

## Capítulo 4

# Análisis de estabilidad

En este capítulo se va a hacer un análisis de estabilidad del helicóptero *Bo-105* en distintos puntos de operación, de forma que se pueda tener una idea de cómo será su comportamiento en rango apreciable de puntos de la envuelta de vuelo.

Este análisis de estabilidad resulta indispensable para conocer el comportamiento dinámico del helicóptero durante las fases de vuelo de interés, de forma que puedan ser diseñados sistemas adecuados de aumento de estabilidad (*SAS*) para cada situación que así lo requiera.

Como se ha comentado antes, para este estudio de estabilidad resulta aconsejable desacoplar las ecuaciones linealizadas del movimiento, estudiando por separado los problemas longitudinal y lateral-direccional. Esto va a permitir una clara identificación de los distintos modos de respuesta que normalmente se dan en este tipo de helicópteros, pudiendo medir sus características de frecuencia, amortiguamiento, tiempo de establecimiento, etc. Éstas pueden ser comparadas con los requisitos que impone la normativa actual para las distintas misiones posibles, estableciéndose un criterio para buscar los sistemas de aumento de estabilidad adecuados.

De este modo, se va a comenzar estudiando la dinámica longitudinal, para pasar posteriormente al problema lateral-direccional, y concluir este estudio con un breve análisis del problema acoplado, que permita tener constancia del grado de aproximación a los modos que se obtienen al desacoplar el problema.

### 4.1. Estabilidad longitudinal

Como bien es sabido, la estabilidad de los sistemas lineales puede ser determinada por medio de sus autovalores. Así, habría que realizar un cálculo de los mismos en diferentes puntos de operación de helicóptero (los cuales vienen dados por las distintas velocidades de avance que se estén considerando).

Puesto que resulta conveniente tener una imagen general del comportamiento del helicóptero en todo el rango de velocidades de operación, resulta bastante ilustrativo un gráfico del *lugar de las raíces*, donde se muestran las curvas que describen los autovalores en el plano complejo al variar la velocidad de avance del helicóptero.

En la figura 4.1 aparecen representadas las curvas que describen los autovalores al variar la velocidad de avance desde los *0 knots*, hasta los *140 knots*. De este modo, se puede apreciar la existencia

de tres modos longitudinales claramente diferenciados, los cuales se describen a continuación:

- Por un lado, existe un modo oscilatorio, denominado *phugoide mode*. Se trata de un tipo de oscilación muy característica de aeronaves tanto de ala fija como rotatoria. Básicamente consiste en un intercambio de energía potencial y cinética que produce oscilaciones en las velocidades horizontal y vertical.

Para apreciar correctamente el efecto de la velocidad en el modo phugoide de este helicóptero, es necesario realizar una ampliación de la figura 4.1, mostrándose el resultado en la figura 4.2. Se puede comprobar así, como en los primeros instantes del vuelo este modo se mantiene estable, aunque cerca de la frontera de la inestabilidad. Posteriormente, los autovalores van evolucionando a una zona de mayor amortiguamiento, mejorándose la estabilidad, hasta que a una velocidad de entorno a los *20 knots* se produce un punto de inflexión, de forma que el comportamiento de este modo se va haciendo más inestable conforme aumenta la velocidad, cruzando el eje imaginario hacia el semiplano derecho a una velocidad de avance de *110 knots*.

- Por otro lado, se aprecia la presencia de dos modos no oscilatorios con dos tiempos característicos diferenciados.

A bajas velocidades, el más rápido de ellos muestra una convergencia en cabeceo, mostrando las variaciones más importantes tanto en la velocidad como en el ángulo de cabeceo. A medida que aumenta la velocidad de avance, la aeronave se muestra más reticente a cambiar su ángulo de cabeceo (posiblemente debido al amortiguamiento aerodinámico que introduce la velocidad de avance), de modo que este modo se transforma progresivamente en una convergencia en velocidad vertical pura.

En cuanto al modo más lento, del análisis de autovectores se puede deducir que se trata de una convergencia que sólo implica variaciones en la velocidad horizontal y vertical, manteniendo prácticamente constante el ángulo de cabeceo.

