, incluso geodésicas, pero no son muy comunes. La estructura semimonocasco está formada por el mismo tipo de elementos que el fuselaje homónimo, con algunas excepciones:

1. No hay mamparos de presión, pues no hay cargas de presurización.
2. Existen **larguerillos** que sólo recorren longitudinalmente el revestimiento superior del ala y otros que sólo recorren el revestimiento inferior.
3. Los **largueros** suponen el elemento estructural más importante. Cada larguero está adosado tanto al revestimiento superior como al inferior, recorriendo el ala longitudinalmente. Existen alas con estructuras de un larguero, dos largueros o incluso multilarguero, aunque las alas de dos largueros como la mostrada en la Figura 6 son las más habituales en aviación comercial.
4. En lugar de cuadernas, los elementos transversales que dan la forma a la sección se denominan **costillas**.
5. Se insertan además **herrajes** para unir el ala al fuselaje o las superficies de control al ala.

Las costillas pueden ser paralelas al eje del avión o perpendiculares al larguero anterior. En alas con flecha elevada, esto es especialmente importante, puesto que la orientación de las costillas cambia considerablemente de un caso a otro. El ala suele construirse con costillas paralelas al eje de la aeronave cerca de la raíz y perpendiculares al larguero cerca de la punta, buscando beneficios aerodinámicos o estructurales en cada caso.

Las costillas pueden ser, a su vez:

Costillas de compresión: unen los largueros entre sí. Transmiten y distribuyen equitativamente los esfuerzos en los largueros. Se colocan donde se producen esfuerzos locales.

Costillas maestras: mantienen distanciados los largueros y dan rigidez al revestimiento y los larguerillos, evitando su pandeo.

Costillas comunes: no son tan robustas. Su tarea es la de mantener la forma del perfil y transmitir las fuerzas interiores a los largueros, distribuyéndolas en varias partes de ellos. Estabilizan ante el pandeo, además.

Falsas costillas: sólo sirven para mantener la forma del revestimiento, y se ubican entre el larguero y el borde de ataque o fuga.

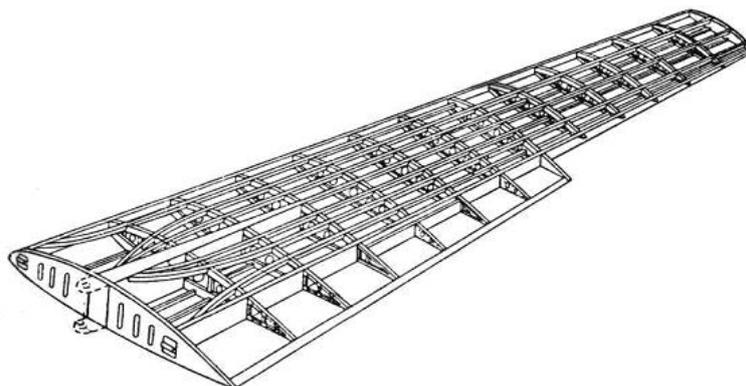


Figura 6: Estructura interna de un ala semimonocasco. No se muestra el revestimiento. (dominio público)

