

Progreso tecnológico, precios hedónicos y  
aprendizaje en la práctica: Una aplicación a los  
aviones de caza a reacción

TESIS DOCTORAL

Presentada por:

Anelí Bongers

Departamento de Teoría e Historia Económica  
Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales  
Universidad de Málaga

Director: José Luis Torres Chacón


Co-Director: Gonzalo Fernández de Córdoba Martos

Septiembre 2015



Publicaciones y  
Divulgación Científica

AUTOR: Anelí Bongers Chicano

 <http://orcid.org/0000-0002-4063-2585>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): [riuma.uma.es](http://riuma.uma.es)

# Indice

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>10</b>
1.1	Estructura de la Tesis . . . . .	12
<b>2</b>	<b>Medición del cambio tecnológico en los aviones de caza a reacción de los Estados Unidos: Un enfoque de precios hedónicos</b>	<b>15</b>
2.1	Introducción . . . . .	15
2.2	Breve historia de los aviones de caza a reacción de los EE.UU. . . . .	24
2.3	Medición del cambio tecnológico: El enfoque de precios hedónicos . . . . .	31
2.4	Datos y variables . . . . .	40
2.5	Estimación de los precios hedónicos . . . . .	47
2.6	Discusión de los resultados . . . . .	53
2.7	Conclusiones . . . . .	56
2.8	Apéndice A.1: Descripción de los datos . . . . .	58
2.9	Apéndice A.2: Residuos del modelo (sobreevaluación o infravaloración estimada en el precio de cada aparato) . . . . .	61
<b>3</b>	<b>Tendencias tecnológicas en los aviones de caza a reacción: Una comparación entre los cazas de Estados Unidos y de la Unión Soviética/Rusia</b>	<b>64</b>
3.1	Introducción . . . . .	64
3.2	Medición de la tecnología en los aviones de caza a reacción . . . . .	70
3.3	Datos y variables . . . . .	74

3.4	Estimación de la tendencia tecnológica . . . . .	84
3.5	Discusión de los resultados . . . . .	90
3.6	Conclusiones . . . . .	98
<b>4</b>	<b>La curva de aprendizaje y el precio de los aviones de caza</b>	<b>104</b>
4.1	Introducción . . . . .	104
4.2	La curva de aprendizaje . . . . .	111
4.3	La persistencia del aprendizaje y el olvido organizacional . . . . .	117
4.4	Breve revisión de la literatura empírica . . . . .	119
4.5	Datos y variables . . . . .	125
4.5.1	Datos discretos: Lotes . . . . .	127
4.6	Resultados . . . . .	129
4.7	Discusión de los resultados . . . . .	135
4.8	Conclusiones . . . . .	138
<b>5</b>	<b>Consideraciones finales</b>	<b>140</b>

# Indice de Tablas

# Indice de Figuras

2.1	Lockheed P/F-80A Shooting Star . . . . .	26
2.2	Lockheed Martin F-35 Lightning II . . . . .	32
3.1	F-86A Sabre versus MiG-15 . . . . .	82
3.2	El North American F-86 Sabre . . . . .	84
3.3	El Mikoyan-Gurevich MiG-15 . . . . .	85
4.1	Curvas de aprendizaje o de progreso . . . . .	115

A la memoria de mi padre, "Pombo"

# Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis directores de tesis, José Luis Torres Chacón y Gonzalo Fernández de Córdoba Martos, por su labor de guía y dedicación, así como por sus comentarios, sugerencias y el apoyo que me han brindado, de los que tanto he aprendido durante estos últimos años. Ha sido una gran suerte contar con ellos en la dirección de mi Tesis Doctoral. La génesis, aunque lejana, de la presente Tesis Doctoral parte de mi interés por el estudio del progreso tecnológico como motor del desarrollo, tema al que dediqué mi Tesina de Máster, analizando la importancia de los factores tecnológicos a la hora de explicar el crecimiento económico mundial. En dicha Tesina de Máster, de la cual también fue mi director el profesor José Luis Torres, se cuantifica la aportación de la acumulación de factores productivos y del progreso tecnológico al crecimiento de la producción per cápita, para más de 100 países del mundo y para el periodo 1977-2007, mostrándose que es el progreso tecnológico, y no las variaciones en las cantidades de factores productivos, el principal factor explicativo de las diferencias observadas en el crecimiento económico entre los diferentes países. El adentrarme en la realización de la Tesis Doctoral viene motivada por mi incorporación al Departamento de Teoría e Historia Económica de la Universidad de Málaga como profesora sustituta interina.

A partir del trabajo anterior, nuestro objetivo era continuar con en análisis del progreso tecnológico, pero desde una perspectiva menos agregada. En este punto, nuestro interés se dirigió a los aviones de caza a reacción, dada la importante carga tecnológica que incorporan, la complejidad del producto al incorporar muchos sistemas diferentes en un mismo equipo final, su importancia en los esquemas de



defensa actuales y al progreso continuo que experimentan este tipo de aviones que los sitúan en la frontera tecnológica. Desde el principio, el tema elegido resultó apasionante, aumentando su interés a medida que comenzábamos a profundizar en las implicaciones tecnológicas del diseño, desarrollo y puesta en funcionamiento de estos aviones a lo largo del tiempo.

No quisiera finalizar sin mencionar a mi familia, principalmente a mis hijos Carla y Urian, a los cuales les he robado un tiempo precioso.

# Resumen

La presente Tesis Doctoral tiene como objetivo estudiar diferentes aspectos en relación al progreso tecnológico y al coste de adquisición de los aviones de caza a reacción. La Tesis Doctoral está formada por tres capítulos fundamentales, al margen del capítulo de introducción y del capítulo de conclusiones finales. Estos tres capítulos tienen como objetivo fundamental la medición del progreso tecnológico en los aviones de caza a reacción desde diferentes perspectivas y usando diferentes aproximaciones. Los aviones de caza constituyen uno de los equipos más complejos y más avanzados tecnológicamente que existen en la actualidad. Además, resulta indudable que cualitativamente han experimentado importantes cambios tecnológicos desde su invención hasta nuestros días, siendo uno de los aparatos mayor complejidad tecnológica y que mayor carga tecnología incorporan en la actualidad. El objetivo de esta Tesis es precisamente cuantificar, desde diversos puntos de vista, la importancia del cambio tecnológico en los aviones de combate tipo "caza" a reacción desarrollados a partir de 1944 hasta la actualidad, y las implicaciones de dicho progreso tecnológico, que tiene importantes repercusiones tanto para la industria como para los gobiernos, que son los demandantes y usuarios de estos equipos.

En el segundo capítulo se lleva a cabo una medición cuantitativa del cambio tecnológico en los aviones de combate de caza a través de la estimación de los precios hedónicos de las diferentes características técnicas y operativas de estos equipos. El método de precios hedónicos ha adquirido una gran relevancia durante los últimos años, dado que permite corregir los errores de medición en los precios de los bienes

debido al cambio tecnológico. En este capítulo utilizamos este enfoque para medir en términos cuantitativos el cambio tecnológico en los aviones de combate a reacción de caza de los Estados Unidos, desde el año 1944 hasta el presente. Las características, tanto técnicas como de funcionamiento de los aviones de combate a reacción han experimentado un gran cambio desde que el primer modelo fuese desarrollado a principios de la década de 1940 respecto a los actuales desarrollos de principios del siglo XXI. De forma paralela a este cambio tecnológico se ha producido una muy importante escalada en el precio de las nuevas generaciones de aviones respecto a las anteriores. Así, mientras que los primeros aviones de caza a reacción tenían un precio en torno a los 100.000 dólares (en dólares corrientes de 1944), los últimos modelos casi alcanzan los 200 millones dólares (en dólares corrientes de 2012), lo que supone, en términos nominales, 2.000 veces más. Sin embargo, hemos de tener en cuenta que este producto ha experimentado importantes cambios tecnológicos a lo largo del tiempo, que han aumentado de forma significativa sus capacidades. Basta comparar las capacidades operativas del F-22 Raptor con el primer avión de caza a reacción operativo, desarrollado en 1944.

El progreso tecnológico constituye uno de los problemas más importantes para medir el cambio en los precios de los bienes. Esto es debido a que el progreso tecnológico hace que los bienes no sean homogéneos a lo largo del tiempo, por lo que variaciones en su precio pueden resultar consecuencia de cambios en sus atributos. Por otra parte, el precio de los aviones de caza a reacción ha ido aumentando de forma muy significativa a lo largo del tiempo. Quizás la afirmación que más repercusión ha tenido en la literatura sea la realizada por

El tercer capítulo se centra en el análisis de tendencias tecnológicas en los aviones de caza a reacción, realizando una comparación entre los Estados Unidos y la Unión Soviética/Rusia. Sin duda, uno de los objetivos para medir el progreso y nivel tecnológico es comparar diferentes productos con objeto de determinar qué producto está más avanzado. En el caso de los bienes de equipo militar resulta vital comparar la capacidad y características técnicas de estos equipos con los de

los enemigos potenciales, dado que en caso de conflicto el resultado viene en gran medida determinado por la calidad de los equipos utilizados. Para realizar esta comparación se requiere obtener una medida de la tendencia tecnológica de una determinada industria, lo que permite determinar la posición de cada equipo o producto respecto a la misma. El análisis realizado nos permite situar, a cada modelo de caza en particular, respecto a la tendencia tecnológica general, por lo que nos permite calificar a cada modelo como un avión adelantado o retrasado respecto al estándar de la industria en el momento en el que realizó su primer vuelo.

El cuarto capítulo tiene como objetivo la aplicación de la denominada curva de aprendizaje al precio de los aviones de caza más recientes fabricados en los Estados Unidos. La curva de aprendizaje se ha convertido en un instrumento de gran importancia para analizar la evolución de los costes de producción de un determinado equipo en función de la cantidad producida del mismo. Así, en una gran cantidad de industrias se ha observado que a medida que aumenta la producción acumulada, disminuyen los costes unitarios de producción. Este fenómeno está asociado al aprendizaje en la práctica por parte de los trabajadores y de la propia organización productiva.

La presente Tesis Doctoral finaliza con un capítulo de conclusiones generales, donde se recogen, de forma conjunta, los principales resultados encontrados en los capítulos anteriores y sus implicaciones tanto desde el punto de vista económico como desde el punto de vista de la defensa.

# Abstract

This thesis studies some issues relating to technological progress and price for the jet fighter aircraft industry. Chapter 1 contains a general introduction to the topic studied in this PhD Thesis. Technological progress is the main factor explaining economic growth. Furthermore, in macroeconomics models, balanced growth path for all variables related with output depends on the rate of technological progress.

Chapter 2 quantitatively measures technological change in U.S. jet fighter aircraft from 1944 to the present day using the hedonic pricing approach. The technical and performance characteristics of jet fighters have changed dramatically between the time they were first developed at the beginning of the 1940s and the present. Parallel to this technological change there has been a sharp escalation in costs regarding the new generations of jet fighter aircraft. In this chapter we estimate a measure of price for the performance and technical characteristics of these aircraft. Embodied technological change in jet fighter airframes is measured using quality-adjusted prices. Although the flyaway cost of jet fighter aircraft has soared, on average, by about 12.63 percent per year, the quality-adjusted aircraft cost has only risen by about 2.6 percent per year, a figure lower than the average observed general inflation rate for the period (around 4 percent). This represents an impressive average technological progress ratio of around 10 percent per year. A revealed preferences argument shows that the characteristic most valued by the government is stealth capability, followed by advanced avionics.

Chapter 3 measures and compares technological trends in U.S. and Soviet Union/Russia jet fighter aircraft by estimating the relationship between the first

flight date and a set of performance and technical characteristics of these aircraft. Measuring and forecasting technological change is a crucial issue from various points of view. This is particularly important in the case of weapon systems as this would enable technological performance and operational capabilities to be assessed in relation to potential threats. From the point of view of technological advantage, we find that U.S. jet fighters were, on average, approximately 2 years ahead of the former Soviet Union/Russia jet fighters during the entire jet fighter era. Nevertheless, the technological advantage has swung from one side to the other during specific periods as particular models have been introduced. Finally, the development of 5th-generation jet fighters and, in particular, the development of the F-22 Raptor, has placed American technology about 20 years ahead of Russian technology, a difference that has never occurred before. This finding casts doubt on the ability of Russia, as the inheritor of the former Soviet Union aircraft industry, to match American technological progress in jet fighter aircraft.

Chapter 4 estimates learning and forgetting processes for the production of modern jet fighter aircraft. Final cost of fighter aircraft depends on three factors: Quality, average sunk costs and learning-by-doing, the last two related to the total number of units produced. Learning curves are estimated for the flyaway cost of three fighter aircraft models: the F/A-18E/F Super Hornet, the F-22A Raptor and the F-35A Lightning II.

Finally, Chapter 5 presents some general conclusions

# Capítulo 1

## Introducción

El progreso tecnológico constituye un elemento fundamental para el desarrollo económico y social, siendo una de las fuentes más importantes del crecimiento de la producción en el largo plazo y del aumento en el bienestar social. Aunque parte del crecimiento económico viene explicado por la acumulación de factores productivos, tanto en términos de fuerza de trabajo como de capital físico, es generalmente aceptado que el motor fundamental del crecimiento económico reside en el progreso tecnológico, que implica un desplazamiento continuo de la frontera de posibilidades de producción de la economía hacia niveles de producción, dadas unas dotaciones de factores productivos, más elevados. Así, el intenso crecimiento de la producción que han experimentado las economías desarrolladas principalmente durante el último siglo, solo viene explicado en un porcentaje reducido por la acumulación de factores productivos, siendo en su mayor parte consecuencia del progreso tecnológico.

Este proceso de progreso tecnológico ha sido particularmente intenso durante el último siglo y ha permitido aumentar tanto la calidad como el número de equipos y bienes disponibles. Una de las características principales del progreso tecnológico consiste en la creación de equipos y productos que no existían anteriormente con capacidades nuevas o superiores a las previamente existentes. Esto se aprecia fundamentalmente en el desarrollo de sectores como la electrónica, la generación de energía, telecomunicaciones, sector aeroespacial, etc. En todos estos sectores

no solo ha aumentado la calidad de los productos, en términos de sus capacidades operativas, sino que se han creado nuevos productos inexistentes anteriormente y con nuevas capacidades.

Desde un punto de vista estrictamente económico, el progreso tecnológico puede ser definido como el fondo social de conocimientos acerca de las artes productivas. Este proceso tecnológico puede ser específico a los factores productivos, es decir, venir incorporado en los mismos, tanto en lo que respecta al capital físico como al factor empleo, o bien puede ser general al sistema productivo, a lo que se ha denominado progreso tecnológico neutral. En el caso concreto de los aviones de caza a reacción, una mejora tecnológica puede marcar la diferencia con respecto a aeronaves de otros competidores.....

El progreso tecnológico juega un papel fundamental a la hora de explicar el comportamiento de una economía a nivel agregado y de su evolución a lo largo del tiempo. El trabajo pionero es Solow (1957), que muestra la importancia de la Productividad Total de los Factores, que representa al progreso tecnológico neutral, a la hora de explicar el crecimiento económico.

En el ámbito de la defensa nacional, la tecnología de los equipos disponibles en relación a la tecnología de los equipos de los potenciales enemigos, juega un papel fundamental en las posibilidades de victoria ante un agresión.

Desde el primer caza a reacción operacional en el mundo, el Messerschmitt Me-262, hasta el último desarrollo, el F-35 Lightning II, las especificaciones técnicas y operativas de estos equipos militares han sufrido una importante transformación.

Desde la primera aplicación militar de la aeronáutica, se produjo un cambio radical en el modo de ir a combate. La Primera Guerra Mundial vio el nacimiento de nuevos equipos militares, en su mayoría avances y nuevos desarrollos de otros ya existentes con anterioridad, pero también dió lugar al nacimiento de nuevos equipos militares totalmente nuevos e inexistentes con anterioridad, que representaban importantes cambios.

La etapa de guerra fría entre los Estados Unidos y la Unión Soviética contribuyó



de manera determinante al desarrollo tecnológico de los aviones de combate tácticos, a los que se les consideraba como herramienta fundamental para garantizar la superioridad aérea.

El aumento en los costes durante las fases de desarrollo de estos equipos ha llevado a una reducción paulatina a lo largo del tiempo en el número de modelos desarrollados y en las cantidades producidas de cada modelo. Lejos quedan los años 50 y 60 del siglo pasado en los cuales se desarrollaban un muy elevado número de modelos por parte de la industria aeronáutica, al tiempo que las cantidades producidas de cada modelo eran muy elevadas en comparación con las actuales.

La complejidad tecnológica de los aviones de caza también ha afectado a los tiempos entre el diseño y desarrollo de un modelo particular y su entrada en fase operativa.

En esta Tesis Doctoral estudiamos, usando diferentes técnicas, la importancia del fenómeno del progreso tecnológico, centrándonos en el caso particular de los aviones de combate. Los aviones de caza constituyen sin ningún género de duda uno de los productos más complejos y más avanzados tecnológicamente que existen en la práctica. Además, resulta indudable que cualitativamente han experimentado importantes cambios tecnológicos desde su invención hasta nuestros días, siendo uno de los aparatos mayor complejidad tecnológica y que mayor carga tecnología incorporan en la actualidad. El objetivo de esta Tesis es precisamente cuantificar, desde diversos puntos de vista, la importancia del cambio tecnológico en los aviones de combate tipo "caza" a reacción desarrollados a partir de 1944 hasta la actualidad, y las implicaciones de dicho progreso tecnológico ha tenido en la industria y para los gobiernos, que son los demandantes y usuarios de estos equipos.

## 1.1 Estructura de la Tesis

La presente Tesis Doctoral está formada por tres capítulos fundamentales, al margen del capítulo de introducción y del capítulo de conclusiones finales. Estos tres

capítulos tienen como objetivo fundamental la medición del progreso tecnológico en los aviones de caza a reacción desde diferentes perspectivas y usando diferentes aproximaciones. En el segundo capítulo se lleva a cabo una medición cuantitativa del cambio tecnológico en los aviones de combate de caza usando el modelo de precios hedónicos. El método de precios hedónicos ha adquirido una gran relevancia durante los últimos años, dado que permite corregir los errores de medición en los precios de los bienes debido al cambio tecnológico. En este capítulo utilizamos este enfoque para medir en términos cuantitativos el cambio tecnológico en los aviones de combate a reacción de caza de los Estados Unidos, desde el año 1944 hasta el presente.

Las características, tanto técnicas como de funcionamiento de los aviones de combate a reacción han experimentado un gran cambio desde que el primer modelo fuese desarrollado a principios de la década de 1940 respecto a los actuales desarrollos de principios del siglo XXI. De forma paralela a este cambio tecnológico se ha producido una muy importante escalada en el precio de las nuevas generaciones de aviones respecto a las anteriores. Así, mientras que los primeros aviones de caza a reacción tenían un precio en torno a los 100.000 dólares (en dólares corrientes de 1944), los últimos modelos casi alcanzan los 200 millones dólares (en dólares corrientes de 2012), lo que supone, en términos nominales, 2.000 veces más. Sin embargo, hemos de tener en cuenta que este producto ha experimentado importantes cambios tecnológicos a lo largo del tiempo, que han aumentado de forma significativa sus capacidades. Basta comparar las capacidades operativas del F-22 Raptor con el primer avión de caza a reacción operativo (F-80 Shooting Star), desarrollado en 1944.

El progreso tecnológico constituye uno de los problemas más importantes para medir el cambio en los precios de los bienes. Esto es debido a que el progreso tecnológico hace que los bienes no sean homogéneos a lo largo del tiempo, por lo que variaciones en su precio pueden resultar consecuencia de cambios en sus atributos.

El tercer capítulo se centra en el análisis de tendencias tecnológicas en los aviones

de caza a reacción, realizando una comparación entre los Estados Unidos y la Unión Soviética/Rusia. Sin duda, uno de los objetivos para medir el progreso y nivel tecnológico es comparar diferentes productos con objeto de determinar qué producto está más avanzado. En el caso de los bienes de equipo militar resulta vital comparar la capacidad y características técnicas de estos equipos con los de los enemigos potenciales, dado que en caso de conflicto el resultado viene en gran medida determinado por la calidad de los equipos utilizados. Para realizar esta comparación se requiere obtener una medida de la tendencia tecnológica de una determinada industria, lo que permite determinar la posición de cada equipo o producto respecto a la misma. El análisis realizado nos permite situar, a cada modelo de caza en particular, respecto a la tendencia tecnológica general, por lo que nos permite calificar a cada modelo como un avión adelantado o retrasado respecto al estándar de la industria en el momento en el que realizó su primer vuelo.