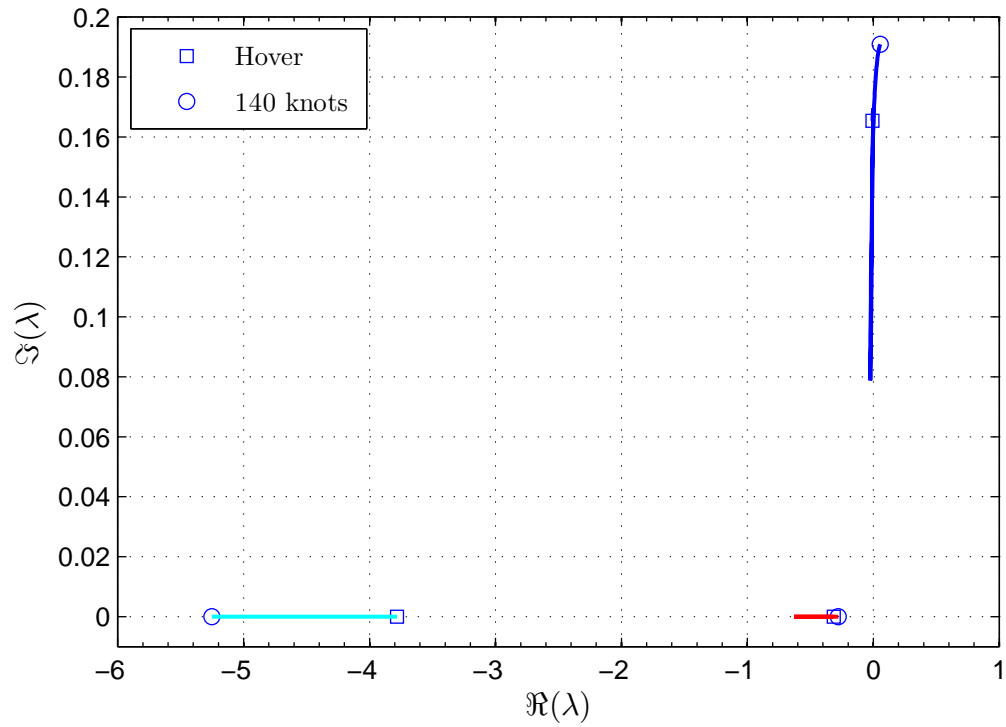


Figura 4.1: Evolución de los autovalores de la dinámica longitudinal desacoplada en función de la velocidad de avance.

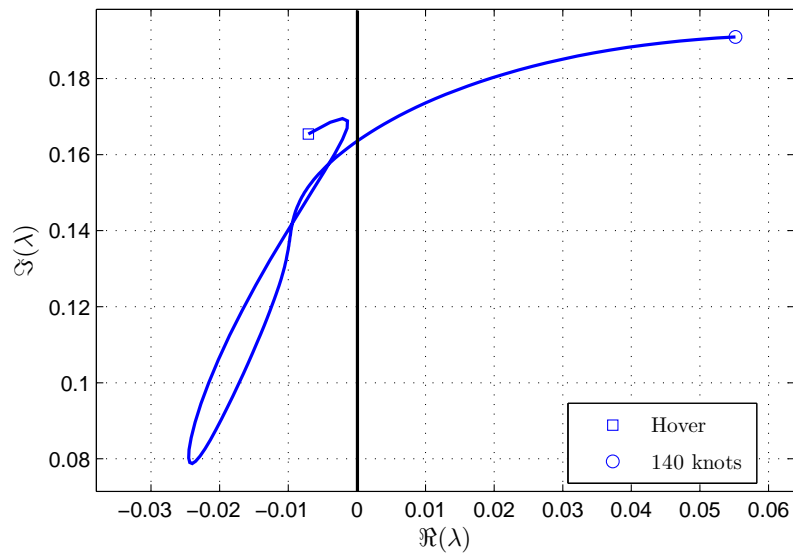


Figura 4.2: Evolución del autovalor correspondiente al modo phugoide en función de la velocidad de avance.

## 4.2. Estabilidad lateral-direccional

Procediendo de la misma forma que se ha descrito en el apartado anterior, a continuación se va a realizar un análisis del comportamiento lateral-direccional del helicóptero.