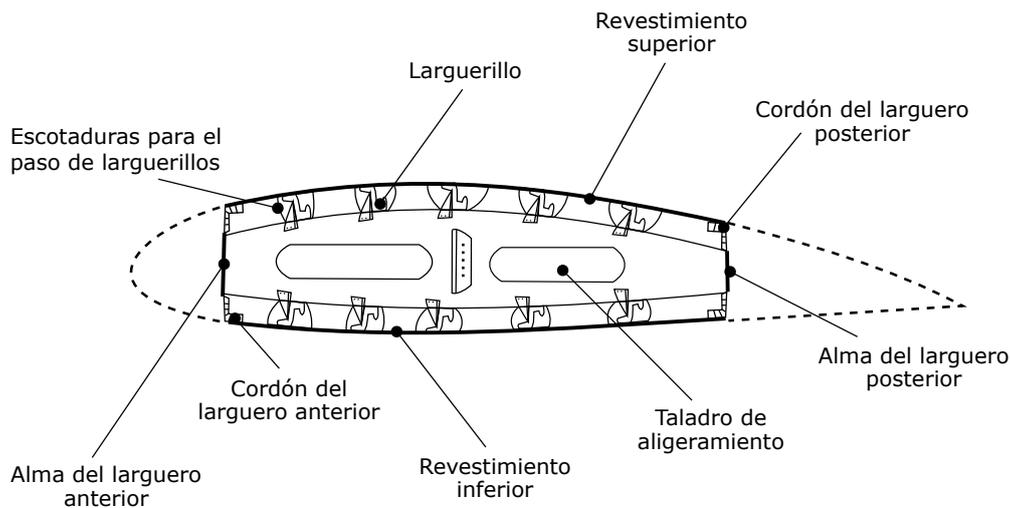


Figura 7: Vista lateral de una costilla emplazada en una estructura alar semimonocasco. Kadellar 2009

Por tanto, las costillas mantienen la forma de la sección, separan los largueros entre sí, estabilizan los diversos elementos ante el pandeo, redistribuyen esfuerzos y se usan para unir otros elementos, como el tren de aterrizaje.

Las costillas (Figura 7) están formadas por un alma (la zona central) y los nervios superior e inferior. En esto la nomenclatura es similar a la de las vigas de los largueros, que también están formadas por un alma y por un cordón inferior y otro superior. Dados los requisitos de mantenimiento, las almas de los largueros y las costillas han de tener agujeros en determinados lugares por los que pueda entrar la mano de un operario.

Los largueros soportan los enormes esfuerzos de flexión que se dan en el ala cuando ésta sustenta, ya que ha de soportar todo el peso de la aeronave (o incluso más, en maniobra). En esos casos, toda la parte superior del ala estará sometida a compresión, mientras que la parte inferior estará sometida a tracción. Con el avión en tierra, la situación es la contraria: la parte superior está sometida a tracción y la inferior a compresión. Estas cargas de compresión y tracción derivadas de la flexión son soportadas por los cordones de los largueros, por el revestimiento y por los larguerillos. Nótese que la flexión no es más que tracción en una parte de la sección y compresión en otra: habrá una zona intermedia entre la parte superior y la inferior del ala donde la tracción/compresión sea nula, que llamaremos *línea neutra*.

La zona de la estructura del ala formada por el revestimiento, los larguerillos y los largueros se llama *cajón de torsión*, y en su interior suelen encontrarse los depósitos de combustible de la aeronave. En este caso, las costillas pueden servir, además, para separar diversos depósitos de combustible.

5 Cierre

En este artículo se ha revisado la tipología de estructuras de los elementos que constituyen la arquitectura general de las aeronaves. Tras una breve descripción de los conceptos básicos y los materiales utilizados, se ha realizado una revisión a los distintos tipos de estructura empleados para los fuselajes a lo largo de la historia (reticulados, monocasco y semimonocasco). Posteriormente se ha analizado el ala de tipo semimonocasco por ser la más relevante en el ámbito del transporte comercial a día de hoy.

Bibliografia

- Blücher, Fabian von (2007). *The fuselage of a Piper PA-18 during a major overhaul*. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:L18FuselageCT.jpg> (vid. pág. 5).
- Herzog, Julian (2011). *Blériot XI 1999 replica Hahnweide 2011*. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Blériot_XI_1999_replica_Hahnweide_2011_01.jpg (vid. pág. 5).
- Kadellar, Davo (2009). *Torsion box in an airfoil*. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ES-Torsion-box.svg> (vid. pág. 9).
- William, M (2010). *Windows of Concorde G-BBDG at Brooklands museum*. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Concorde_G-BBDG_Windows.JPG (vid. pág. 7).
- Wilson, Alan (2011). *The famous 'Loch Ness Wellington'*. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vickers_Wellington_Ia_N2980_R_\(6912807903\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vickers_Wellington_Ia_N2980_R_(6912807903).jpg) (vid. pág. 5).