El cuarto capítulo tiene como objetivo la aplicación de la denominada curva de aprendizaje al precio de los aviones de caza más recientes fabricados en los Estados Unidos. La curva de aprendizaje se ha convertido en un instrumento de gran importancia para analizar la evolución de los costes de producción de un determinado equipo en función de la cantidad producida del mismo. Así, en una gran cantidad de industrias se ha observado que a medida que aumenta la producción acumulada, disminuyen los costes unitarios de producción. Este fenómeno está asociado al aprendizaje en la práctica por parte de los trabajadores y de la propia organización productiva.

Por otra parte, la curva de aprendizaje o experiencia juega un papel central a la hora de determinar el coste de adquisición de los aviones de caza.

La presente Tesis Doctoral finaliza con un capítulo de conclusiones generales, donde se recogen, de forma conjunta, los principales resultados encontrados en los capítulos anteriores y sus implicaciones tanto desde el punto de vista económico como desde el punto de vista de la defensa.

# Capítulo 2

## Medición del cambio tecnológico en los aviones de caza a reacción de los Estados Unidos: Un enfoque de precios hedónicos

### 2.1 Introducción

Desde el final de la Segunda Guerra Mundial, el progreso tecnológico ha sido un elemento clave para explicar el crecimiento económico de los países desarrollados, dicho fenómeno ha dado lugar un proceso de aumento en el nivel de vida, posibilitando la creación e introducción de nuevos productos, y aumentando el rendimiento, así como la capacidad de generación de servicios de los bienes y equipos a lo largo del tiempo.<sup>1</sup> Este avance tecnológico ha sido particularmente importante en los bienes de equipo y, especialmente, en algunos productos como los equipos electrónicos, equipos informáticos, las telecomunicaciones, vehículos de transporte,

---

<sup>1</sup>Una versión de este capítulo con el título "Technological change in the U.S. jet fighter aircraft" ha sido publicado en *Research Policy*, 43, 1570-1581, (2014).

etc. Este importante progreso tecnológico no solo ha permitido aumentar los niveles de renta per cápita sino también aumentar la calidad y la esperanza de vida en la mayoría de países gracias a la disponibilidad de bienes y equipos más avanzados tecnológicamente, que a su vez se ha propiciado la introducción de bienes y equipos nuevos, no existentes con anterioridad. Este avance tecnológico incorporado en los bienes de equipo está directamente relacionado con el precio final de los mismos. En algunos casos, nos encontramos con equipos cuyos precios aumentan de manera muy significativa con el tiempo, lo que viene explicado en parte por la mayor carga tecnológica incorporada y los mayores servicios generados, mientras que en otros casos, observamos equipos cuyos precios incluso disminuyen, signo de la existencia de una tasa muy elevada de progreso tecnológico.

Un aspecto de gran relevancia desde el punto de vista económico, pero también desde el punto de vista estratégico para los gobiernos y los responsables de defensa, se refiere a cómo los precios de los bienes y equipos militares ha evolucionado en el tiempo. Tanto para los estadísticos como para los economistas, la medición correcta de los precios plantea un serio problema, dado que no se conoce en términos cuantitativos cómo los cambios a lo largo del tiempo en el precio observado de estos bienes y equipos están reflejando la incorporación de mejoras técnicas y aumentos en las capacidades operativas y/o funcionales. Dicho de otro modo, el cambio tecnológico hace que varíen las propiedades de un determinado bien o equipo, lo que provoca que dichos bienes o equipos no sean homogéneos en sus diferentes generaciones, dificultando su comparación en términos de la evolución de su precio a lo largo del tiempo. Dos de los bienes que han recibido una mayor atención en este sentido por parte de la literatura empírica son los equipos informáticos y los automóviles. Estos dos bienes, por ejemplo, no son homogéneos en el tiempo, dado que sus características técnicas y su rendimiento mejoran a medida que aparecen nuevas generaciones de estos productos con mayor carga tecnológica, y por lo tanto, sus precios no son directamente comparables. Resulta evidente que un automóvil de principios del siglo XXI no es igual que un automóvil de 20 o 30 años antes,

aunque lo consideramos el mismo bien a pesar de presentar diferentes niveles de calidad. Lo mismo sucede, por ejemplo, con un ordenador. El progreso y evolución en las especificaciones de estos bienes se traduce en cambios en las características determinantes del precio de los mismos. Para medir correctamente los cambios de precios de un producto, es necesario en primer lugar medir el cambio tecnológico implícito que afecta a la calidad del producto, ya que solo índices de precios ajustados por la calidad puede ser directamente comparables en el tiempo.

El objetivo de este capítulo es medir, cuantitativamente, los cambios tecnológicos en la industria de los aviones de caza a reacción diseñados y fabricados en los Estados Unidos, desde el primer avión de caza a reacción operativo, cuyo primer vuelo tuvo lugar en 1944, hasta los últimos aviones de caza desarrollados en los primeros años del siglo XXI. La cuantificación del cambio tecnológico en los aviones de caza a reacción resulta de interés por diferentes motivos. En primer lugar, los aviones de caza representan un producto altamente complejo y en el cual se introducen los últimos avances tecnológicos disponibles, representando una industria donde los cambios tecnológicos se suceden de forma continuada en el tiempo. Muchos de estos avances tecnológicos se trasladan a la industria aeronáutica civil, aunque con un retraso temporal, por lo que si estamos interesados en medir el progreso tecnológico y la frontera tecnológica en esta industria, indudablemente la rama militar es la más adecuada para ello. En segundo lugar, el precio de los aviones de combate ha aumentado de forma muy significativa a lo largo del tiempo, lo que disminuye la capacidad de los diferentes gobiernos para sustituir aparatos antiguos y obsoletos, o que se encuentran al final de su vida operativa, por cazas más modernos, por lo que resulta de gran interés estudiar qué parte de dicho aumento en los precios obedece directamente al aumento en la calidad de los aviones. Por último, desde el punto de vista de la defensa, los aviones de caza juegan un papel fundamental para garantizar la superioridad aérea, influyendo de manera decisiva en el resultado de los conflictos y en garantizar la seguridad nacional.

La medición del cambio tecnológico es un tema de gran interés desde una variedad

de puntos de vista. En particular, nuestro análisis tiene implicaciones significativas para los analistas de aviación militar, los responsables políticos de los gobiernos y, por supuesto, para la propia industria aeronáutica. Todos estos agentes están preocupados por la cantidad y calidad de los aviones de caza para hacer frente a las amenazas potenciales que puedan existir, así como para garantizar la superioridad aérea en caso de conflicto. En particular, nuestro análisis se puede utilizar para predecir, dadas unas determinadas características técnicas y de operatividad, cuál sería el precio de un determinado avión de caza, así como estimar el número total de aeronaves dentro de las especificaciones requeridas que pueden ser adquiridos dadas unas limitaciones presupuestarias. Desde el punto de vista económico, la medición del cambio tecnológico es importante al menos por dos razones. En primer lugar, el progreso tecnológico es el proceso clave que impulsa el crecimiento económico en el largo plazo. En segundo lugar, el progreso tecnológico es uno de los principales problemas para medir correctamente los cambios de precios y, por tanto, el crecimiento del producto en términos reales.

El avance tecnológico incorporado en los aviones caza a reacción ha ido en paralelo a un espectacular aumento en el precio de estos bienes de equipo en particular. De hecho, el coste unitario (medido a través del denominado *flyaway cost*, que refleja el coste de producción de cada unidad) de los aviones de caza a reacción de los Estados Unidos ha aumentado a una tasa media del 13 por ciento por año, desde el primer caza a reacción operativo en el año 1944, hasta la fecha actual. Kirkpatrick (2004) presenta cifras similares para el caso de los aviones de combate tácticos en el Reino Unido. En este contexto, una declaración bien conocida en la industria aeronáutica militar es la realizada por Augustine (1987). Norman Augustine (ex presidente y director de operaciones de Martin Marietta Corporation, una de las empresas del entramado industrial aeronáutico de los Estados Unidos y, por tanto, profundo conocedor de la industria), afirmó que "*en el año 2054, la totalidad del presupuesto de defensa de los Estados Unidos se dedicará a la compra de un solo avión de combate táctico. Este avión tendrá que ser compartido por*

*la Fuerza Aérea y la Armada, a razón de 3,5 días para cada uno por semana, a excepción de los años bisiestos, cuando se pondrá a disposición de la Infantería de Marina durante el día extra".*

Desde el punto de vista de los gobiernos, este aumento en los costes de los aviones de caza a lo largo del tiempo tiene consecuencias importantes con respecto a la sustitución de los aviones de caza ya obsoletos o que han finalizado su vida operativa, por nuevos modelos. Un ejemplo reciente lo tenemos en el número de F-22 Raptor adquiridos por la Fuerza Aérea de los EE.UU., USAF, (menos de 200 unidades), debido al alto coste por unidad, una cantidad mucho menor que el número de aviones de combate actualmente operativos y que deberían haber sido reemplazados por este modelo y muy alejados del número de aviones que inicialmente tenía previsto adquirir la USAF (superior a las 700 unidades). En este contexto, resulta de gran importancia la comparación entre el rendimiento operativo de los nuevos aviones de caza con su coste, básicamente para determinar la tasa de reposición necesaria para mantener las capacidades defensivas. Desde un punto de vista estadístico, el progreso tecnológico ha exacerbado los problemas que surgen en la medición de los "verdaderos" cambios en los precios, lo que dificulta la comparación a lo largo del tiempo en el coste de un determinado equipo. Esto es especialmente importante en algunos sectores que muestran un rápido cambio tecnológico, como es el caso de nuestro objeto de estudio. En este contexto, tanto los avances tecnológicos como de los cambios de precios resultan ser fenómenos interdependientes, por lo que para su correcta medición primero hemos de tener en cuenta los problemas relacionados con los cambios en la calidad de los equipos a lo largo del tiempo.

Pero este problema no es nuevo ni específico a los aviones de caza. Tal y como Hartley (2010) señala, la continua escalada en el coste de las nuevas generaciones de equipos de defensa ha sido muy persistente en el tiempo y entre países. Pugh (2007) llega a conclusiones similares para el caso de la industria aeroespacial del Reino Unido. Ziemer y Kelly (1993) estudian la evolución de los precios de los aviones a reacción, los cuales se ven afectados por una serie de factores, como el



número de unidades producidas, la tasa de producción, la curva de aprendizaje o diferencias de precio debidas a diferencias entre empresas productoras. Arena *et al.* (2008) estudian el aumento de precios para los aviones militares de todo tipo para los Estados Unidos, mostrando que el aumento en el precio de estas aeronaves ha superado al de los índices de inflación, medidos a través del Índice de Precios al Consumidor (IPC), el deflactor del Producto Interno Bruto, y el deflactor del Departamento de Defensa (DoD) para la adquisición de equipos. Estos aumentos de precios tiene implicaciones directas en el número de aeronaves que el DoD puede adquirir y, por tanto, en su capacidad de defensa aérea. Estos autores consideran dos causas diferentes que explican la escalada de precios: factores por el lado de la oferta, tales como los costes de la mano de obra, costes de las materias primas, costes de equipos de fabricación, etc., y factores por el lado de la demanda, fundamentalmente los requerimientos y especificaciones técnicas y operativas fijados por el gobierno.

En la literatura relacionada encontramos varios enfoques alternativos para medir el cambio tecnológico. En el caso particular de la industria de aviones de combate a reacción, el método más utilizado es el procedimiento desarrollado por Alexander y Nelson (1973), que consiste en la estimación de una regresión múltiple con un conjunto de características técnicas y de funcionamiento de un equipo como variables explicativas, y el tiempo de aparición del dispositivo, como la variable dependiente, que se supone es una proxy del nivel tecnológico alcanzado. Sin embargo, este enfoque no mide cuantitativamente el cambio tecnológico, sino que determina la posición de cada equipo respecto a la tendencia tecnológica estimada, determinando si dicho equipo está adelantado o retrasado respecto al nivel tecnológico alcanzado en el momento de su disponibilidad, método que utilizaremos en el siguiente capítulo. Un enfoque alternativo, que es el utilizado en este capítulo, consiste en la construcción de un índice de precios ajustado por la calidad a través del denominado método de precios hedónicos. Este método consiste en estimar un modelo econométrico que relaciona el precio de un producto con el conjunto de sus características tanto técnicas como operacionales. El enfoque hedónico moderno se

basa en los desarrollos teóricos realizados por Lancaster (1966) y Rosen (1974), y tiene como fundamento principal el supuesto de que el precio final de un bien o equipo puede describirse como una función de su vector de características. Este enfoque ha sido aplicado de forma extensa a una gran variedad de productos, tales como ordenadores, automóviles, etc., con el objeto de obtener una medida cuantitativa del progreso tecnológico incorporado en estos equipos.

En la literatura existen relativamente pocos trabajos que estudien dicho cambio en la industria de aviones de combate a reacción. El primer intento de medir el progreso tecnológico en los aviones de combate a reacción es el estudio realizado por Stanley y Miller (1979). Stanley y Miller (1979) aplicaron el enfoque desarrollado por Alexander y Nelson (1973) de regresión del tiempo de aparición de cada modelo para medir las variaciones en la tecnología en los aviones de combate, método que fue inicialmente aplicado a los motores a reacción. Para ello consideran un total de 39 aviones de caza a reacción fabricados por los Estados Unidos durante el período 1944-1979. Dicho análisis también lo aplican a un conjunto de 13 aviones de combate soviéticos con el fin de comparar el progreso tecnológico alcanzado por los dos países. El resultado más relevante que obtienen es que ni los EE.UU. ni la Unión Soviética han presentado una ventaja dominante a largo plazo respecto a la tecnología alcanzada por los aviones de caza. Sólo a mediados de la década de 1950, los EE.UU. han disfrutado de una breve ventaja gracias al desarrollo de las aeronaves que conformaron la Serie Centenaria (F-100 a F-106). Los resultados obtenidos por Alexander y Nelson (1973) también sugieren una disminución en la tasa de mejora en la tecnología básica de los aviones de caza a reacción a lo largo del tiempo. En concreto, calculan que podría tomar de dos a cinco veces más tiempo hacer una mejora absoluta de un avión como el F-15 de forma que se alcance un rendimiento comparable a la mejora existente entre el F-4 y el F-15. Martino (1993) también estudia el cambio tecnológico en los aviones de caza de los Estados Unidos para el periodo 1944-1982, utilizando dos enfoques alternativos: el modelo de puntuación (*scoring model*) y el método de regresión múltiple del

tiempo de aparición desarrollado por Alexander y Nelson (1973). Más recientemente, Inman *et al.* (1996), utilizando datos de Martino (1993), aplican el análisis DEA (*Data Envelopment Analysis, Análisis de Datos Envolverte o Método Frontera*) para predecir el primer vuelo del avión de combate para el período 1960-1982, obteniendo resultados muy similares a los anteriores.

En este capítulo vamos a medir el progreso tecnológico en los aviones de caza a reacción utilizando un enfoque alternativo, mediante el cálculo de precios hedónicos. La principal ventaja de este enfoque es que podemos medir cuantitativamente los cambios tecnológicos y al mismo tiempo obtener una medición correcta del incremento verdadero en el precio de los aviones caza a reacción, teniendo en cuenta las variaciones en la calidad de estos equipos. Este método nos permite descomponer el cambio observado en el precio de los aviones de combate a reacción en dos componentes: cambios en el precio debido a los cambios en las características (tanto técnicas como operativas) de estos equipos y cambios de precios que reflejan un mayor coste de producción de estos equipos, siempre teniendo en cuenta que las características van a mantenerse constantes. En el primer caso, el cambio en el precio estaría reflejando cambios en el nivel tecnológico, mientras que en el segundo caso, simplemente reflejarían un aumento en el precio del mismo. En este capítulo se adopta el punto de vista ampliamente aceptado en la literatura relacionada de que el cambio tecnológico se puede medir como una función del cambio de las prestaciones y las características técnicas de un determinado producto. La velocidad del cambio tecnológico se mide entonces como la diferencia entre la tasa de crecimiento del precio del dispositivo y la tasa de crecimiento del precio ajustado a la calidad de dicho dispositivo. En el análisis que realizamos en este capítulo, el precio de las aeronaves que utilizamos es el denominado coste *flyaway*, que refleja los costes de producción de cada aparato, correspondiente a la unidad fabricada número 100, con el objeto de tener en cuenta la curva de aprendizaje en la producción de este equipo, que implica importantes disminuciones en los costes de producción a medida que aumenta el número total de unidades producidas, tema que será tratado en mayor

profundidad en el capítulo cuarto.

Durante el período considerado 1944-2012, el coste unitario de producción de los aviones de caza de Estados Unidos se ha incrementado en promedio en torno a un 13 por ciento por año, medido en dólares corrientes, lo que supone que el coste por unidad de un avión de caza al final del periodo es en torno a 2.000 veces superior a un modelo de principios de la era de los cazas a reacción. Si dicha medida la realizamos en dólares constantes, utilizando un índice de precios como el índice de precios al consumo o el deflactor del PIB, el incremento en el precio de estos equipos también resulta muy significativo, evidenciado la existencia de una importante escalada en los precios, lo que ha dado pie a afirmaciones como la de Augustine (1987). Sin embargo, el análisis realizado muestra que el precio de los aviones de caza a reacción, ajustados por calidad, ha aumentado sólo un 2,5 por ciento por año en media, una cifra inferior a la inflación general promedio observada durante el período, de alrededor del 4 por ciento. Como resultado, la tasa de progreso tecnológico de los aviones de caza a reacción hasta la actualidad ha sido, en promedio, del 10 por ciento anual, dato que podemos considerar como muy elevado y cercano al progreso tecnológico estimado para los bienes de equipo de las tecnologías de la información y del conocimiento, que son considerados los equipos que presentan las tasas de cambio tecnológico más elevadas.

El estudio llevado a cabo en este capítulo tiene una gran cantidad de aplicaciones prácticas. En primer lugar, el análisis realizado permite realizar predicciones sobre cuál sería el precio de un avión que cumpla un determinado conjunto de especificaciones requeridas. En segundo lugar, puede utilizarse para calcular precios implícitos de las diferentes características técnicas y de operatividad, cuantificando por tanto la aportación de cada característica al precio final del aparato y, por tanto, podemos utilizar este análisis para predecir el precio que tendría un determinado modelo de caza dependiendo de las especificaciones requeridas. En tercer lugar, se puede utilizar para predecir el número de aeronaves con las especificaciones requeridas que pueden ser adquiridos dado el presupuesto disponible. Responder a

este conjunto de preguntas resulta crucial tanto para los gobiernos y los responsables de defensa como para la propia industria.

La estructura del resto del capítulo es el siguiente. En la sección 2 se revisa brevemente la historia de los aviones de caza a reacción de los EE.UU. incluidos en la base de datos construida para este análisis. La sección 3 describe el método de los precios hedónicos para medir el cambio tecnológico. La sección 4 muestra la base de datos y la selección de las variables de características que representan el nivel tecnológico de estos equipos. La sección 5 presenta los principales resultados obtenidos. Una discusión de los resultados y sus implicaciones se recogen en el epígrafe 6. Finalmente, en la sección 7 se presentan algunas conclusiones.