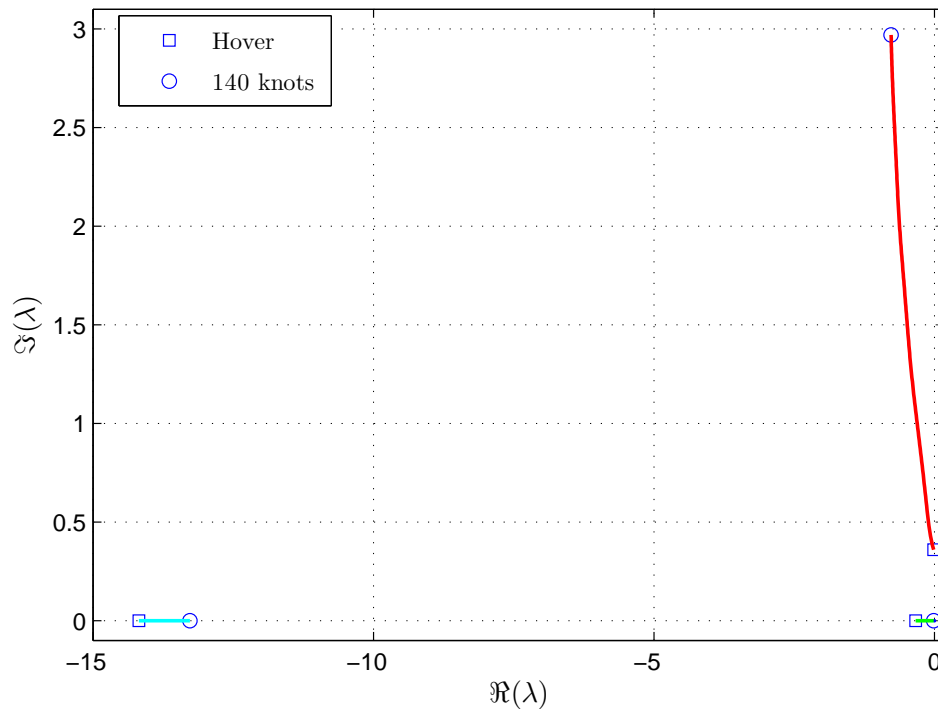


Figura 4.3: Evolución de los autovalores de la dinámica lateral-direccional desacoplada en función de la velocidad de avance.

A la vista de las figuras 4.3 y 4.4, se pueden identificar los modos típicos de comportamiento de un helicóptero. Se tienen en todos los casos un autovalor nulo, correspondiente a la estabilidad marginal que muestra la guiñada de la aeronave; un par de autovalores complejos conjugados, correspondientes al *Dutch Roll mode*; y dos autovalores reales, de los cuales el menor se identifica con el *Rolling Subsidence mode* y el mayor con el *Spiral mode*.

También se aprecia cómo se está tratando con un helicóptero bastante estable desde el punto de vista lateral-direccional, ya que, a diferencia de lo que ocurre con muchos helicópteros el *Dutch roll mode* muestra ligera tendencia a alejarse del eje imaginario; a la vez que el *Spiral mode* no llega nunca a hacerse inestable en el rango de velocidades estudiadas.

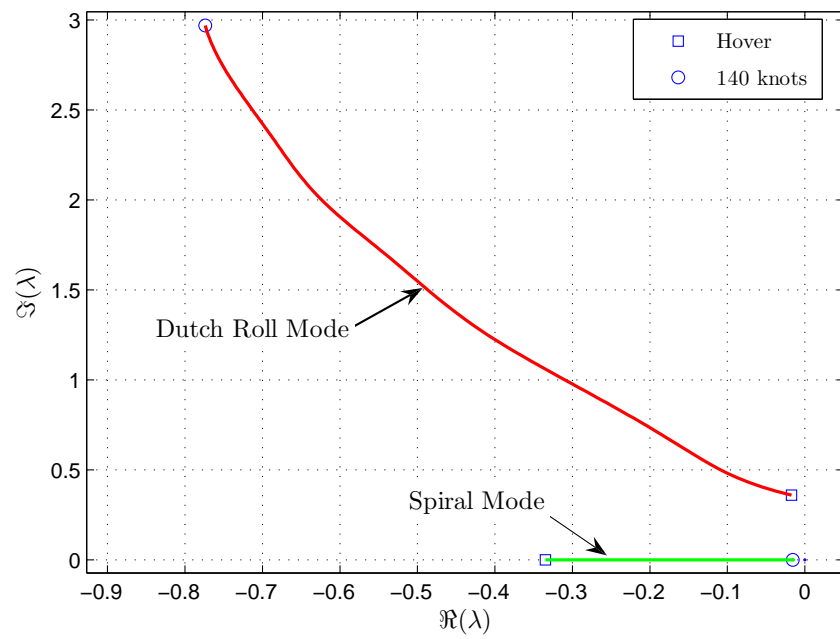


Figura 4.4: Ampliación de la figura 4.3