## **2.2 Breve historia de los aviones de caza a reacción de los EE.UU.**

Antes de pasar a la descripción general del enfoque de precios hedónicos y de la descripción de los datos utilizados, en esta sección procedemos a realizar una breve revisión de algunos de los hitos históricos en el campo de los aviones de caza a reacción diseñados y producidos por la industria aeronáutica de los Estados Unidos y que han sido incluidos en la base de datos construida a tal efecto, conteniendo principalmente aviones de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, (USAF), para los cuales se disponía de la información necesaria.<sup>2</sup>

Tradicionalmente, los aviones de combate de caza a reacción se clasifican y agrupan en cinco generaciones, aunque en algunos casos se utilizan otras

---

<sup>2</sup>Sólo unos pocos aviones de caza de la Marina de los Estados Unidos han podido ser incluidos en la base de datos, debido a la no disponibilidad de información acerca del precio de los mismos. En concreto, los aviones de la Marina para los cuales no se dispone de información al respecto y, por tanto, no incluidos en el estudio son los siguientes: PH-1 Phantom, FJ-1 Fury, F9F Panther, F7U Cutlass, F3D Skynight, F2H Banshee, F3H Demon, F-8 Crusader, F4D Skyray, F-11 Tiger y FJ-4 Fury.

clasificaciones.<sup>3</sup> La primera generación de aviones caza a reacción estaría compuesta por aquellos modelos desarrollados durante la década de 1940. El primer avión de combate a reacción que se diseñó en los EE.UU., fue el P-59A Airacomet, cuyo primer vuelo tuvo lugar el 1 de octubre de 1942. Sin embargo, aunque este avión estuvo disponible durante la II Guerra Mundial, sus pobres prestaciones, inferiores a los aviones entonces operativos de hélice, provocó que no participase en combate. Además, el número de unidades fabricadas de este modelo fue muy reducido. De la primera versión se fabricó en un número muy escaso, 20 unidades, mientras que de la segunda versión, el P-59B, solo se fabricaron 30 unidades, cancelándose su producción debido a sus insatisfactorias prestaciones.<sup>4</sup> Esto hace que este modelo no lo hayamos incluido en nuestra base de datos, al margen de la no disponibilidad de datos fiables sobre su precio.

El segundo avión de caza a reacción diseñado y producido por los Estados Unidos fue el P/F-80 Shooting Star, que se puede considerar como el primer avión de caza a reacción de los EE.UU., verdaderamente operativo. Este avión fue desarrollado en 1943 y su primer vuelo tuvo lugar el 1 de junio 1944, aunque propulsado por un motor británico, dado que la industria aeronáutica de reacción del Reino Unido estaba en aquellos momentos por delante de la norteamericana. Este avión era un diseño de alas rectas, característica que limitaba de forma importante sus prestaciones, pero fue de gran ayuda para llevar a cabo desarrollos posteriores, constituyendo una extraordinaria plataforma de experimentación. Aunque el F-80 Shooting Star fue desplegado antes del final de la Segunda Guerra Mundial, no entró en combate en este conflicto. Sin embargo, si participó en la Guerra de Corea (iniciada en 1950), aunque de forma breve, siendo rápidamente reemplazado por otros modelos más

---

<sup>3</sup>Véase el Apéndice A (Tabla A.1.1) para una clasificación de los aviones de caza de los Estados Unidos por generación (sólo nuevos diseños o actualizaciones importantes) y las principales características técnicas de cada generación. La tabla A.1.2 presenta el año de introducción de algunas características fundamentales en la fabricación de los aviones de caza a reacción.

<sup>4</sup>En aquel momento el Reino Unido estaba desarrollando el Gloster Meteor I, avión muy superior al P-59A Airacomet y Alemania ya tenía operativo el Messerschmitt Me-262.



Figura 2.1: Lockheed P/F-80A Shooting Star

avanzados, ya que era un caza que fue ampliamente superado en prestaciones por el MiG-15 de la Unión Soviética. El precio de este modelo (medido en términos del *flyaway cost*) se situaba ligeramente por debajo de los 100.000 dólares (en valores corrientes de 1944).

Durante la década de los 40, la Fuerza Aérea de los EE.UU. desarrolló cuatro modelos adicionales: el F-84 Thunderjet, el F-86 Sabre, el F-89 Scorpion, y el F-94 Starfire. Estos aviones representaron un importante paso adelante en comparación con los desarrollos anteriores, incorporando un conjunto de características y funciones que conformaron la base de los desarrollos posteriores durante la década de los 50, incluyendo la nueva generación de motores turbo reactores, alas en flecha,

radar de control de tiro, controles de vuelo hidromecánicos primitivos, etc. El avión más representativo de esta generación es, sin duda alguna, el F-86 Sabre. El primer vuelo del F-86 Sabre tuvo lugar en octubre de 1947, siendo este modelo el primer avión de caza de los EE.UU. con alas en forma de flecha. Este modelo era un desarrollo del FJ-1 Fury de la marina y tuvo un papel destacado en la guerra de Corea, siendo, en algunos aspectos, superior al MiG-15. Otro modelo desarrollado en los años 40 fue el F-84 Thunderjet, modelo que llevó a cabo el primer vuelo el 29 de febrero de 1946 y fue el primer avión de caza con capacidad de reabastecimiento en vuelo y el primer avión a reacción capaz de transportar un arma nuclear. El F-84 Thunderjet, al igual que el F-80 Shooting Star fue también un diseño con alas rectas, lo que limitó sus prestaciones. No obstante, la configuración de las alas de este modelo cambiaron a la forma de flecha con el Thunderstreak F-84F. El F-89 Scorpion fue también un caza con alas rectas y diseñado como interceptor todo tiempo, realizando su primer vuelo el 16 de agosto de 1948. Finalmente, el 19 de abril 1949 se llevó a cabo el primer vuelo del F-94 Starfire, un desarrollo realizado a partir del F-80 Shooting Star. Este modelo fue el primer avión de caza de EE.UU. con postcombustión. El precio promedio en dólares corrientes (no ajustados por la inflación) del conjunto de estos aviones de primera generación se situaba en torno a los 367.300 dólares.

Durante la década de los 50, la industria aeronáutica militar americana fue muy prolífica, desarrollando un conjunto de seis nuevos cazas para la Fuerza Aérea, conjunto de cazas a los que se les conoció como la Serie Centenaria (Century Series). Estos aviones fueron el F-100 Super Sabre, el F-101 Voodoo, el F-102 Delta Dagger, el F-104 Starfighter, el F-105 Thunderchief, y el F-106 Delta Dart. Este conjunto de aviones se clasifican en una segunda generación de cazas a reacción. Esta segunda generación de cazas se caracteriza por presentar una aviónica avanzada en comparación con los modelos anteriores y unas capacidades operativas y de combate muy superiores a los de desarrollos previos. Así, estos aviones incorporan una nueva generación de motores turboreactores, armamento con misiles, velocidad



supersónica, radar de búsqueda y control de tiro, etc. El F-100 Super Sabre fue el primer avión de caza operacional de la USAF capaz de alcanzar velocidades supersónicas en vuelo horizontal. Por su parte, el F-102 Delta Dagger fue el primer caza con un diseño de alas en forma de delta, característica que permitía alcanzar mayores velocidades. Paralelamente al incremento del rendimiento y del más avanzado equipo tecnológico incorporado, el coste medio de esta generación se elevó a 2.001.606 dólares, es decir, en torno a cinco veces el precio medio de la generación anterior, medido en dólares corrientes.

A continuación del conjunto de cazas que formaron la denominada Serie Centenaria (*Century Series*), durante los años 60 se desarrolló la tercera generación de cazas a reacción, compuesta por únicamente tres modelos: El F-4 Phantom II, el F-111 Aardvark y el F-5 Freedom Fighter. El modelo más representativo del avión de combate de tercera generación es, sin ningún género de duda, el F-4 Phantom II. Aunque este modelo fue inicialmente desarrollado como un avión naval, dicha aeronave fué acogido por el Cuerpo de Marines de los EE.UU. y por la USAF. En comparación con los modelos de la generación anterior, el F-4 Phantom II incorporaba un gran número de avances técnicos y operativos y se adoptó como el caza principal no sólo por los Estados Unidos sino también por muchos países aliados. A mediados de 1960 también aparece el F-111 Aardvark como interceptor de mediano alcance, incluyendo algunas innovaciones, como las alas de geometría variable y otros nuevos dispositivos de aviónica mejorados. Finalmente, durante esta época también se desarrolló el F-5 Freedom Fighter como un avión de bajo coste (756.000 dólares en 1963 para la versión F-5A). Este era un avión ligero de alta maniobrabilidad con relativamente menos aviónica avanzada que los otros modelos coetáneos, pero fácil de mantener. Todos estos factores hicieron a este avión muy popular en un gran número de países de todo el mundo. El precio medio de esta generación de aviones se elevó a más de 4 millones de dólares, y aunque el F-5 era mucho más barato que los aviones de la generación anterior, el coste de la F-111 era de aproximadamente 10 millones de dólares por unidad.

La nueva serie de aviones de caza a reacción, que configuran la cuarta generación, se desarrolló durante la década de 1970. Estos aviones de caza fueron el F-14 Tomcat, el F-15 Eagle, el F-16 Fighting Falcon y el F-18 Hornet, aviones a los que se les conoce como la Serie Adolescente (*Teen Series*, en referencia a que tienen números entre 14 y 18). También incluimos el AV-8 Harrier II, aunque se trata de un avión de despegue y aterrizaje vertical/corto, VSTOL. Todos ellos incorporan nuevas características avanzadas para la práctica totalidad de los diferentes componentes que integran la aeronave, suponiendo una gran diferencia tecnológica respecto a los aviones de la generación anterior. Probablemente, la principal característica que incorporan los aviones de caza de cuarta generación son los controles *fly-by-wire*, esto es, controles de vuelo electrónicos en lugar de mecánicos, que permite el diseño de aviones de caza que son intrínsecamente inestables, junto con un radar avanzado. El F-14 Tomcat fue desarrollado en respuesta a la incapacidad de convertir el F-111 como un interceptor naval para reemplazar al F-4 Phantom II. El primer vuelo tuvo lugar el 21 de diciembre de 1970. Este modelo era un caza biplaza con alas de geometría variable, dos motores, y capacidad para operar desde portaviones. En 27 de julio 1972 se llevó a cabo el primer vuelo del F-15 Eagle, que sería el equivalente para la USAF del F-14 Tomcat de la marina, con el mismo objetivo de reemplazar al F-4 Phantom II. Por su parte, el primer vuelo del F-16 Fighting Falcon tuvo lugar el 20 de enero de 1974. En este caso se trata de un avión de combate multiuso todo tiempo, con un solo motor, y diseñado como complemento del más pesado F-15 Eagle. En noviembre de 1978 tuvo lugar el primer vuelo del F/A-18 Hornet diseñado para la marina, con un papel equivalente al del F-16 de la Fuerza Area, pero con dos motores y la capacidad para operar desde portaaviones. Todos estos modelos incluyen el nuevo sistema electrónico de control de vuelo, radar avanzado (look-down/shoot-down, seguimiento de objetivos múltiples, etc.), circuitos integrados a gran escala, etc. Finalmente, el AV-8 Harrier II fue un desarrollo a partir del GR.1A/AV-8A/C Harrier I británico, que había realizado su primer vuelo en diciembre de 1967 y cuya principal característica era la posibilidad de realizar despegue y aterrizaje vertical.

El coste promedio en dólares corrientes de esta generación de aviones de combate era de unos 30 millones de dólares. Esto es, más de siete veces el precio medio de la caza a reacción de la generación anterior sin tener en cuenta la inflación.

Los aviones de caza desarrollados más recientemente comprenden dos mejoras de diseños anteriores, el F-15E Strike Eagle y el F/A-18E Super Hornet, y dos nuevos diseños, el F-22 Raptor y el F-35 Lightning II.<sup>5</sup> Los dos primeros modelos son refinamientos de aviones de cuarta generación, que incorporan nuevas características técnicas más avanzadas en comparación con el diseño original y algunos autores clasifican estos refinamientos como una generación intermedia entre la cuarta y la quinta generación de cazas (denominados 4,5 o 4+) con el objeto de reflejar nuevos desarrollos, principalmente en lo que se refiere a aviónica, no disponible en los modelos anteriores de 4ª generación. Este conjunto de aviones incluye un conjunto de características operativas avanzadas, como son una gran agilidad, fusión de sensores, firmas reducidas ante el radar, cierta capacidad "supercruise" (capacidad de vuelo supersónico sostenido), combate más allá del campo visual, superficies avanzadas de control de vuelo, radar AESA (*Active Electronically Scanned Array* o Radar de barrido electrónico activo), etc. El F-15E Strike Eagle es un caza polivalente para todo tiempo y en comparación con el F-15A es un caza intensivo en aviónica. El F/A-18E Super Hornet es un avión derivado del F/A-18C/D Hornet, aunque en la realidad es un caza prácticamente nuevo, siendo más grande que su predecesor y con nuevas y mejores características operativas.

La quinta generación de aviones de caza de los Estados Unidos, está compuesta por dos nuevos modelos, el F-22 Raptor y el F-35 Lightning II, siendo éstos los únicos aviones de caza de quinta generación actualmente en fase operativa en el mundo.<sup>6</sup> Estos dos aviones incluyen propiedades más avanzadas que no están presentes en

---

<sup>5</sup>Otro refinamiento, el F-15SE Silent Eagle, no ha sido incluido en la base de datos, ya que este modelo no está actualmente en fase de producción.

<sup>6</sup>La industria rusa (con el T-50 PAK-FA), y la industria china (con el Chengdu J-20 y el Shenyang J-31) también han desarrollado cazas de quinta generación, si bien aún no se encuentran en la fase de desarrollo y aún no se encuentran operativos.

desarrollos anteriores, como tecnología furtiva, agilidad extrema, sensores y aviónica totalmente integrados, capacidad de vuelo supersónico sostenido, etc. Estos dos modelos de cazas están un paso por delante de modelos anteriores y representan una nueva generación de aviones de combate del siglo XXI. El F-22 Raptor voló por primera vez en septiembre de 1997, mientras que el F-35 Lightning II voló por primera vez el 15 de diciembre de 2006. Sin embargo, el coste unitario de estos modelos es mucho más alto que los aviones generación anterior. El coste del F-22 Raptor es de aproximadamente 150 millones de dólares (en dólares corrientes de 1997), mientras que el coste del F-35 Lightning II fue de 171,4 millones de dólares para el año fiscal 2012, si bien es de esperar que su coste disminuya conforme aumente el número total de unidades producidas, ya que se encuentra aún en la fase inicial de producción, donde los costes de producción por unidad son más elevados, al no tener aún impacto los efectos del aprendizaje en la práctica en su producción, tema que será analizado en el capítulo cuatro.

## 2.3 Medición del cambio tecnológico: El enfoque de precios hedónicos

La medición del progreso tecnológico constituye un tema de gran actualidad y el interés por el mismo ha ido aumentando de forma significativa a lo largo del tiempo debido a sus implicaciones. En la literatura sobre el tema encontramos un gran número de enfoques y métodos alternativos para medir el progreso tecnológico, tanto a nivel agregado de la economía o de una industria, como a nivel particular de un determinado bien o equipo.<sup>7</sup> Estos métodos incluyen el análisis de componentes principales, el análisis envolvente de datos, modelos de scoring, modelos de regresión en función del tiempo de aparición de un determinado equipo, medición a través de

---

<sup>7</sup>Para una excelente revisión de la literatura sobre métodos de medición del cambio tecnológico véase, por ejemplo, Coccia (2005).



Figura 2.2: Lockheed Martin F-35 Lightning II

precios hedónicos, etc. Todos estos métodos tienen en común la estimación de la relación entre la calidad técnica y el conjunto de características de un producto, es decir, tienen como idea común de partida el supuesto de que una variación en la tecnología se puede medir a través de los cambios en la calidad de los productos.

Uno de los métodos que vienen utilizándose de forma más extendida en la literatura es el denominado enfoque de precios hedónicos. El método de precios hedónicos se basa en un modelo de regresión múltiple, donde el precio de un determinado producto se va a determinar en función de sus características, por tanto, cada producto con propiedades diferentes tendrá un precio distinto. La idea de partida es que el precio de un determinado producto, por ejemplo un avión, depende de las diferentes características que incorpore dicho producto. Este conjunto de características hace referencia tanto a aspectos técnicos como a capacidades de funcionamiento. Cuanto mayor carga tecnológica y mayores capacidades incluyan sus características, mayor precio tendrá el producto que las incorpora. Los fundamentos teóricos de este enfoque los encontramos en la teoría del consumidor de productos diferenciados desarrollada por Lancaster (1966). La característica principal que define el enfoque hedónico es que las funciones de utilidad de los consumidores se especifican en términos de las características de los productos, en lugar de en términos de dichos productos. La aplicación del enfoque hedónico fue realizada inicialmente por Rosen (1974), basado en la hipótesis de que los bienes son valorados en términos de la utilidad que se deriva de cada uno de sus diferentes atributos. La idea es que un producto puede ser descrito como un conjunto de propiedades, que se supone son valoradas positivamente por los consumidores. En este contexto, la elección por parte del consumidor se refiere a las diferentes características, en lugar de a los productos. El precio final del producto se compone de la suma del precio implícito para cada característica. Por lo tanto, el precio del producto representa el gasto necesario que debe realizar un consumidor para obtener un nivel dado de atributos donde se maximice su utilidad.

La idea básica del enfoque hedónico para medir el cambio tecnológico consiste

en derivar los factores de ajuste de la calidad de datos de corte transversal y utilizarlos para ajustar una serie temporal de precios ajustados por calidad. Tal y como señala Griliches (1971), las regresiones de precios hedónicos son sólo una representación en forma reducida de comportamiento optimizador de consumidores y productores. El método de precios hedónicos utiliza información sobre los cambios en las características del producto para desagregar variaciones de precios que son debidas a cambios en las características de los mismos y variaciones que tienen lugar para unas características dadas. En el primer caso, las variaciones en los precios estarían reflejando variaciones en el propio producto, por lo que éste no sería homogéneo. Es decir, la variación del precio de un dispositivo puede ser dividido en un primer componente que refleja el "verdadero" cambio de precio y un segundo componente que refleja los cambios en sus características. La diferencia entre la variación total de precios y la variación de los precios ajustados por calidad se puede considerar como una medida del cambio tecnológico. En general, la demanda de un determinado producto puede ser modelizada como una función explícita de los precios de todos los productos en el mercado. En un contexto de productos diferenciados, la demanda de un producto se puede modelizar en el espacio de características, de forma similar al modelo de competencia desarrollado por Hotelling (1929).

En este contexto, el problema del consumidor consiste en seleccionar un conjunto de características,  $x_1, x_2, \dots, x_K$ , de un determinado bien, y la cantidad del resto de bienes,  $Z$ , tal que maximice su utilidad sujeta a su restricción presupuestaria. La función de utilidad del consumidor puede definirse como:

$$U(x_1, x_2, \dots, x_K, Z) \tag{2.1}$$

sujeta a la restricción presupuestaria:

$$P(x_1, x_2, \dots, x_K) + Z \leq Y \tag{2.2}$$

donde el precio del agregado de los otros bienes,  $Z$ , ha sido normalizado a la unidad y donde  $Y$  representa la renta. Tal y como podemos observar, el problema es similar al estándar neoclásico, pero con la diferencia de que la elección de los consumidores se refiere a características y no a productos.

Las condiciones de primer orden de este problema dan lugar a la siguiente condición de equilibrio:

$$\frac{U_{xk}}{U_{xj}} = \frac{P_{xk}}{P_{xj}} \quad (2.3)$$

para todos los pares de características del producto. Esta expresión indica que los ratios de las utilidades marginales de cada par de características debe ser igual a la ratio de sus precios marginales. Estos precios marginales indican la cantidad extra que un consumidor estaría dispuesto a pagar por una unidad adicional de una determina característica.

Tal y como sugiere Rosen (1975), los precios marginales asociados a las características de un producto puede ser calculado mediante la estimación de la relación entre el precio del producto y el conjunto de características del mismo. El enfoque hedónico establece que cada variedad de un determinado producto se caracteriza por el conjunto de sus características que son diferentes. Para cualquier producto dado podemos definir un vector de características,  $x$ , tal que  $x = (x_1, x_2, \dots, x_K)$ , donde  $x_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ , denota cada una de las características del producto. El supuesto clave es que para cualquier producto, existe una relación funcional entre el precio,  $p$ , y su vector de características,  $x$ , tal que:

$$p = f(x) \quad (2.4)$$

A partir de la función anterior, podemos definir los precios hedónicos implícitos al vector de características, que indican hasta qué punto el precio de un bien cambia en función de la variación en dicho conjunto de características. En general, el modelo de regresión hedónica toma la siguiente forma funcional:



$$p_{i,t} = f(x_{i,t}, \beta_i) + \varepsilon_{i,t} \quad (2.5)$$

donde  $p_{i,t}$  es el vector de precios de la variedad  $i$  en el período  $t$ ,  $x_{i,t}$  es el vector de características de cada variedad,  $\beta_i$  es un vector de coeficientes y  $\varepsilon_{i,t}$  es un término de error. En el análisis empírico, el precio del producto se estima en función de sus propiedades y una variable ficticia para el periodo muestral. A partir de la anterior regresión podemos obtener la estimación del valor de la contribución de cada característica (a lo que se denomina precios implícitos) y una estimación del precio ajustado por la calidad (el precio real del producto). Desde un punto de vista estadístico, la cuestión principal es la cuantificación del cambio verdadero en el precio de un bien dada una determinada calidad del mismo, debido a que para poder llevar a cabo comparaciones de precios en el tiempo que sean correctas, el precio tiene que ser ajustado por los cambios en la calidad que experimente el producto. Desde nuestro punto de vista, el principal interés se centra en la diferencia entre el precio final del producto y el precio ajustado a la calidad como una medida del cambio tecnológico.

A partir de la desagregación de los cambios en el precio que se deriva de la estimación de la ecuación (2.5), podemos obtener una medida del cambio tecnológico. El progreso tecnológico puede ser definido como el cambio en la calidad que se ha llevado a cabo durante un período de tiempo determinado. Por lo tanto, a partir del cálculo de precios hedónicos podemos calcular el cambio tecnológico como la diferencia entre el cambio de precio no ajustado según la calidad y el cambio en el precio ajustado a la calidad de un producto determinado.

El método de los precios hedónicos se puede aplicar empíricamente utilizando especificaciones alternativas del modelo general anterior.<sup>8</sup> Una alternativa comúnmente utilizada en la literatura empírica es estimar una ecuación de regresión por separado para cada período observado. Otro procedimiento estándar consiste en

---

<sup>8</sup>Véase Berndt (1996) para una revisión de las diferentes estimaciones alternativas de los modelos de precios hedónicos y sus implicaciones.

estimar una regresión con bloques de datos durante dos años adyacentes e incluyendo una variable ficticia temporal. Dado que la variable dependiente de estas regresiones se expresa generalmente en logaritmos naturales, el coeficiente de la variable de tiempo muestra el cambio porcentual en el precio entre los dos años que no viene explicado por cambios en las especificaciones. Otro procedimiento utilizado es el de estimar la ecuación (2.5) para el período de la muestra completa y la incorporación de una tendencia para poder captar los cambios en los precios que no han podido ser explicados mediante variaciones en la calidad. Este es el método seleccionado en el análisis que realizaremos a continuación dado que nuestro interés se centra en medir el cambio en el precio "verdadero" a lo largo del tiempo. En general, asumiendo por simplicidad una especificación semilogarítmica, tenemos:

$$\log p_{i,t} = \alpha + \delta t + \sum_i \beta_i \log x_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (2.6)$$

donde  $t$  es la tendencia temporal y donde el parámetro asociado a dicha tendencia,  $\delta$ , que es el que nos va a indicar el cambio en el precio "verdadero" del producto, una vez corregido por las variables que representan la calidad del mismo.

El método de los precios hedónicos ha sido aplicado a una gran variedad de productos, principalmente en lo que se refiere a bienes de equipo. El primer trabajo que llevó a cabo un análisis de precios hedónicos es el realizado Vaugh (1928), estudiando los factores que explican los precios de los espárragos, tomates y pepinos, seguido por el trabajo de Court (1939) para la industria del automóvil. La literatura más reciente se inicia con Griliches (1961) también para la industria del automóvil.<sup>9</sup> Los métodos de estimación de precios hedónicos se han aplicado a una gran variedad de productos, por ejemplo, al vino por Nerlove (1995), al turismo por Thrane (2005), a las islas de todo el mundo Bonnetain (2003), a internet por Lee, Park y Kim (2003), a los teléfonos móviles por Dewenter et al. (2007), etc. Uno de los estudios que más repercusión ha tenido en la literatura es el realizado

---

<sup>9</sup>Véase Triplett (2004) para una descripción en profundidad del enfoque de determinación de precios hedónicos y la estimación de precios ajustados por calidad.

por Griliches (1961) para la industria automovilística, llegando a la conclusión de que casi todo el aumento registrado en el componente automóviles del Índice de Precios al Consumo entre 1954 y 1960 puede atribuirse a una mejora en la calidad de los mismos. Raff y Trajtenberg (1996) estiman índices ajustados por la calidad para la industria automovilística de los Estados Unidos para el periodo 1906-1940, encontrando que la calidad de este producto aumentó a una tasa media anual del 2%. Chow (1967) aplica el enfoque de precios hedónicos a los ordenadores, encontrando que este producto ha experimentado una disminución en su precio del 20% de media al año, para el periodo 1954-1965. Por su parte, Pakes (2003), aplica el enfoque de los precios hedónicos a los ordenadores, encontrando que el crecimiento de los precios, ajustados por los cambios en la calidad, son significativamente negativos, evidenciando un intenso progreso tecnológico. Chwelos et al. (2008) calculan índices de precios ajustados por la calidad para las PDAs (Personal Digital Assistants), para el periodo 1999-2004, resultando en disminuciones de precios del producto entre el 10 y el 26% anual.

En este capítulo aplicamos el enfoque de precios hedónicos a los aviones de caza a reacción de los Estados Unidos. El enfoque de precios hedónicos se puede aplicar a casi todos los productos, independientemente de las características particulares del mercado o el número de variedades existentes. Bajari y Benkard (2005) muestran que si la demanda está dada por el modelo hedónico, entonces siempre existe una función de las características que se corresponden al precio, sin tener en cuenta la forma de la competencia e incluso en el caso de que solo exista un pequeño número de productos.

En la literatura encontramos varios estudios que tratan de medir el cambio tecnológico en los aviones caza a reacción utilizando enfoques alternativos. Un enfoque alternativo a la medición de precios hedónicos es la fijación de precios a través del método "coste de producción/rendimiento", utilizado por Ziemer y Kelly (1993) para las mediciones de precios de los aviones militares. Contrariamente al modelo hedónico, en este enfoque, el valor del cambio de calidad se determina por

el coste de producir el cambio, mientras que las variaciones en el rendimiento sólo se utilizan para determinar si ha habido un cambio en la calidad, no para valorarlos. Sin embargo, tal y como señala Alexander (1993), este método no es adecuado para la medición del cambio en la calidad, dado que el uso de coste como una medida de cambio de calidad ignora la posibilidad de mejoras en la tecnología. Otra alternativa es la utilizada por Steckler (1985), que estudió los cambios tecnológicos en la industria aeronáutica militar norteamericana dividiendo el cambio técnico en dos componentes: aquellos que afectan a los métodos de producción y aquellos que afectan a la innovación de la calidad del producto, aplicando dicho método a la comparación de las tecnologías de los aviones F-4 Phantom II y F-15 Eagle. La metodología utilizada consiste en la determinación de cuáles habrían sido los costes de producción de un sistema antiguo (en su caso, el F-4) si la tecnología de fabricación empleada hubiese sido la de un sistema más moderno (en su caso, el F-15). Arena *et al.* (2008) estudian el aumento de precios para los aviones militares de todo tipo, mostrando que el aumento en el precio de estas aeronaves ha superado al aumento de los precios agregados usando diferentes índices de inflación, tales como el Índice de Precios al Consumo, el deflactor del Producto Interno Bruto, y el deflactor de adquisición del Departamento de Defensa (DoD), lo cual tiene implicaciones directas en el número de aeronaves que el DoD puede adquirir. Estos autores consideran dos causas diferentes que explican la escalada de precios en estos equipos: factores por el lado de la oferta y factores por el lado de la demanda. Los factores por el lado de la oferta incluyen los costes de mano de obra, de los equipos y de los materiales, mientras que los factores por el lado de la demanda incluyen las especificaciones técnicas y operativas reclamadas por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos.

## 2.4 Datos y variables

El enfoque de precios hedónicos requiere de dos tipos de información: precios de los diferentes modelos y variedades de un determinado bien o equipo y características de los mismos. En el caso concreto de los aviones de caza a reacción, la información necesaria es el precio de los diferentes modelos de este producto y las características técnicas y operativas de los mismos. Esta información ha sido recopilada utilizando distintas fuentes. La fuente principal utilizada para la obtención de dicha información es la enciclopedia de aviones y sistemas de misiles de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos realizada por Knaack (1978). La base de datos de Knaack (1978) contiene información detallada, tanto de precios como de especificaciones técnicas y operativas, desde el F-80 Shooting Star hasta el F-5 Freedom Fighter. Esta base de datos inicial se ha ampliado usando otras fuentes de información alternativas, como la guía Janes de reconocimiento de los aviones militares de los Estados Unidos elaborada por Holmes (2007), así como diferente información del Departamento de Presupuestos de Defensa de los Estados Unidos para varios años, del Departamento de la Marina y de la Fuerza Aérea, USAF.

El conjunto de datos utilizados contiene información de un total de 61 modelos de cazas a reacción producidos por la industria de los Estados Unidos, que abarcan el período 1944-2012. En términos cronológicos, el primer caza incluido en la base de datos es el F-80 Shooting Star, cuyo primer vuelo tuvo lugar en enero de 1944, mientras que el modelo más reciente es el F-35 Lightning II, cuyo primer vuelo tuvo lugar en diciembre de 2006. En la base de datos se incluyen tanto nuevos diseños, como versiones de los mismos que suponen características diferentes.

La Tabla 2.1 muestra el número total de aviones incluidos en la base de datos, distinguiendo entre nuevos diseños y derivados de éstos, han sido clasificados siguiendo la escala estándar de cinco generaciones. La primera generación incluye a los aviones de caza desarrollados durante el periodo 1944 hasta principios de los 50, con un total de 22 modelos, 6 nuevos y 16 derivados. La segunda generación

de cazas incluye aquellos modelos desarrollados durante la década de los 60, con un total de 16 modelos (6 de nuevo diseño y 10 derivados). Un menor número de aviones pertenecen a la tercera y cuarta generación, 9 y 12 respectivamente. Finalmente, solo dos modelos son considerados como aviones de caza de quinta generación. La producción del F-22 Raptor finalizó en 2009, con una única versión construida. El F-35 Lightning II está actualmente en fase de producción, fabricándose tres versiones de forma simultánea (el F-35A que es la versión estándar, el F-35B que es una versión de despege corto y aterrizaje vertical (STOVL) y el F-35C que es la variante con capacidad de operar desde portaaviones). No obstante, solo la versión estándar, el F-35A, es considerada en nuestro estudio.

**Tabla 2.1: Número de Aviones de Caza**

Generación	Nuevos	Derivados	Total
Primera	6	16	22
Segunda	6	10	16
Tercera	3	6	9
Cuarta	5	7	12
Quinta	2	0	2
Total	22	39	61

Tal y como hemos indicado anteriormente, el método de los precios hedónicos consiste en la estimación de regresiones que relacionan los precios de un producto en particular con las propiedades de los diferentes modelos o variedades de dicho producto. La idea subyacente parte del supuesto que este conjunto de características reflejan diferencias en la calidad entre los diferentes modelos del producto. Así, en el método de precios hedónicos, la variable dependiente es el precio de un determinado producto para las diferentes variedades existentes del mismo. Para calcular el precio de un avión de combate existen varias medidas que se utilizan en la práctica, dependiendo de los conceptos que se incluyan. De hecho, el coste de una aeronave

militar depende de la forma en la que se calcule y de los conceptos que se incluyen en ella, tales como los costes de desarrollo, el motor, el armamento, mantenimiento, etc. El concepto de precio más directo y el más utilizado en la práctica para el caso de los aviones de combate es el "coste *flyaway*", también denominado coste de contratación, que es el que está más directamente relacionado con el coste de producción de una unidad en la fábrica. Así, el "coste *flyaway*" supone una medida del precio de producción unitario de una aeronave. Una medida alternativa es el denominado coste de adquisición (*procurement cost*), también llamado coste del sistema de armas, que no solo incluye los costes de producción de la aeronave, sino que también incluye el coste del programa de desarrollo pre-producción dividido por el número total de aeronaves producidas. En este caso el precio unitario sería una función del número de aviones que han sido fabricados o que vayan a ser construidos en el futuro, ya que los costes de desarrollo suponen un coste fijo que debe ser incorporado a cada unidad producida. Existe un tercer método para el cálculo más amplio pero que también resulta más complejo y valora el precio de un avión no solo en términos de su coste de adquisición sino también incluyendo todos los costes de mantenimiento durante su vida operativa. En este caso se incluyen costes de combustible, repuestos, inspecciones, reparaciones, armamento, etc., siendo el valor resultante mucho más elevado que las anteriores.

El coste *flyaway* valora el coste de una aeronave en términos de su coste marginal, es decir, lo que tendría que pagar el gobierno por una unidad adicional, incluyendo sólo el coste de las herramientas de producción inmediatamente resultantes para la construcción de una sola unidad. No incluye, por tanto, los costes previos a la fase de producción, como los costes RDT&E (investigación, diseño, prueba y evaluación, ya que se consideran costes hundidos), ni tampoco incluyen otros costes adicionales, tales como los gastos de apoyo y gastos futuros como repuestos y costes de mantenimiento. Los costes de RDT&E están compuestos por todos los costes de la investigación y el desarrollo de la aeronave y no se superponen con el coste de contratación o el coste *flyaway*. El precio de adquisición o valor del sistema de armas

es el coste de la compra de la aeronave, incluyendo el coste de equipos auxiliares, los costes del contrato no recurrentes, y todos los gastos de apoyo a la estructura, motor y aviónica. Nicolás y Rossi (1991) muestran que el coste *flyaway* suele ser inferior al coste de adquisición en un 2-3%. Sin embargo, esta diferencia cambia de forma importante de un avión a otro, y no existe una relación estable entre el coste *flyaway* y el coste de adquisición, sino que depende de cada modelo en particular. Comparando ambas medidas del valor de un avión, el coste de adquisición refleja el coste de la compra de un avión mientras que el coste *flyaway* refleja el coste de fabricación de la aeronave. En la medida en que nuestro objetivo es la medición de los cambios tecnológicos de las aeronaves mediante el uso de índices de precios ajustados por calidad, el precio correcto que se utilizará en nuestro análisis es el coste *flyaway*.

Otra cuestión relativa a la determinación del precio de un avión de combate es la existencia de la llamada curva de aprendizaje en la producción de aviones, lo que implica que a medida que aumenta la cantidad de producción, disminuyen los costes de producción unitarios.<sup>10</sup> Los aviones de caza representan un producto tecnológicamente muy complicado y el coste de producción es más elevado durante el período inicial de producción, mientras que su coste de fabricación se irá reduciendo con el tiempo conforme aumente el número de unidades producidas. Esto implica que el precio unitario de producción de un determinado modelo de avión no es constante a lo largo de su fase de producción, sino que resulta ser una función decreciente del número acumulado de aviones fabricados. Desde el trabajo pionero de Wright (1936), la curva de aprendizaje ha sido aplicada a un elevado número de industrias, incluyendo la aeronáutica. En el caso particular de la industria aeronáutica, la literatura supone la existencia de una curva de aprendizaje en torno al 80% (lo que implica una disminución del 20% en los costes de producción cada vez que se dobla la

---

<sup>10</sup>En el capítulo 4 llevaremos a cabo un análisis en mayor profundidad de la denominada curva de experiencia o de aprendizaje, que tiene un efecto muy importante sobre el precio final de los aviones de caza en función de la producción acumulada.



producción). Véase, por ejemplo, Alchian (1963). Con objeto de tener en cuenta los importantes efectos que tiene la existencia de la curva de aprendizaje sobre el coste de producción de estos equipos, en la literatura se utiliza como precio de referencia para cada modelo de avión el precio de producción (coste *flyaway*) correspondiente a la unidad producida número 100. Tal y como muestran Ziemer y Kelly (1993), a partir de la unidad producida número 100, el aprendizaje adicional que se adquiere es muy limitario, por lo que posteriores disminuciones en los costes de producción son muy reducidas, ya que la mayor parte del aprendizaje posible ha sido obtenido en la producción de las primeras unidades. Por tanto, en este estudio, utilizaremos el precio correspondiente a la unidad producida número 100, con objeto de tener en cuenta los efectos del aprendizaje sobre el precio final. El único avión considerado cuyo coste unitario no se corresponde con la unidad número 100 es el F-35 Lightning II, dado que aún no se ha alcanzado la cifra de 100 para la variante considerada de este modelo

A continuación, tenemos que seleccionar el conjunto de parámetros que definen las características y capacidades operativas, así como la complejidad técnica de cada avión de caza. En principio, podemos distinguir entre aquellas capacidades técnicas que describen aspectos internos de la tecnología y las variantes de los servicios que generan dichas cualidades técnicas, básicamente medidas en términos de rendimiento o de capacidades operativas. Sin embargo, en la práctica, ambos tipos de características están relacionadas. Tal y como señalan Saviotti y Metcalfe (1984), al mismo modo que Frenken, Saviotti y Trommter (1999) la tecnología incorporada en un determinado producto puede representarse por medio de dos conjuntos diferentes de características: estructura técnica del equipo y servicios generados o rendimiento del mismo. Las características técnicas y las características de rendimiento están directamente relacionada, por lo que pueden considerarse de forma conjunta. De hecho, este punto de vista es equivalente a las características del producto enfoque de Lancaster (1966).

La base de datos incluye un gran número de variables técnicas y operativas de

los diferentes aviones de caza, como la potencia, la velocidad, régimen de ascenso, rango, techo, carga, peso vacío, peso de la carga, el peso máximo de despegue, armamento, aviónica, etc. Todo este conjunto de variables representan diferentes aspectos de la tecnología incorporada en cada aeronave. Martino (1985) apunta a que el peso de despegue bruto (GTOW) de una aeronave es una medida del estado de la técnica incorporada en dicho equipo, si bien reconoce que no es una medida completa de la tecnología. No obstante, los aviones de caza representan equipos cada vez más complejos, incluyendo un gran número de componentes, por lo que una única variable refleja de modo muy impreciso su nivel tecnológico. Aunque la base de datos desarrollada inicialmente contiene un gran número de variables que reflejan las características de cada modelo, la mayoría de estas variables están altamente correlacionadas entre ellas, tal y como muestra Martino (1993). Esto reduce el número de variables que deben incluirse en el modelo de estimación con el fin de evitar problemas de multicolinealidad.

Para la estimación de la ecuación de precios hedónicos, seleccionamos como variables explicativas el empuje, el régimen de ascenso y el MTOW (peso máximo de despegue). También se incluyen tres variables ficticias: Aviónica Básica, Aviónica Avanzada y Furtividad. La variable ficticia Aviónica Básica se refiere al conjunto de equipos electrónicos incorporados en algunos aviones de caza de segunda y en los cazas de tercera generación. La variable ficticia Aviónica Avanzada hace referencia a los equipos electrónicos incorporados en los aviones de caza de cuarta y quinta generación, e incluye superficies avanzadas de control de vuelo, radar AESA de barrido electrónico activo (*Active Electronically Scanned Array*) y sistemas de circuitos integrados a gran escala. Por último, la variable ficticia Furtividad, es una variable que toma el valor de uno para sólo dos modelos: el F-22 Raptor y el F-35 Lightning II. Esta variable ficticia no sólo se refiere a las características de furtividad de estos dos aviones, sino también a otras características que van configurando a los aviones de quinta generación, como la super-maniobrabilidad, el empuje vectorial, capacidad de velocidad supersónica sostenida, enlace de datos

avanzado, gran cantidad de sensores, etc.

Aunque existen relativamente pocos estudios sobre el tema en la literatura, las variables seleccionadas para representar el nivel tecnológico de los aviones de caza han sido muy diferentes si bien la correlación entre ellas es muy elevada. Stanley y Miller (1979) consideran como variables explicativas de la primera fecha de vuelo de los aviones de caza, la potencia específica, el factor de carga constante, el rango Breguet, la fracción de carga útil, y la capacidad de operar desde portaaviones. Por otra parte, Martino (1993) consideran como variables explicativas la velocidad máxima, el tiempo medio entre fallos, la carga útil, y el rango de los misiles BVR (*Beyond Visual Range*). La única variable común en los diferentes estudios es la velocidad máxima y el peso de carga útil. Por consiguiente, estas dos variables se utilizan también en nuestro análisis como la representación de las características de rendimiento de la aeronave medir el nivel tecnológico. Variables relacionadas con el armamento han sido únicamente utilizadas por Martino (1993), a través del alcance de los misiles BVR.

**Tabla 2.2: Estadísticos descriptivos**

Variable	Media	Des. Est.	Mín.	Máx.
Precio <i>Flyaway</i> (Dolares corrientes)	13.842.079	31.545.947	93.456	171.390.000
Empuje (Libras)	21.625,8	16.659,3	4.000	70.000
Régimen de ascenso (Pies/minuto)	28.468,0	19.611,5	3.765	80.000
MTOW (Libras)	41.538,4	23.086,2	14.108	98.950
Aviónica Básica	0,230	–	–	–
Aviónica Avanzada	0,197	–	–	–
Furtividad	0,033	–	–	–

La Tabla 2.2 muestra los estadísticos descriptivos básicos de las variable seleccionadas para el análisis. El precio de los diferentes aviones viene medido en

dólares corrientes. La variable ficticia representando la Aviónica Básica toma en valor de 1 para un total de 14 cazas (23% de la muestra), siendo cero para el resto. La variable ficticia "Aviónica Avanzada" toma un valor de 1 para un total de 12 aviones (19,7% de la muestra), mientras que la variable "Furtividad" toma el valor 1 para únicamente dos cazas (el 3,3% de la muestra).

## 2.5 Estimación de los precios hedónicos

En esta sección procedemos a estimar el modelo de precios hedónicos donde la variable dependiente es el coste por unidad (de la unidad producida número 100) de cada modelo de aeronave y un conjunto de variables explicativas que reflejan las características técnicas y de rendimiento de las mismas. Todas las variables vienen definidas en términos logarítmicos, excepto las variables ficticias. En la regresión a estimar se incluye una tendencia temporal para capturar el aumento en el precio nominal que no viene explicado por los cambios en la calidad. El coeficiente estimado de esta tendencia temporal es un elemento clave en nuestro análisis ya que reflejará el incremento en el precio ajustado a la calidad, es decir, el "verdadero" aumento del coste del avión de caza una vez ajustado por el progreso tecnológico incorporado en el mismo. Este coeficiente refleja las variaciones en precios de un período a otro que no se deben a los cambios en las características y, por tanto, reflejaría el incremento real de costes de estos equipos. Además, este método permite fijar el precio para cada una de las cualidades de forma individual, lo que supone una estimación de los precios implícitos.<sup>11</sup>

Los principales resultados obtenidos de la estimación de la regresión de precios hedónicos se muestran en la Tabla 2.3. En dicha tabla aparecen los resultados de distintas regresiones para diferentes tamaños de la muestra, con el objetivo

---

<sup>11</sup>Véase Berndt (1996) para una descripción de los diferentes procedimientos para la medición de los cambios en la calidad de un producto y la construcción de índices de precios hedónicos usando el método de las regresiones múltiples.

de estudiar la estabilidad de los parámetros para diferentes muestras y tener una aproximación sobre cómo cambia la tecnología a lo largo del tiempo. El modelo I considera el periodo 1944-1972, excluyendo los aviones de caza de cuarta y quinta generación. El modelo II extiende este análisis a los aviones de cuarta generación (1944-1995). Finalmente, el modelo III muestra los resultados para la totalidad de la muestra. Comparando los resultados obtenidos de las regresiones II y III, encontramos que la inclusión o no de los cazas de quinta generación no alteran significativamente los resultados, siendo los precios implícitos estimados muy similares entre los diferentes modelos, lo que puede interpretarse como una prueba de la robusted de la especificación estimada. Además, el coeficiente estimado de la tendencia es también muy similar, lo que indica que la velocidad a la que se está produciendo el cambio tecnológico en la industria permanece muy estable en el tiempo, a pesar de que la inclusión de los modelos de quinta generación presentan características muy diferentes a los anteriores.

Centrándonos en los resultados obtenidos de la estimación del modelo III, tal y como podemos observar, todos los parámetros estimados son estadísticamente significativos a niveles convencionales, excepto la constante y la variable ficticia que en este caso viene representada por Aviónica Básica. Las características seleccionadas presentan los signos positivos esperados, lo que indica que el precio relativo (precios implícitos) de cada característica. Dado que todas las variables excepto las ficticias están en logaritmos, los coeficientes estimados pueden interpretarse directamente como elasticidades. En términos generales, el modelo es capaz de explicar alrededor del 96% de la variación de precios entre los diferentes modelos de aviones de caza en términos de las variaciones que presentan en las características seleccionadas. Curiosamente, el parámetro constante estimado no es significativo tal y como apunta la teoría. Este parámetro indica el precio de una aeronave con características nulas, lo que obviamente debería ser cero.

Debido a que la ecuación estimada se formula en forma semi-logarítmica, el coeficiente de la variable de tendencia temporal nos proporciona una estimación

del porcentaje medio del aumento en el precio de los modelos de aviones durante el período muestral, manteniendo constante la calidad, es decir, que representa el aumento ajustado a la calidad de los precios nominales. Central en nuestro análisis es el valor estimado para el coeficiente de la tendencia en el tiempo. El valor estimado para este coeficiente es de 0,025, lo que supone un crecimiento medio de los precios ajustados por calidad de 2,5% en el año. Esta cifra puede interpretarse como el aumento "real" en el precio de los aviones de caza a reacción una vez el cambio tecnológico se han tenido en cuenta. Este valor estimado está muy por debajo de la tasa de inflación medida a través del Índice de Precios al Consumo, que en promedio durante el período se ha situado en torno al 4%. Por lo tanto, el aumento en el precio de los aviones caza a reacción está por debajo de la escalada del coste promedio de la economía.

A partir de los resultados anteriores, podemos obtener una medida cuantitativa del progreso tecnológico para este tipo de aeronaves. La variación en el precio de un producto puede definirse como:

$$\Delta P_i = \Delta P_i^{adj} + \Delta Q_i \quad (2.7)$$

donde  $\Delta P_i$  es la variación observada en el precio del producto,  $\Delta P_i^{adj}$  es la variación en el precio para el caso en que las características del producto permanezcan constantes, es decir, la variación en el precio ajustada por la calidad y  $\Delta Q_i$  representa la variación en las características del producto, esto es, cambios en la calidad. Por tanto, el progreso tecnológico puede ser calculado como la diferencia entre el aumento en el precio no ajustado y el precio ajustado por calidad, tal que:

$$\Delta Q_i = \Delta P_i - \Delta P_i^{adj} \quad (2.8)$$

Utilizando los resultados de la estimación realizada, resulta un valor de alrededor de un 10% por año, es decir, los aviones de caza desarrollados por los Estados Unidos son, en promedio, un 10% más avanzados año a año, en comparación con los modelos anteriores, mostrando el intenso progreso tecnológico que se ha producido en

el desarrollo de estos equipos. En otras palabras, si bien modelos de diferentes épocas no son directamente comparables, teniendo en cuenta las estimaciones anteriores resultaría que el F-22 Raptor es aproximadamente 500 veces mejor (o más avanzado tecnológicamente para ser más exactos) que el F-80 Shooting Star.

**Tabla 2.3: Estimación de los precios hedónicos**

	Modelo I	Modelo II	Modelo III
Generación	1-3	1-4	1-5
Constante	-1,507 (1,825)	-0,669 (1,566)	-0,627 (1,559)
Tendencia	0,031 (0,022)	0,024 (0,014)*	0,025 (0,013)**
Empuje	0,442 (0,398)	0,668 (0,342)*	0,621 (0,335)*
Régimen de ascenso	0,353 (1,163)**	0,256 (0,139)*	0,259 (0,138)*
Peso máximo al despege	0,708 (0,384)***	0,513 (0,329)	0,546 (0,325)*
Aviónica Básica	0,241 (0,249)	0,318 (0,204)	0,308 (0,202)
Aviónica Avanzada	-	1,879 (0,413)***	1,835 (0,408)***
Furtividad	-	-	2,421 (0,681)***
Número de observaciones	47	59	61
$R^2$	0,887	0,955	0,962

Errores estándar estimados entre paréntesis.

\*\*\*, \*\*, \*, implica significatividad al 1%, 5% y 10%, respectivamente.

Aunque el resultado más importante que se deriva del análisis realizado es la medición del progreso tecnológico, aunque utilizando la estimación hedónica también se puede utilizar para obtener los precios implícitos de las diferentes cualidades que componen los aviones de caza a reacción. Los coeficientes estimados para cada una de las propiedades reflejan el aumento de precio final del producto ante un aumento porcentual dado en el valor de cada una de las características. De este modo, obtenemos una medida de la importancia relativa de cada una de las características

del producto y de las variaciones en las mismas sobre el precio final del mismo. Por ejemplo, los valores estimados indican que, manteniendo el resto de características constantes, un aumento de 1% de empuje (medido en libras fuerza) aumentará el precio en un 0,62%. Si analizamos una mejora en el régimen de ascenso resulta más barato en términos relativos, ya que un 1% de aumento en el régimen de ascenso (medido en pies por minuto) aumentaría el precio en un 0,26%.

El modelo de precios hedónicos estimado incluye tres variables ficticias: Aviónica Básica, Aviónica Avanzada y capacidad Furtiva. El coeficiente estimado de aviónica básica no es estadísticamente significativo a los niveles estándar para ninguno de los tres modelos estimados. Esto significa que, en términos estadísticos, la incorporación de estos avances no aumentaron, por sí solos, las características técnicas y operativas de los aviones de caza respecto a modelos anteriores y, por tanto, no tuvieron ninguna influencia sobre el precio final. El valor estimado de la Aviónica Avanzada es de 1,83, siendo un valor significativo. Esto se puede interpretar como que un avión de combate con Aviónica Avanzada es alrededor de 5 veces más caro que una aeronave equivalente sin esta característica, lo que supone un salto en la calidad de estos aviones respecto a los modelos de caza anteriores que no disponían de estos equipos electrónicos.

El valor del parámetro estimado para la variable "Furtividad" es de 2,42. Esto implica que si se mantienen constantes todas las demás variables, la incorporación de la tecnología de furtividad aumenta el coste de la aeronave en alrededor de un 900%.<sup>12</sup> En otras palabras, este valor estimado dice que una aeronave equivalente al F-22 Raptor, con todas las características, pero sin la capacidad de furtividad y sus capacidades operativas asociadas, costaría alrededor de 10 veces menos que el precio actual de la F-22, es decir, un precio prácticamente equivalente al coste del F-16 Fighting Falcon.

---

<sup>12</sup>El efecto del coeficiente variable dummy en la variable dependiente se interpreta como el cambio porcentual en el precio de la inclusión de tales características. Este impacto se calcula como  $100 \times [\exp(\beta_i) - 1]$ , donde  $\beta_i$  es el valor estimado del coeficiente de la variable ficticia.



Aunque este no es el objetivo de nuestro estudio, los residuos obtenidos de las regresiones hedónicas tienen una interpretación económica, puesto que indican la diferencia entre el precio observado de un modelo particular y el precio predicho, es decir, estarían indicando la rentabilidad precio/capacidad operativa de cada uno de los modelos de caza analizados. Dado que el modelo ha sido estimado en forma logarítmica, el residuo indicaría la diferencia, en términos porcentuales, entre el precio observado y el predicho en función de las características del avión. Un valor positivo del residuo indicaría que existe un sobreprecio para un modelo particular, dados los precios implícitos de sus características. Por el contrario, un valor negativo del residuo haría referencia a un modelo con un precio inferior al que debería tener en función de sus características. El valor del residuo detallado por modelo aparece en el apéndice A.2. Los aviones de caza más baratos han sido la serie F-80 Shooting Star (que además fué el primer avión de caza a reacción operativo de los Estados Unidos), y en particular la versión F-80C, que fue un 81% más barata que lo que indicaría el precio implícito de sus características. Otro modelo que fue especialmente barato en relación a sus capacidades fue la serie F-4 Phantom II, teniendo un precio un 70-80% inferior al esperado. Otros modelos también con precios inferiores fueron el F-86 Sabre y el F-100 Super Sabre.

Por el contrario, los aviones más caros en relación a sus prestaciones, han sido el F-84F, el F-104B, el F-105B y el AV-8B, aviones que presentan diferentes características que hacen que su precio sea elevado, en términos relativos, respecto a sus características técnicas y a sus capacidades operativas. El F-84F Thunderstreak era un avión claramente diferente respecto a los anteriores modelos F-84 Thunderjet. Sin embargo, mantuvo la asignación F-84 debido a que en principio se esperaba que este caza fuese una mejora a precio reducido con alas en flecha, de los F-84 Thunderjet, que tenían alas rectas. De hecho, tal y como apunta Knaack (1978), inicialmente se estimó que el 55% de los componentes serían comunes para ambas series de aviones. Por último, el caso del AV-8B Harrier II es más claro, dadas las características particulares de este caza, siendo un avión VSTOL (vertical-

short takeoff and landing). Dado que únicamente disponemos de un modelo con esta características, no ha sido incluida con tal en las estimaciones, por lo que el sobreprecio observado, en este caso, se debe a dicha capacidad única en la muestra a este modelo.

Finalmente, por lo que respecta a los últimos modelos de quinta generación, obtenemos que el F-22A resulta un 16% más barato (a pesar de su elevado precio) respecto al que debería tener dadas sus características, mientras que por el contrario el último modelo, el F-35A resulta ser un 16% más caro, si bien en este último caso la estimación no es exacta debido a que el precio considerado no se corresponde a la unidad número 100, al ser un modelo que se encuentra actualmente en fase de producción inicial.

## 2.6 Discusión de los resultados

Diferentes autores han puesto de manifiesto el importante aumento en el coste que han experimentado los equipos militares a lo largo del tiempo. Así, por ejemplo, Arena et al. (2008) muestran que las tasas de crecimiento anuales en los precios de adquisición de los aviones militares han superado los índices de inflación comunes, tales como el Índice de Precios al Consumidor, el deflactor del Producto Interior Bruto y el deflactor de adquisiciones del Departamento de Defensa de Estados Unidos. No obstante, del análisis realizado anteriormente resulta que el aumento estimado en el precio "real" de los aviones de caza a reacción, una vez ajustado por los cambios en la calidad, ha sido de tan sólo el 2,5% por año, una cifra muy inferior a la tasa de inflación general (alrededor del 4% de media para todo el período), cuando se tiene en cuenta los cambios técnicos y de rendimiento de las aeronaves. Este resultado refleja que el aumento de los costes en los aviones de caza a reacción se debe enteramente al progreso tecnológico incorporado ya que el precio ajustado por calidad ha experimentado aumentos inferiores a los índices de precios generales.

La tecnología utilizada en la industria aeronáutica está lejos de generar una

reducción general en los precios de los aviones de caza a reacción tal como ocurre en otros sectores, como las telecomunicaciones o la informática, donde los precios reales (ajustados por calidad) están disminuyendo de forma progresiva. Esto puede ser debido al hecho de que los aviones caza a reacción son un producto muy complejo, resultante de la combinación de multitud de diferentes dispositivos de alta tecnología. En cualquier caso, el precio ajustado a la calidad ha aumentado a un ritmo moderado.

El aumento de los costes observados en los aviones de caza producidos por los Estados Unidos es una consecuencia directa de las especificaciones requeridas por el Departamento de Defensa. La superioridad aérea requiere aviones más avanzados en comparación con los disponibles por parte de los posibles enemigos. Tal y como señalan Keegan (1993) y Kirkpatrick (2004), la calidad de los sistemas de armas tienen una importancia fundamental en los resultados de las batallas, lo que conduce a los diferentes países al desarrollo de nuevos equipos de defensa más avanzados tecnológicamente. En este sentido, resulta comprensible el aumento de las especificaciones técnicas y operativas requeridas para los nuevos aviones de caza, si bien ello lleva aparejado un incremento en los costes y, en muchos casos, una disminución en el número de unidades que pueden ser adquiridas.

Los resultados obtenidos anteriormente pueden ser interpretados desde otro punto de vista. El parámetro estimado positivo de la tendencia en el tiempo significa que el precio de los aviones de caza muestra una tendencia al alza, pero a una velocidad más baja que la correspondiente a los índices de precios generales. Esto significa que si el progreso tecnológico de los aviones de caza a reacción fuese cero, estos equipos serían más baratos con el tiempo en dólares constantes. Sin embargo, la necesidad de producir aviones más avanzados tecnológicamente y con niveles más altos de rendimiento respecto a modelos anteriores, implica que los aviones de combate serán más caros con el tiempo. Este punto es especialmente importante, dado que el progreso tecnológico estimado incorporado en los aviones caza a reacción es, en promedio, un 10% por año. Como esta cifra es mucho

mayor que el crecimiento de la producción de la economía o para el crecimiento del presupuesto del gobierno o, más específicamente, con el crecimiento del presupuesto de la defensa, la consecuencia directa de este avance tecnológico es que un menor número de unidades de aviones de caza pueden ser adquiridos, aún maneniendo un presupuesto en relación a la producción constante para la adquisición de estos equipos. Como ejemplo reciente, baste comprobar el número de F-22 Raptor adquiridos por la Fuerza Aérea de los EE.UU. (menos de 200 unidades), lo que parece confirmar nuestros resultados.

Los resultados obtenidos en el análisis anterior se pueden comparar con los previamente obtenidos en la literatura relacionada. Hasta donde sabemos sólo unos pocos trabajos analizan el cambio tecnológico en el avión caza a reacción, pero todos ellos usan la primera fecha del vuelo (enfoque TOA) como el indicador de la tecnología. El primer intento de medir la evolución del progreso tecnológico en los aviones de combate es el llevado a cabo por Stanley y Miller (1979). Estos autores aplicaron el método de regresión de tiempo (TOA), desarrollado por Alexander y Nelson (1973) con el objeto de medir el cambio tecnológico en los aviones de caza a reacción producidos por los Estados Unidos. Estos autores consideran un conjunto de 39 aviones de caza a reacción que fueron desarrollados durante el período 1944-1979. Como características del componente tecnológico de estos equipos utilizan las variables potencia específica, factor de carga sostenido, rango de Breguet y la capacidad de carga útil. También utilizan un conjunto de datos con 13 aviones de combate soviéticos con el fin de comparar el avance de la tecnología de los aviones de caza de ambos países. El principal resultado que obtienen es que ni los EE.UU. ni la Unión Soviética presentan una ventaja dominante a largo plazo en la tecnología básica asociada a la producción de aviones de caza. Sólo a mediados de la década de 1950, los EE.UU. han disfrutado de una breve ventaja gracias al desarrollo de los cazas que conformaron la Serie Centenaria (F-100 a F-106). Sus resultados también sugieren una disminución en la tasa de mejora en la tecnología básica vehículo aéreo, medido por las cuatro características consideradas (a pesar de que no tienen en

cuenta la evolución de los sistemas de aviónica y armamento). En concreto, calculan que podría tomar de dos a cinco veces más tiempo para hacer una mejora absoluta en un avión como el F-15 para obtener una diferencia de rendimiento comparable a la existente entre el F-4 y F-15.

Martino (1993) también estudia el cambio tecnológico en el avión jet de combate EE.UU. (1944-1982), utilizando dos métodos alternativos: el modelo de puntuación o *scoring* y el método de regresión del tiempo de aparición (TOA). Martino (1993) utiliza sólo cuatro variables (de las 17 posibles variables inicialmente consideradas) de características para representar el nivel tecnológico de los aviones caza a reacción, diferentes a las utilizadas por Stanley y Miller (1979), excepto una. Estas cuatro variables son: velocidad máxima, el tiempo medio entre fallos, carga útil, y rango de los misiles BVR (*Beyond Visual Range*). El uso de este pequeño conjunto de variables se justifica por el número limitado de observaciones (modelos de aviones) y la alta correlación entre las variables potenciales de características. Inman et al. (1996), utilizando la base de datos de Martino (1993), aplican la técnica del análisis envolvente de datos (DEA) para predecir el primer vuelo del avión de combate para el período 1960-1982, obteniendo resultados similares a los de Martino (1993), si bien de nuevo aparecen diferencias destacadas respecto a nuestro análisis.

## 2.7 Conclusiones

El progreso tecnológico es el factor impulsor clave a la hora de explicar el crecimiento de la producción en el largo plazo. Un componente importante del proceso tecnológico general es el progreso técnico incorporado en los equipos de capital que a través del proceso inversor se incorporan a las actividades productivas. Esto es particularmente cierto en algunos equipos de alta tecnología, que presentan prestaciones muy elevadas respecto a esos mismos equipos de generaciones anteriores. En el caso de los equipos de defensa, las capacidades técnicas y operativas de los nuevos equipos son muy superiores a los equipos a los que sustituyen.

Por otra parte, la escalada de precios de los aviones de caza a reacción ha sido muy importante, convirtiéndose en un equipo de defensa muy caro. Esta tendencia en el precio de los aviones de caza se ha considerado como insostenible, y con consecuencias dramáticas para los presupuestos de defensa. En efecto, el derecho de Agustín afirmó que el costo unitario de los aviones de combate está aumentando a un ritmo exponencial con el tiempo, pero este patrón refleja el progreso tecnológico incorporado en los aviones jet de combate.

La principal conclusión derivada del análisis anterior es que la escalada de precios de los aviones caza a reacción es debido al aumento en el rendimiento sólo. Incremento de los precios ajustados por calidad de la caza a reacción ha sido, en promedio, un 2,5%, una cifra por debajo de las medidas de inflación estándar. Este resultado no contradice la ley de Agustín, pero muestra que el aumento de precios se debe enteramente a los avances tecnológicos incorporados en aviones de caza a reacción. Nuestro progreso tecnológico estimado de aviones de combate de EE.UU. es, en promedio, alrededor del 10% por año.

La conclusión general más importante que se deriva del análisis realizado es que conseguir la superioridad aérea tiene un coste económico que puede ser muy elevado, provocado por el intenso proceso de progreso tecnológico que experimentan los aviones de combate tácticos. Dadas nuestras estimaciones, la disponibilidad de un menor número de aviones de caza que en el pasado parece ser la única opción para los EE.UU., y para el resto de países si quieren disponer de los últimos modelos más avanzados. Este pequeño número de unidades debe ser compensada por la capacidad de rendimiento más altas de nuevos modelos. La investigación adicional estimar los precios ajustados a la calidad de los distintos componentes (fuselaje, motores, aviónica, armamento) de aviones caza a reacción sería de gran interés, con el fin de estimar el progreso tecnológico de cada uno de estos componentes y su tendencia en el precio final de las distintas aeronaves.

## 2.8 Apéndice A.1: Descripción de los datos

Tabla A.1.1: Aviones de caza a reacción por generación

Generación	Modelos	Fecha Primer Vuelo	Características
Primera	P/F-80A/B/C Shooting Star	1944	Velocidad subsónica
	F-84B/C/D/E/G Thunderjet	1946	Cohetes no guiados
	F-86A/E/D/F/H/K/L Sabre	1947	Alas rectas/en flecha
	F-94A/B/C Starfire	1949	Radar de corto alcance
	F-84F Thunderstreak	1950	
	F-89C/D/H Scorpion	1951	
Segunda	F-100A/C/D/F Super Sabre	1953	Misiles aire-aire infrarrojos
	F-101A/B/C Voodoo	1954	Aleaciones de aluminio
	F-102A Delta Dagger	1954	Alas en delta
	F-104A/B/C/G Starfighter	1956	Radar de largo alcance
	F-105B/D/F Thunderchief	1956	
	F-106A Delta Dart	1957	
Tercera	F-4C/D/E Phantom II	1963	Velocidad supersónica
	F-5A/B Freedom Fighter	1963	Misiles guiados por radar
	F-111A/B Aardvark	1965	Alas de geometría variable
	F-5E/F Tiger II	1972	
Cuarta	F-14A/B/D Tomcat	1972	Alta agilidad
	F-15A/C Eagle	1972	Fusión de sensores
	AV-8 Harrier II	1978	Combate BVR
	F/A-18 Hornet	1978	Controles electrónicos avanzados
	F-16A/C Fighting Falcon	1979	Radar Pulse-Doppler
	F15E Strike Eagle	1987	Radar AESA
	F/A-18E/F Super Hornet	1995	
Quinta	F-22 Raptor	1997	Bajo perfil radar
	F-35 Lightning II	2007	Agilidad extrema Aviónica integrada



Tabla A.1.2: Año de introducción de las principales características

Característica técnica/operativa	Año de introducción
Repostaje en vuelo	1946
Alas en flecha	1947
Posquemadores	1949
Velocidad supersónica	1953
Alas en delta	1953
Combate BVR	1954
Radar de impulsos Doppler	1958
Aleaciones de titanio	1958
Alas de geometría variable	1964
Empuje vectorial (VTOL)	1968
Controles de vuelo Fly-by-wire	1972
Radar AESA	1973
Empuje vectorial 2D	1988
Empuje vectorial 3D	1990
Velocidad supersónica sostenida	1994
Capacidad furtiva	1997

## 2.9 Apéndice A.2: Residuos del modelo (sobreevaluación o infravaloración estimada en el precio de cada aparato)

Tabla A.2.1: Diferencia porcentual entre el precio observado y el predicho

Modelo	Residuos (porcentaje)
P-80/F-80A Shooting Star	-30,83
F-84B	-0,75
F-80B	-43,40
F-86A	-19,91
F-84C	2,34
F-80C	-80,76
F-84D	9,64
F-94A	37,57
F-84E	-3,29
F-84F	77,17
F-86E	-9,09
F-86D	-13,49
F-84G	8,32
F-89C	-6,68
F-94B	-26,19
F-86F	-34,03
F-89D	-3,23
F-94C	27,06
F-86H	20,92
F-100A	10,38
F-86K	8,47
F-101A	27,72
F-102A	36,37

Tabla A.2.1 (cont.): Diferencia porcentual entre el precio observado y el predicho

Modelo	Residuos (porcentaje)
F-86L	-27,66
F-89H	10,09
F-100C	-45,02
F-104A	53,83
F-100D	-41,69
F-105B	85,73
F-101C	-18,88
F-101B	1,25
F-100F	-40,32
F-104B	86,29
F-106A	51,74
F-104C	27,80
F-105D	-29,57
F-104G	-21,31
F-105F	-40,79
F-4C	-73,06
F-5A	-2,49
F-5B	28,36
F-4D	-89,60
F-111A	47,91
F-111B	42,80
F-4E	-73,46
F-111F	21,37

Tabla A.2.1 (cont.): Diferencia porcentual entre el precio observado y el predicho

Modelo	Residuos (porcentaje)
F-5E	52,37
F-14A	18,69
F-15A	6,57
AV-8B	88,17
F/A-18A	9,96
F-16A	-29,70
F-16C	-13,73
F-15C	-13,06
F-14B	-21,28
F-14A	18,69
F-15A	6,57
AV-8B	88,17
F/A-18A	9,96
F-16A	-29,70
F-16C	-13,73
F-15C	-13,06
F-14B	-21,28
F/A-18C	-18,40
F-15E	-35,48
F-14D	5,35
F/A-18E	2,90
F-22A	-16,67
F-35A	16,67

## Capítulo 3

# Tendencias tecnológicas en los aviones de caza a reacción: Una comparación entre los cazas de Estados Unidos y de la Unión Soviética/Rusia

### 3.1 Introducción

En el capítulo anterior hemos llevado a cabo un análisis con el objetivo de medir, en términos cuantitativos, el progreso tecnológico de los aviones de caza a reacción de los Estados Unidos, usando para ello el enfoque de los precios hedónicos, el cuál nos ha permitido obtener una medida del precio de los equipos corregido por la calidad. En este capítulo<sup>1</sup> realizaremos un estudio sobre tendencias tecnológicas en

---

<sup>1</sup>Un versión de este capítulo, con el título "Measuring technological trends: A comparison between U.S. and U.S.S.R./Russian jet fighter aircraft" ha sido publicado en la revista *Technological Forecasting and Social Change*, 87, 125-134, (2014).

el desarrollo de aviones de caza a reacción, usando una metodología alternativa, a través del análisis de la relación entre la fecha de disponibilidad de un determinado equipo (en nuestro caso un modelo particular de avión de caza) y las propiedades evolutivas, tanto de carácter técnico como en términos de las capacidades operativas, de dicho equipo, método desarrollado por Alexander y Nelson (1973) para estudiar las tendencias tecnológicas en la fabricación de motores a reacción y que es uno de los métodos más utilizados en la literatura para determinar el progreso tecnológico en una amplia variedad de equipos. La principal aportación de este capítulo a la literatura consiste en utilizar dicho enfoque para estimar la tendencia tecnológica de la industria a nivel global, así como realizar comparaciones entre los avances tecnológicos alcanzados por las industrias de diferentes países.

Este tipo de análisis no mide el progreso tecnológico en términos cuantitativos, pero permite estimar la tendencia tecnológica general de la industria como una función del tiempo y determinar la posición de cada equipo en particular respecto a dicha tendencia general. De este modo podemos determinar la posición de cada avión de caza con respecto a la tendencia tecnológica de la industria. Por otra parte, este método tiene la utilidad de comparar el nivel tecnológico entre los diferentes aviones de caza desarrollados por las distintas industrias, lo cual resulta de especial utilidad para medir la trayectoria técnica alcanzada por los diferentes cazas desarrollados por distintos países. Así, en este capítulo vamos a estimar la tendencia tecnológica general de la industria con el objetivo de medir los avances en la capacidad y en las características técnicas de los aviones diseñados en los Estados Unidos frente a los diseñados en la Unión Soviética/Rusia. Si bien existen otros países en los cuales se ha desarrollado una industria aeronáutica capaz de diseñar y fabricar aviones de caza a reacción avanzados, tales como Francia, el Reino Unido, Suecia o China, indudablemente los dos países que han estado en la frontera tecnológica en esta industria han sido los Estados Unidos y la Unión Soviética/Rusia, siendo las industrias aeroespaciales de estos dos países las más desarrolladas durante el periodo analizado.

Desde un punto de vista cualitativo, existen pocas dudas que desde el final de la 2ª Guerra Mundial y la aparición de los primeros aviones de caza a reacción al final de la misma con capacidades operativas y técnicas muy superiores a los aviones de caza con motor de pistón, los avances, tanto en términos de características técnicas como en las capacidades operativas de estos aviones ha sido muy significativo. Basta comparar los primeros aviones de combate a reacción operativos de finales de la 2ª Guerra Mundial con los últimos diseños de principios del siglo XXI. Los resultados obtenidos en el capítulo anterior para el caso concreto de los aviones diseñados en Estados Unidos ponen claramente de manifiesto dicho progreso tecnológico y su importancia en términos cuantitativos. Además, dicho avance ha sido fomentado de forma importante por la rivalidad que ha existido entre los Estados Unidos y la Unión Soviética desde el comienzo de la guerra fría y del deseo por parte de los gobiernos de ambos países de conseguir la superioridad aérea. En este contexto, el objetivo principal de este capítulo es el de comparar la tecnología de los aviones de caza a reacción de los Estados Unidos y de la Unión Soviética y Rusia como heredera de la industria aeronáutica de la anterior. Este análisis lo realizamos desde el comienzo de la era de los aviones a reacción al final de la 2ª Guerra Mundial hasta la actualidad, a través de la medición de las tendencias tecnológicas de la industria en ambos países, lo que nos permitirá su comparación y detectar posibles ventajas tecnológicas en el poder aéreo entre ambos países.

Este análisis tiene importantes implicaciones desde diferentes puntos de vista y puede resultar de gran interés para los analistas de defensa, los gobiernos y la industria aeronáutica. Todos estos agentes tienen como preocupación conocer cuál es el avance tecnológico de los aviones de caza a reacción para poder así conocer sus potenciales amenazas. En primer lugar, el análisis que realizamos en este capítulo puede ser utilizado para medir, en términos temporales, cuándo un nuevo avión de caza, que cumpla determinadas especificaciones, se espera realice su primer vuelo. En particular, puede ser usado para predecir, cuándo realizará el primer vuelo un avión de caza de sexta generación. En segundo lugar, puede ser usado para medir el

nivel tecnológico de los enemigos potenciales y predecir cuando el enemigo potencial alcanzará un determinado nivel tecnológico en relación a estos equipos. Como ha puesto claramente de manifiesto Martino (1985), la mayor preocupación del gobierno y de los responsables de la defensa nacional es conocer si la tecnología de la que se dispone está "por delante" o "por detrás" y en cuanto, respecto a las potenciales amenazas. De hecho, este es el principal objetivo que se persigue en este capítulo, al medir la tendencia tecnológica de los Estados Unidos versus la Unión Soviética/Rusia y cuantificar las posibles diferencias que han existido a lo largo del tiempo, así como la situación actual. Por último, el análisis realizado también puede ser de gran utilidad para conocer si los avances tecnológicos alcanzados durante la etapa de la existencia de la Unión Soviética se mantienen en la industria aeronáutica de Rusia, como heredera de dicha industria después del colapso de la Unión Soviética.

Desde la finalización de la 2ª Guerra Mundial, los aviones de caza de los Estados Unidos y de la Unión Soviética/Rusia se han enfrentado entre ellos en un determinado número de conflictos. No obstante, excepto en los casos de las guerras de Corea y Vietnam, en la mayoría de los casos estos combates han sido asimétricos, principalmente debido a diferencias en la formación de los pilotos, las tácticas o la implicación de aviones de diferente generación y en muchos casos obsoletos, por lo que poca o ninguna información puede extraerse del resultado de estos combates en relación a la calidad de los aviones. Aunque la formación de los pilotos juegan un papel determinante en el resultado de los combates aéreos, sin duda la calidad de los aviones también tiene gran importancia en dicho resultado. Tal y como indica Kirkpatrick (2004), el resultado de las batallas depende de la interacción de diferentes factores, como la combinación de diferentes sistemas de armas, la capacidad de los comandantes, las tácticas y las doctrinas, pero lo que resulta evidente es que aquellas fuerzas que acuden al combate con equipos obsoletos o menos avanzados que el enemigo sufrirán mayores pérdidas. En otras palabras, la victoria no solo depende de la formación y valentía de los soldados, sino que también viene condicionada de forma importante por la calidad de sus armas. Keegan (1993)



muestra que una de las lecciones que podemos extraer de la historia militar es que cuando hombres equivalentes luchan entre ellos, aquel que disponga de las mejores armas resultará el vencedor.

En este capítulo adoptamos el punto de vista, ampliamente aceptado en la literatura sobre el tema, de que el cambio tecnológico puede ser medido en términos de variaciones en la calidad de los productos, en función de sus características técnicas y de funcionamiento. En particular, en este capítulo vamos a usar el método desarrollado por Alexander y Nelson (1973), que consiste en estimar la relación entre la fecha del primer vuelo (first flight date, FFD) o la fecha en la que está disponible (time of arrival, TOA) de un equipo particular, como una función de sus características técnicas y de funcionamiento. Aunque este método ha recibido algunas críticas, básicamente porque no supone una medida cuantitativa del progreso tecnológico, resulta un método extremadamente útil para comparar las tendencias tecnológicas de los Estados Unidos respecto a la Unión Soviética/Rusia, en lo que se refiere a la industria de aviones de caza a reacción.

Para realizar nuestro análisis hemos construido una base de datos que incluye todos los aviones de caza a reacción diseñados y fabricados en los Estados Unidos y en la Unión Soviética/Rusia, desde el año 1944 hasta nuestros días. Dicha base de datos incluye las principales propiedades técnicas y operativas de cada uno de los diferentes modelos, incluyendo al mismo tiempo todas las versiones de los aviones de caza. A partir de la estimación de la relación entre la fecha del primer vuelo de cada modelo y del conjunto de características del mismo, podemos obtener una medida del progreso tecnológico en esta industria para poder delimitar la posición de cada modelo en particular con respecto a la tendencia general que sigue la industria en ambos países. El modelo se estima conjuntamente para todos los aviones de ambos países, con objeto de que la comparación tecnológica sea homogénea y con el fin de detectar la posible existencia de una ventaja tecnológica de un país frente al otro.

Los resultados obtenidos indican que, en términos generales, la tecnología de los aviones de caza a reacción de los Estados Unidos está por delante de los

modelos desarrollados por la industria aeronáutica de la Unión Soviética/Rusia. En particular, en media durante todo el periodo 1944-2010, la diferencia se sitúa en torno a 2 años, favorable para los Estados Unidos. No obstante, esta ventaja media de los Estados Unidos en cuanto a tecnología de los cazas no se ha mantenido de forma permanente durante el periodo considerado y, dependiendo del desarrollo de modelos particulares, la ventaja tecnológica se ha movido de un país al otro. Sin embargo, la ventaja de la Unión Soviética/Rusia ha sido más limitada y ha sido rápidamente neutralizada por la industria de los Estados Unidos. Esta ventaja tecnológica media de los Estados Unidos estimada para el conjunto del periodo estudiado ha sido debida fundamentalmente al desarrollo de los aviones que conformaron la Serie 100, al F-14A Tomcat, al F-15A Eagle y, principalmente, al desarrollo e introducción del F-22A Raptor, que supone un punto de inflexión en la diferencia tecnológica entre la industria de los Estados Unidos y la de Rusia. En concreto, con el desarrollo del primer caza de 5ª generación, el F-22 Raptor, la tecnología norteamericana en la producción de aviones de caza se situó en torno a 20 años por delante de la equivalente rusa, una brecha entre ambos países que nunca se había alcanzado en el pasado. Este hecho arroja serias dudas respecto a que en la actualidad la industria aeronáutica derivada de la antigua Unión Soviética, y en particular la de aviones de caza, ahora en manos de Rusia, sea capaz de mantener y seguir progresando en los avances, con respecto a la norteamericana.

La estructura del resto del capítulo es la siguiente. En la segunda sección vamos a proceder a describir brevemente los diferentes métodos desarrollados por la literatura para medir y predecir el cambio tecnológico, centrándonos en el método que vamos a utilizar para cuantificar y comparar las tendencias tecnológicas de los aviones de caza a reacción en Estados Unidos y la Unión Soviética/Rusia. La sección tercera muestra la base de datos y la selección de las variables que representan el estado de la tecnología de estos equipos. La sección cuarta presenta los principales resultados derivados de la estimación de la tendencia tecnológica. Una discusión de los resultados y las implicaciones en términos de diferencias tecnológicas entre

ambos países se realiza en la sección 5. Finalmente, la sexta sección presenta las principales conclusiones que se derivan del análisis realizado.

## 3.2 Medición de la tecnología en los aviones de caza a reacción

El estado de las artes (*The State of the Art*, SOA, en su acepción anglosajona) respecto a la tecnología de un determinado equipo puede ser definida a través de la medición del conjunto de características que presenta dicho equipo. La idea básica de partida es que el resultado que se obtiene del uso de un determinado equipo depende de un vector de características tanto de tipo técnico como de funcionamiento u operativas. Solo en casos muy concretos y en equipos relativamente simples, el nivel tecnológico puede ser medido a través de una única característica, ya sea técnica u operativa. En la práctica, la mayoría de equipos presentan un elevado grado de complejidad, siendo el resultado de la combinación de un elevado número de diferentes componentes, por lo que la tecnología incorporada en los mismos depende de un número más o menos elevado de características lo que dificulta la medición cuantitativa de su nivel tecnológico. El problema en este caso consiste en cómo combinar dicho conjunto de características en una única variable que refleje dicho nivel tecnológico.

Para proceder a medir el nivel tecnológico de equipos complejos, partimos del supuesto que cualquier variedad de un determinado equipo puede ser representado con un conjunto de sus características y que la calidad de dicho equipo (en términos de sus capacidades operativas) es una función de dichas características:

$$Q_i = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.1)$$

donde  $Q_i$  es la calidad del equipo  $i$ , y  $x_j$ ,  $j = 1, \dots, n$ , hace referencia al conjunto de características de dicho equipo. Dicho índice de calidad puede ser definido

para un determinado periodo de tiempo, por lo que sería posible determinar su evolución temporal. En términos generales, el cambio tecnológico vendría dado por el cambio en el índice de calidad a lo largo de un periodo, en el caso en el que las características del equipo no permanezca constantes a lo largo del tiempo. Para una correcta medición del cambio tecnológico, se hace necesario distinguir entre avances en el producto a lo largo del tiempo de meros cambios en la combinación que conforman el producto. Cambios en el conjunto de atributos que conforman el producto simplemente reflejan la existencia de un trade-off entre los distintos elementos técnicos que configuran el mismo, resultando que un mismo nivel tecnológico puede estar compuesto con diferentes combinaciones de características alternativas. Por el contrario, cambios en la relación entre las características alternativas estaría reflejando la existencia de progreso tecnológico. Por tanto, el progreso tecnológico lo podemos definir como una mejora en algunas de las características técnicas o de funcionamiento del producto sin que esto suponga una disminución en la calidad del resto de características.

En la literatura relacionada encontramos un amplio conjunto de métodos alternativos que tienen como objetivo cuantificar la relación existente entre la calidad de un producto y el conjunto de características que definen dicho producto y, a través de la misma, medir los cambios tecnológicos que se producen como consecuencia de la variación en el indicador de calidad. Estos métodos alternativos incluyen el análisis de componentes principales, métodos frontera o DEA (*Data Envelopment Analysis*), modelos de *scoring*, regresiones de la fecha de disponibilidad, regresión de precios hedónicos, etc.<sup>2</sup>

Un enfoque ampliamente utilizado en la literatura es el desarrollado por Alexander y Nelson (1973), que consiste en relacionar la fecha de disponibilidad de una determinada tecnología con sus características técnicas y de funcionamiento. La idea básica consiste en estimar una ecuación en la cual el tiempo de aparición

---

<sup>2</sup>Para una revisión de los diferentes métodos usados en la literatura para la medición de la tecnología que se ha venido a denominar "*Technometrics*", véase Coccia (2005).

o de disponibilidad de un determinado equipo es la variable dependiente que define la tendencia tecnológica en la fabricación de dicho equipo. Bajo este enfoque, la ecuación tecnológica puede ser definida como:

$$T_i = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.2)$$

donde  $T_i$  es el tiempo en el cual está disponible un nuevo equipo  $i$ . En nuestro caso de estudio, dicha regresión será estimada tal que relacione el tiempo de aparición de un nuevo modelo de avión, usando para ello la fecha de su primer vuelo (FPV) como una medida de la tecnología disponible en dicho momento. La fecha de disponibilidad de un nuevo diseño de avión es una variable proxy del estado de las artes en la fabricación de estos equipos, midiendo la calidad del producto sin la necesidad de una cuantificación del nivel tecnológico incorporado en el mismo. A partir de la estimación cuantitativa de la anterior regresión es posible comparar el nivel tecnológico alcanzado por los diferentes modelos de avión y calcular la tasa de progreso tecnológico a lo largo del tiempo. De este modo, la estimación de los coeficientes asociados a las características técnicas y de funcionamiento dan lugar a una medida de la tendencia general de la tecnología asociada a estos equipos a lo largo del tiempo. De forma adicional, los valores estimados para los distintos parámetros considerados pueden ser usados para predecir la fecha de disponibilidad de un determinado equipo con una características determinadas bajo el supuesto de que sigue la tendencia general tecnológica de estos equipos, al tiempo que permite clasificar cada uno de los modelos de aviones que se han desarrollado a lo largo del tiempo en función de su posición respecto a dicha tendencia tecnológica general.

La ecuación de tecnología como función del tiempo de disponibilidad fue inicialmente aplicada al estudio de la evolución tecnológica de los motores de turbinas de los aviones por Alexander y Nelson (1973). Estos autores estiman una regresión con objeto de caracterizar la superficie multidimensional que representa la existencia de un trade-off entre los distintos parámetros que reflejan características tecnológicas de los motores de turbina para aviones, así como los movimientos a

lo largo del tiempo de dicha relación, la cual reflejaría el progreso tecnológico de esta industria. A partir de este trabajo inicial, este método ha sido aplicado a una gran cantidad de bienes de equipo para medir la tendencia tecnológica. Para el caso concreto de la industria aeronáutica, este análisis ha sido aplicado por Hutzler, Nelson, Pei y Francisco (1985) los cuales utilizan este método para determinar la tendencia tecnológica en diferentes tipos de motores para aviones y misiles. Martino (1985) aplica este método para medir el cambio tecnológico en barcos tipo "*clipper*", motores de aviones, aviones y transistores.

Martino (1985) apunta a que el peso total al despege de un avión es una medida adecuada para determinar el estado de las artes incorporados en dicho equipo, si bien este mismo autor reconoce que esta medida es incompleta y no refleja todos los aspectos de la tecnología implícita en los mismos. A pesar de que esta variable puede reflejar en gran parte el componente tecnológico de un avión, en el caso de los aviones de combate de caza nos encontramos ante un producto de una muy elevada complejidad, con un gran número de características, tanto técnicas como de funcionamiento, que hace que el nivel tecnológico incorporado en estos aparatos no pueda ser medido con una única característica. En la literatura encontramos solo unos pocos trabajos que tengan como objetivo la medición del cambio tecnológico en los aviones de combate, y en especial, en el caso de los aviones de caza. El primer intento para medir el cambio tecnológico en los aviones de caza a reacción es el realizado por Stanley y Miller (1979) los cuales aplican el método de la regresión del tiempo de disponibilidad, desarrollado por Alexander y Nelson (1973), a los aviones de caza a reacción. Estos autores consideran una muestra que incluye a 39 aviones de caza a reacción de los Estados Unidos y 13 soviéticos, que han sido desarrollados durante el periodo 1944 a 1979. El objetivo de dicho estudio es poder comparar los avances tecnológicos en los cazas a reacción de ambos países. El resultado que obtienen es que, utilizando la tendencia tecnológica estimada para cada país por separado, no se observa ninguna ventaja de un país sobre el otro a largo plazo respecto a los avances tecnológicos incorporados a los aviones de caza a reacción

diseñados por ambas industrias. Únicamente durante los años centrales de la década de 1950 se observa una ventaja por parte de los Estados Unidos, aunque muy limitada en el tiempo, debida al desarrollo del conjunto de cazas que conformaron la denominada Serie Centenaria (del F-100 Super Sabre al F-106 Delta Dart). Sus resultados también apuntan a la existencia de una disminución en la velocidad a la que se producen mejoras tecnológicas en los aviones de caza a reacción, en términos de las cuatro características consideradas, si bien estos autores no consideran mejoras tanto en la aviónica como en los sistemas de armamento, que han experimentado importantes avances en el tiempo. Otro trabajo es el realizado por Martino (1993), el cual también analiza el progreso tecnológico en los aviones de caza a reacción de los Estados Unidos, para el periodo 1944 a 1982, usando dos métodos alternativos: el modelo de *Scoring* y la regresión temporal. Más recientemente, Inman, Anderson y Harmon (2006), usando la base de datos de Martino (1993), aplican la técnica envolvente de datos para predecir la fecha del primer vuelo de los aviones de caza a reacción para el periodo 1960-1982.

### 3.3 Datos y variables

La base de datos construida para llevar a cabo el análisis incluye todos los aviones de caza a reacción fabricados por los Estados Unidos (tanto desarrollos de la Fuerza Aérea, USAF, como de la Marina, U.S. Navy) y por la Unión Soviética/Rusia, y cuyo primer vuelo tuvo lugar durante el periodo 1944-2010. El número total de aviones de caza incluidos en la base de datos es de 136 en conjunto para los dos países, dentro de los cuales consideramos una variedad de versiones de los diferentes modelos desarrollados. Del total, 89 son cazas desarrollados por los Estados Unidos y 47 son modelos desarrollados por la Unión Soviética/Rusia. En la práctica, nos encontramos con una gran cantidad de variantes de los diferentes modelos de aviones de caza desarrollados. Algunas variantes presentan solo algunos cambios relativamente menores en la configuración del avión, como por ejemplo en el motor,

mientras que otras variantes suponen cambios profundos y muy generales respecto al diseño original y que suponen importantes variaciones en sus prestaciones operativas. En nuestro caso, solo aquellas versiones que muestren cambios significativos con respecto al diseño original, tanto en términos técnicos como operativos, han sido incluidas en la base de datos. Aquellos diseños que presentan cambios menores en las especificaciones técnicas o cambios que incluyen diferentes misiones de combate (como pueden ser versiones de reconocimiento), no han sido consideradas en el análisis.

La principal fuente de datos ha sido la publicación *The Encyclopedia of U.S. Air Force aircraft and missile systems* de Knaack (1978) y la publicación *U.S. Historical Military Aircraft and Missile Data* realizada por Nicholas y Rossi (1991) y *Jane's All the World's Aircraft* de Jackson, Munson y Peacock (2006) para el caso de los aviones de Estados Unidos y la publicación *The Osprey Encyclopedia of Russian aircraft* elaborada por Gunston (2000) para el caso de los cazas desarrollados por la Unión Soviética/Rusia. El primer caza incluido en la base de datos para los Estados Unidos es el F-80A Shooting Star (cuyo primer vuelo tuvo lugar en 1944) seguido del FH-1 Phantom (cuyo primer vuelo fue en 1945).<sup>3</sup> El caza de los Estados Unidos más reciente es el F-35 Lightning II, cuyo primer vuelo tuvo lugar en el año 2006. Por lo que respecta a los aviones de caza a reacción de la Unión Soviética/Rusia, el número de modelos es significativamente inferior al de los diseños norteamericanos (47 frente a 89). El primer avión de caza a reacción de la Unión Soviética fue el MiG-9 junto con el Yak-15, aviones que fueron desarrollados de forma simultánea y cuyo primer vuelo tuvo lugar en 1946. El último caza ruso considerado es el T-50 PAK FA, cuyo primer vuelo tuvo lugar en 2009.

La tabla 3.1 muestra el número total de aviones de caza incluidos en la base

---

<sup>3</sup>Estos dos modelos no son los primeros aviones de caza a reacción diseñados por los Estados Unidos. El primer avión a reacción norteamericano fue el P-59A Airacomet, cuyo primer vuelo tuvo lugar en octubre de 1942. No obstante, este avión no llegó a estar operativo y, por tanto, no ha sido incluido en el estudio.



de datos, distinguiendo entre nuevos diseños y refinamientos y clasificados usando la escala más extendida en términos de generaciones (en concreto, considerando 5 generaciones de cazas a reacción).<sup>4</sup> Un primer resultado que podemos destacar es que el número total de modelos (tanto para los nuevos diseños como para las versiones posteriores) es una función decreciente del tiempo, lo que posiblemente viene explicado por el aumento en la complejidad tecnológica de estos aviones, lo que da lugar a una escalada en los costes que influye negativamente en el número de desarrollos y a una mejor adaptabilidad de cada modelo para llevar a cabo diferentes misiones. La primera generación de aviones de caza a reacción, de acuerdo con la clasificación estándar, cubre el periodo que va desde 1944 hasta los primeros años de la década de los 1950, incluyendo un total de 54 modelos (41 norteamericanos y 13 soviéticos). Aunque los aviones pertenecientes a esta primer generación de cazas a reacción fueron desarrollados en un corto periodo de tiempo, incluye un número muy elevado de modelos, tanto nuevos diseños como refinamientos. La segunda generación de cazas a reacción incluye aquellos desarrollos realizados durante finales de los 50 y la década de los 60, con un total de 38 modelos (23 norteamericanos y 15 soviéticos). Más equilibrado entre ambos países es el número de modelos pertenecientes a la tercera y cuarta generación (11 norteamericanos y 10 soviéticos, y 12 norteamericanos y 8 soviéticos, respectivamente). Finalmente, solo tres modelos han sido considerados como pertenecientes a la quinta generación: Dos cazas norteamericanos (el F-22 Raptor y el F-35 Lightning II) y uno de Rusia (el T-50 PAK FA), si bien en el caso del F-35, su desarrollo incluye tres versiones con diferentes especificaciones y capacidades operativas.

---

<sup>4</sup>En términos generales, los cazas a reacción se clasifican en términos de generaciones. Aunque no hay un sistema de clasificación generalmente aceptado y, recientemente, aparece el uso de subgeneraciones, la escala más usada habitualmente es agrupar estos aviones en 5 generaciones.

**Tabla 3.1: Número de aviones de caza a reacción**

Generación	Estados Unidos			Unión Soviética/Rusia			Total
	Nuevos	Derivados	Total	Nuevos	Derivados	Total	
Primera	17	24	41	8	5	13	54
Segunda	10	13	23	7	8	15	38
Tercera	3	8	11	5	5	10	21
Cuarta	5	7	12	3	5	8	20
Quinta	2	0	2	1	0	1	3
Total	37	52	89	23	24	47	136

La selección de la variable dependiente que refleje la calidad de cada equipo, resulta el elemento fundamental para la medición de la tecnología. En este capítulo, vamos a utilizar el análisis desarrollado inicialmente por Alexander y Nelson (1973), estos autores definen la variable dependiente como la fecha en la cual un nivel tecnológico particular ha sido alcanzado, denominado TOA (*time of arrival*). De acuerdo con Stanley y Miller (1979) diferentes alternativas puede ser usadas para establecer dicha fecha en el caso de los aviones: la fecha del primer vuelo (*First Flight Date*, FFD), la fecha en la cual el equipo llega a la fase de producción (fecha de introducción), o la fecha en la que el equipo llega a la fase de operatividad (*Initial Operation Capability*), que correspondería a la fecha en la cual los equipos son entregados a un escuadrón. Siguiendo a Stanley y Miller (1979), en nuestro análisis seleccionamos como variable dependiente la fecha del primer vuelo de cada modelo de avión dado que, tal y como estos autores indican, esta medida de tecnología es la que menos problemas presenta a la hora de medir cuándo un equipo específico, en el caso de un vehículo aéreo, ha sido ensamblado y su tecnología se encuentra disponible, si bien esta medida no está exenta de problemas.<sup>5</sup>

<sup>5</sup>Durante el proceso de desarrollo de un nuevo avión encontramos diferentes etapas, desde la fase experimental, fase de prototipos, fase de desarrollo, hasta la fase de producción final. Desde la primera fase hasta la última el proceso puede ser muy dilatado en el tiempo, por lo que la fecha

Una vez definida la variable dependiente que refleja el nivel tecnológico alcanzado por la industria, el siguiente paso consiste en definir el conjunto de características que definen el nivel tecnológico incorporado en cada aparato. En un principio, el número de características a considerar depende de la complejidad del equipo. Las variables que definen el nivel tecnológico de un avión de caza pueden ser divididas en dos grandes grupos: parámetros de funcionamiento u operativos que representan la capacidad de un determinado modelo para llevar a cabo una misión específica y, parámetros técnicos, a partir de los cuales se derivan los parámetros de funcionamiento. En la práctica, estos dos conjuntos de variables son interdependientes, ya que las características de funcionamiento vienen derivadas de las características técnicas (véase, por ejemplo, Saviotti y Metcalfe, 1984). Stanley y Miller (1979) seleccionan las características que reflejan el nivel tecnológico de los aviones de caza, los correspondientes a sus capacidades operativas, no incluyendo variables relacionadas con la aviónica o con el armamento, es decir, variables de funcionamiento en lugar de variables técnicas, debido a su mejor representación del nivel tecnológico y de su utilidad militar. En nuestro estudio consideramos más adecuado el uso no solo de parámetros de funcionamiento sino también de parámetros técnicos, dado que los sistemas electrónicos suponen un elemento fundamental de las nuevas generaciones de aviones de caza y constituyen componentes en los cuales se han producido grandes avances tecnológicos. Así, Stanley y Miller (1979) consideran como variables explicativas de la fecha del primer vuelo la potencia específica, el factor de carga al que puede ser sometido un caza (*sustained load factor*), el rango de Breguet (calculado como la velocidad de crucero multiplicada por la duración de vuelo), la ratio de carga y la capacidad de elegida para referir la disponibilidad de esta tecnología puede tener importantes consecuencias en el resultado del análisis. Por ejemplo, la fecha del primer vuelo del XP-80 fue el 8 de enero de 1943. Por su parte, la fecha del primer vuelo del XP-80A fue el 1 de junio de 1944, casi un año y medio después, mientras que el primer vuelo del YP-80A tuvo lugar el 13 de septiembre de 1944. En nuestro caso, seleccionamos como fecha del primer vuelo del P-80A Shooting Star, como proxy de la fecha de disponibilidad de esta tecnología, el año 1944.

operar desde portaaviones. Por su parte, Martino (1985) considera como variables explicativas la velocidad máxima, el tiempo medio de vuelo entre averías, la carga y el rango de los misiles BVR (*Beyond Visual Range*). Las únicas variables comunes en los diferentes estudios son la velocidad máxima y la carga transportada. Dada la importancia de estas dos variables, también serán incluidas en nuestro análisis como variables proxies de las características de funcionamiento de estos equipos. Variables relacionadas con el armamento hay sido utilizada únicamente por Martino (1993), en términos del alcance de los misiles aire-aire más allá del rango visual, BVR.

La base de datos elaborada para nuestro estudio incluye un gran número de variables que reflejan características técnicas o de funcionamiento de los aviones de caza, tales como la velocidad máxima, el empuje de los motores, régimen de ascenso, techo de servicio, rango de combate, carga útil, pesos vacío y cargado, peso máximo al despegue, así como variables de carácter cualitativo que reflejan la aviónica. No obstante, la mayoría de estas variables presentan una elevada correlación entre ellas, indicando la existencia de una relación bien definida entre las principales características técnicas y de funcionamiento de los aviones de caza (véase Martino, 1993). Esto implica que el número de variables a incluir en la regresión para estimar la tecnología tiene que ser reducido con el objeto de evitar problemas de multicolinealidad. En síntesis, la regresión estimada incluye dos tipos de variables fundamentales. En primer lugar, parámetros de carácter técnico, que vienen representados por el empuje de los motores. De forma alternativa, podemos usar otras variables como la velocidad máxima, o la relación empuje/peso, si bien estas variables están altamente correlacionadas entre ellas. La segunda variable que utilizamos es un parámetro de funcionamiento, medido a través del régimen de ascenso. El régimen de ascenso a nivel del mar indica el exceso de potencia específica de un avión que está disponible para aumentar la altura o para cambiar la velocidad.

Los sistemas electrónicos suponen un componente esencial de la complejidad tecnológica de los aviones de caza modernos, de forma que una gran proporción del cambio tecnológico y del aumento de capacidades de los aviones de caza se debe a

la mejora en los sistemas electrónicos. De hecho, otras variables tecnológicas, como la velocidad, el techo de servicio, el rango de combate, etc., han aumentado a tasas cada vez más bajas, mientras que el aumento de capacidades operativas se debe en su mayor parte al importante progreso en los sistemas electrónicos incorporados en los cazas. No obstante, en los trabajos que estudian el progreso tecnológico de los aviones de caza no se incluye ninguna referencia a los sistemas electrónicos. En este estudio, incluimos un conjunto de variables ficticias adicionales, que reflejan las características técnicas relacionadas con la aviónica. En particular, definimos tres variables ficticias: Aviónica Básica, Aviónica Avanzada y Furtividad. La variable ficticia Aviónica Básica toma el valor 1 para los aviones agrupados en la tercera generación y para algunos modelos de la segunda generación, siendo cero para el resto. El objetivo de esta variable es capturar determinadas características, tales como el radar de largo alcance, misiles guiados por radar, etc. La variable Aviónica Avanzada toma el valor 1 para los aviones pertenecientes a la cuarta generación y cero para el resto, reflejando avances técnicos adicionales en los sistemas electrónicos, tales como la fusión de sensores, el combate BVR, radar AESA, controles de vuelo electrónicos avanzados, etc. Finalmente, la variable ficticia Furtividad toma el valor 1 solo para tres modelos clasificados como aviones de caza de quinta generación (el F-22A Raptor, el F-35 Lightning II y el T-50 PAK FA) tomando un valor de cero para el resto. Esta variable ficticia no solo refleja la capacidad furtiva (reducción del eco radar) de estos tres aviones, sino que incluye otras características técnicas que incorporan los aviones de quinta generación, tales como la maniobrabilidad extrema, el empuje vectorial, capacidad para volar a velocidades superiores a la del sonido de forma sostenida (*supercruising*), conexiones de datos avanzadas, etc.

Finalmente, la ecuación a estimar incluye una variable ficticia adicional reflejando el país, dado que estimamos de forma conjunta los aviones de caza producidos tanto por la industria estadounidense como por la industria soviética o, su heredera, Rusia. La inclusión de esta variable ficticia resulta crucial para el análisis de comparación entre ambos países, dado que será un indicador de la diferencia tecnológica que pueda

existir entre las industrias aeroespaciales de ambos países. Esta variable ficticia toma el valor 1 para los Estados Unidos y 0 para la Unión Soviética/Rusia. Dado que la variable dependiente es el tiempo (medido en años), un coeficiente estimado negativo para esta variable reflejaría que los aviones de caza de los Estados Unidos, están, en media para todo el periodo, tecnológicamente por delante de los aviones de caza producidos en la Unión Soviética/Rusia, indicando lo contrario en el caso de que dicho coeficiente estimado sea positivo. Al venir definida la variable dependiente en unidades de tiempo, un avance tecnológico se representa en términos de un menor tiempo de disponibilidad de un modelo de avión en particular. Por último, un coeficiente estimado no estadísticamente diferente de cero lo interpretaríamos como evidencia de que, en media sobre el periodo analizado, no se observan diferencias significativas entre el funcionamiento de los aviones de caza producidos por ambas industrias y que, por tanto, ninguno de los dos países ha gozado de una ventaja tecnológica.

Como análisis preliminar del nivel tecnológico alcanzado por ambas industrias, resulta posible la comparación bis-a-bis de algunos aviones de caza que han aparecido en fechas muy similares procedentes de cada una de las dos industrias. En una gran cantidad de conflictos ocurridos a lo largo del mundo aviones de caza diseñados por los Estados Unidos y la Unión Soviética/Rusia han combatido entre ellos. Quizás el episodio más importante fue la Guerra de Corea, donde aviones de caza de los Estados Unidos y de la Unión Soviética se enfrentaron en múltiples combates. A título de ejemplo la figura 3.1 muestra la comparación, en términos de sus principales características, del F-86A Sabre frente al MiG-15. La Guerra de Corea fue la primera vez en la que combatieron entre ellos aviones de caza fabricados por los Estados Unidos y por la Unión Soviética y, en algunos casos, entre pilotos norteamericanos y pilotos soviéticos. En este conflicto hizo su aparición el MiG-15, avión que fue una desagradable sorpresa para los pilotos norteamericanos, ya que era una aeronave superior al F-80 Shooting Star, al F9F Panther y al F-84 Thunderjet. No obstante, el más técnicamente avanzado F-86 Sabre se convirtió en un serio rival del MiG-15

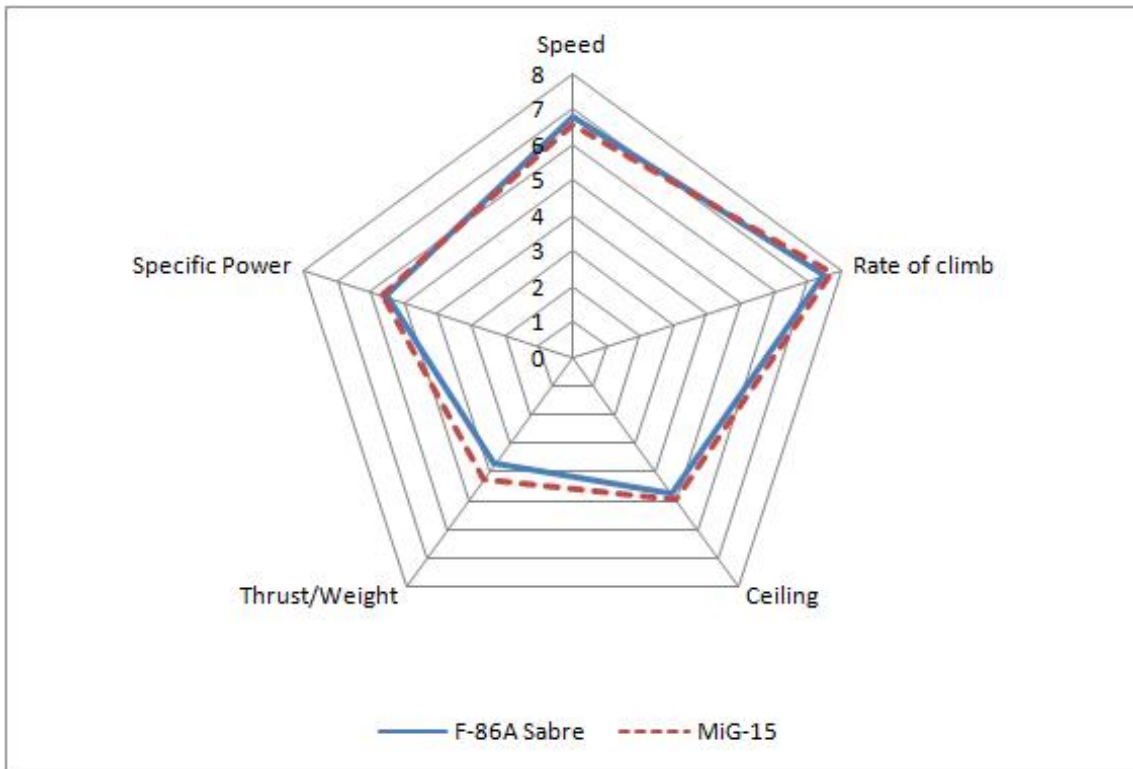


Figura 3.1: F-86A Sabre versus MiG-15

durante este conflicto. El F-86 Sabre tenía una mayor velocidad máxima y un motor más potente pero el MiG-15 mostraba una mayor velocidad de ascenso, mayor techo de combate, una más elevada potencia específica y una mejor ratio empuje/peso. Por tanto, una comparación directa entre estos dos aviones de caza no da lugar a determinar la existencia de una ventaja clara de un modelo sobre el otro.<sup>6</sup> Una comparación similar puede ser realizada para el F-4B Phantom II frente al MiG-21F. Estos dos modelos de cazas son los más representativos de los utilizados durante la guerra de Vietnam. Aunque ambos representan diseños muy diferentes (el F-4 es un avión de caza biplaza, con dos motores, todo tiempo, de gran alcance y con misiones múltiples, mientras que el MiG-21 es caza pequeño, monoplace, con un solo motor, alas en delta, de corto alcance), su comportamiento en el combate aire-aire fue muy similar y no parece observarse ninguna ventaja significativa de un modelo sobre el otro. Un resultado similar se obtiene de la comparación del F-15C frente al Su-27S. Por tanto, resulta difícil apreciar diferencias tecnológicas comparando modelos de fechas similares, incluso en el caso en que se hayan producido combates aéreos reales entre dichos modelos y se haya observado en la práctica sus capacidades como aviones de caza, por lo que se requiere de algún método de análisis que nos permita obtener una medida de dichas diferencias tecnológicas. En el siguiente apartado se lleva a cabo dicha comparación, para todos los modelos de aviones de caza de

---

<sup>6</sup>Otra posibilidad para comparar las capacidades de combate de estos dos aviones, consiste en observar las tasas de victoria de uno sobre otro en combate real (*kill/loss ratio*), bajo el supuesto de que el resto de factores son equivalentes, principalmente en lo que se refiere a la formación de los pilotos. Sin embargo, estos datos pueden ser poco fiables y muy alejados de la realidad por diferentes motivos. Por ejemplo, en el caso de los combates aéreos entre el F-86 Sabre y el MiG-15 durante la Guerra de Corea, diferentes fuentes norteamericanas apuntaban inicialmente a una tasa de derribos de aproximadamente 10 MiG-15 por cada Sabre (e incluso una tasa superior inicialmente). Sin embargo, investigaciones más actuales han ido reduciendo progresivamente dicha tasa de intercambio. Recientemente Stillion y Perdue (2008) muestran que la tasa de derribo para el F-86 Sabre fue en torno a 1.3/1 frente a los MiG-15 pilotados por soviéticos, reflejando una capacidad muy similar para ambos modelos.





Figura 3.2: El North American F-86 Sabre

Estados Unidos y de la Unión Soviética/Rusia, a través de un análisis cuantitativo formal.

### 3.4 Estimación de la tendencia tecnológica

La ecuación tecnológica que relaciona la fecha del primer vuelo de cada avión con sus características técnicas y operativas definida anteriormente, es estimada en forma semilogarítmica (lineal-logarítmica). Todas las variables explicativas se definen en términos logaritmos, excepto las variables ficticias. La elección de la forma semi-logarítmica se debe fundamentalmente a que permite obtener una medida directa (en años) de las brechas tecnológicas existentes entre ambas industrias. La ecuación estimada incluye una variable ficticia de país, variable que es central en



Figura 3.3: El Mikoyan-Gurevich MiG-15

nuestro análisis, ya que el valor del coeficiente estimado para esta variable refleja la diferencia tecnológica entre la industria de aviones de caza de Estados Unidos y de la Unión Soviética/Rusia. La especificación semi-logarítmica ha sido seleccionada con el objetivo de obtener una medida directa (en años), de la diferencia tecnológica entre ambos países.<sup>7</sup> Así, esta especificación implica que el coeficiente estimado correspondiente a la variable ficticia de país viene medido en años, indicando la diferencia tecnológica existente entre ambas industrias.

La tabla 3.2 muestra los principales resultados derivados de la estimación de dicha ecuación. Todos los parámetros estimados son estadísticamente significativos a niveles convencionales (1%). Todos los coeficientes estimados son positivos, como era de esperar, indicando el conjunto de características que definen el nivel tecnológico de los aviones considerados. El modelo explica en torno al 92% de la varianza de los datos para los dos países.

**Tabla 3.2: Estimación de la ecuación de tecnología**

	Coefficiente	Error Std.	Valor-p
Constante	1904,447	6,112	0,000
Empuje	2,271	0,906	0,013
Régimen de ascenso	3,077	0,739	0,000
Aviónica Básica	6,426	1,113	0,000
Aviónica Avanzada	21,908	1,437	0,000
Furtividad	19,918	2,437	0,000
País	-1,921	0,739	0,000
$R^2$	0,921		

El valor de los coeficientes estimados miden el tiempo necesario para alcanzar un determinado nivel para las variables de características tecnológicas. En el caso

<sup>7</sup>Otras especificaciones han sido utilizadas, como la logarítmica-logarítmica, obteniéndose resultados similares.

de la variable "empuje", nuestras estimaciones indican que un aumento del 1% en dicha variable (medida en libras de potencia) aumenta el tiempo del primer vuelo en 0,023 años, esto es, en aproximadamente 0,27 meses o 8,3 días. De forma similar, un aumento en un 1% en el régimen de ascenso (medido como piés por minuto) aumenta el tiempo del primer vuelo en 0,03 años, aproximadamente 0,3 meses o 11,2 días. Estas dos estimaciones reflejan claramente la importante velocidad del progreso tecnológico que ha ocurrido en el desarrollo de los aviones de caza a reacción. El modelo estimado incluye también tres variables ficticias cuyos coeficientes reflejan el tiempo necesario para alcanzar las características tecnológicas representadas por estas variables. La variable Aviónica Básica presenta un coeficiente estimado de 6,4, es decir, la incorporación de características que englobamos en esta variable retrasa en torno a 6-7 años la fecha del primer vuelo de un determinado caza tomando como dadas el resto de características que definen el nivel tecnológico alcanzado. Más costosa en términos de tiempo es la introducción de características asociadas a la variable Aviónica Avanzada. En este caso el coeficiente estimado es de 21,9, es decir, una vez que la aviónica básica ha sido incorporada, se necesitan en torno a 22 años para introducir el conjunto de características técnicas incluidas en esta variable. Finalmente, el valor del coeficiente estimado para la variable ficticia Futividad es similar, en torno a 20 años, como el tiempo necesario para incorporar estas características.

El valor estimado del término constante en la regresión de tecnología requiere una discusión adicional por su particular interés. El término constante en la ecuación tecnológica puede ser interpretado como el año en el cual un avión de caza tiene un valor nulo para todas las características consideradas. Aunque, obviamente este es un escenario no real (implicaría que no existe ningún avión de caza), el coeficiente de la constante estimado toma un valor de 1904, correspondiente a un año que está muy cercano a la fecha del primer vuelo del avión construido por los hermanos Wright (Diciembre de 1903), lo cual puede considerarse como una prueba de robusted de la regresión estimada. Este resultado también puede interpretarse como que la

tendencia tecnológica de los aviones de caza ha permanecido constante en el tiempo desde el primer avión desarrollado en los inicios del siglo XX hasta los últimos cazas diseñados en el siglo XXI, por lo que también sería aplicable a los aviones de caza anteriores a la era de los motores a reacción.

El resultado más importante derivado de la regresión de la ecuación tecnológica es el valor estimado para el coeficiente de la variable ficticia de país, que nos indicaría si han existido diferencias tecnológicas entre ambas industrias. El valor del coeficiente estimado para la variable ficticia de país (que toma el valor 1 para los Estados Unidos y 0 para la Unión Soviética/Rusia) es de -1,92. Este valor implica que, suponiendo las mismas características tecnológicas, un avión de caza producido por la industria norteamericana volaría, en media, en torno a 2 años antes que ese mismo avión producido por la industria soviética/rusa. El valor de este parámetro puede ser interpretado como la ventaja (o atraso) tecnológico medio entre los aviones de caza producidos por ambas industrias para todo el periodo. Así, el valor estimado indicaría que los aviones de caza de los Estados Unidos han sido, en media, más avanzados que los equivalentes producidos por la Unión Soviética/Rusia, y que dicha diferencia tecnológica se ha situado, en media, en torno a 2 años.

A partir de los resultados obtenidos de la estimación anterior e introduciendo los datos referentes a las características técnicas y de funcionamiento de cada uno de los modelos de aviones de caza analizados en la ecuación estimada, podemos predecir la fecha de aparición de cada modelo particular, condicionado a la tendencia tecnológica general estimada. La diferencia para cada modelo de caza respecto a la tendencia tecnológica general es un indicador que puede ser utilizado para valorar el avance tecnológico de un caza en particular respecto a la tendencia tecnológica alcanzada por la industria en el tiempo en que dicho caza voló por primera vez. Los resultados obtenidos de realizar dicho análisis aparecen reflejados en la Figura 3.4, donde se representa la posición de cada avión de caza respecto a la tendencia tecnológica de la industria. El eje horizontal representa la fecha del primer vuelo de cada modelo de avión, mientras que el eje vertical representa la fecha estimada del primer vuelo de

cada modelo dado el conjunto de características técnicas y operativas incorporadas en el mismo. La línea de 45 grados reflejaría la tendencia tecnológica general de la industria de los aviones de caza. Aquellos modelos que estén situados por encima de la línea de 45 grados representan aviones que son muy avanzados respecto a la tendencia general en el momento en que realizaron su primer vuelo, es decir, cazas cuyo primer vuelo fue anterior a la fecha predicha. Por el contrario, aquellos aviones que se sitúan por debajo de la recta de 45 grados representan modelos que en la fecha de su primer vuelo tenían una carga tecnológica inferior a la general de la industria, por lo que podían considerarse como obsoletos en la fecha de su primer vuelo. En la figura solo los principales aviones de caza están señalados, dado el elevado número de modelos considerados.

El análisis de la Figura 3.4 revela resultados muy interesantes tanto respecto a la carga tecnológica de cada modelo de caza como a las diferencias entre los aviones de cada país. Tanto el F-86A Sabre como el MiG-15 son modelos adelantados a su tiempo, si bien el segundo resulta ser algo más avanzado que el primero en cuanto a prestaciones. Por su parte, encontramos que el F-4B Phantom II es significativamente superior tecnológicamente al MiG-21, incluyendo posteriores refinamientos de este caza ampliamente usado por muchos países a lo ancho del mundo. Por el contrario, los resultados indican que el MiG-23 puede considerarse como un diseño fracasado, ya que en la fecha de su primer vuelo muestra un nivel tecnológico inferior al general de la industria. Al margen de los anteriores, también destacan un conjunto de cazas que fueron tecnológicamente avanzados en la fecha en la que realizaron su primer vuelo, tales como el F-105B Thunderchief, F-106A Delta Dart, F-14A Tomcat, F-15A Eagle, F-22 Raptor, MiG-31, MiG-29, y el Su-27S.

En términos generales, los resultados obtenidos en este trabajo, para el caso de los aviones de caza norteamericanos, son consistentes con los obtenidos por Martino (1993), el cual usa dos métodos alternativos, si bien apreciamos significativas diferencias. La principal diferencia que encontramos respecto al análisis realizado por Martino se refiere al avance tecnológico que representan modelos como el F-

100, el F-4 y el F-16. Martino (1993) clasifica estos tres modelos como retrasados tecnológicamente respecto al estado de las artes tecnológicas en la industria en el momento en el que realizaron su primer vuelo. Sin embargo, nuestro análisis muestra que estos tres modelos están situados por la recta de 45 grados que representa la tendencia tecnológica general de la industria, y por tanto, los clasificamos como modelos avanzados tecnológicamente respecto a dicha tendencia general en el momento en el que realizaron su primer vuelo. Inman *et al.* (2006), también clasifica al F-4 y al F-16, junto con el F-18, como productos retrasados tecnológicamente en el tiempo en el que llegaron al mercado. Nuestros resultados de nuevo difieren de los obtenidos por estos autores, indicando que el F-18 Hornet es, por el contrario, un caza avanzado respecto a la tendencia tecnológica de la industria en el momento en el que efectuó su primer vuelo. También encontramos diferencias respecto al trabajo de Stanley y Miller (1979), dado que estos autores también clasifican como atrasado tecnológicamente al F-14A. Por el contrario, en nuestro análisis encontramos que en realidad el F-14A fue un diseño muy avanzado e incluso es un modelo de caza que representa la frontera tecnológica en el campo de los aviones de caza en la fecha en la que realizó su primer vuelo.

### 3.5 Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos en la sección anterior no solo miden la tendencia tecnológica en el desarrollo y producción los aviones de caza a reacción en las industrias aeronáuticas de los Estados Unidos y de la Unión Soviética/Rusia, sino que también ofrecen una estimación de la posición de cada modelo particular respecto a la tendencia tecnológica de la industria, al tiempo que también pueden ser usados para trazar la frontera tecnológica de la industria en ambos países y sus diferentes grados de desarrollo. Las estimaciones realizadas indican que en el año 1944 la tecnología en el desarrollo de aviones de caza a reacción de los Estados Unidos estaba por delante de la Soviética gracias al desarrollo del P/F-80A Shooting Star, un avión

muy avanzado en el momento de realizar su primer vuelo. Esta posición de ventaja de la industria norteamericana se mantuvo durante los primeros años de la era de los cazas a reacción. Sin embargo, esta posición cambió de bando en el año 1949 con los desarrollos primero del MiG-9M y, fundamentalmente, con el desarrollo del MiG-15. Esta situación de ventaja tecnológica por parte de la industria soviética fue mantenida en el tiempo gracias a los posteriores desarrollos del MiG-15bis y del MiG-17. Alexander y Nelson (1973) también encuentra una ventaja tecnológica en la producción de motores de turbina en la Unión Soviética con respecto a la industria norteamericana durante este periodo, siendo éste un elemento de gran importancia a la hora de explicar las mejores capacidades de los cazas soviéticos, a priori menos avanzados en términos de características técnicas. No obstante, dicha ventaja fue superada por la industria norteamericana a partir de los primeros años de la década de los 50. Así, con el desarrollo del F-89C Scorpion y del F4D-1 Skyray, la ventaja tecnológica retornó al lado norteamericano. Esta ventaja tecnológica se consolidó y reforzó con el desarrollo del F-100A Super Sabre. Gracias a estos modelos, la superioridad tecnológica en los aviones de caza fue mantenida por los Estados Unidos durante la década de los 50. Tan solo la aparición del MiG-19 contrarrestó, en parte, esta superioridad tecnológica en los aviones de caza de los Estados Unidos. Sin embargo, el desarrollo de los modelos que formaron la Serie Centenaria, especialmente el F-101A Voodoo, el F-105B Thunderchief y el F-106A Delta Dart, confirmaron la ventaja tecnológica de la industria aeronáutica norteamericana en la producción de aviones de caza. Este mayor desarrollo tecnológico de la industria norteamericana se mantuvo hasta la aparición del Su-15 y del posterior MiG-25. Estos dos modelos de caza soviéticos, desarrollados durante la primera mitad de los años 60 dieron una cierta ventaja tecnológica, aunque muy limitada, a la Unión Soviética sobre la industria norteamericana.

A comienzos de la década de los 70, se produce un imponente cambio en el nivel tecnológico de los aviones de caza, con la introducción de un número relativamente elevado de nuevos modelos diseñados y producidos por la industria norteamericana



que dan lugar a una nueva generación de aviones de caza. El desarrollo del F-15A Eagle y del F-14A Tomcat suponen un salto cualitativo muy importante, aumentando de forma considerable la brecha tecnológica entre las industrias de Estados Unidos y la Unión Soviética en cuanto a la fabricación de aviones de caza se refiere. Estos dos modelos resultan diseños muy avanzados, suponiendo un nivel tecnológico en torno a 10 años por delante del representado por la tendencia general de esta industria. A estos dos modelos se le une el F-16A Fighting Falcon, con un adelanto tecnológico en torno a los 7 años. Sin embargo, la respuesta de la industria aeronáutica de la Unión Soviética no se hizo esperar y durante la segunda mitad de la década de los 70, la industria soviética puso en vuelo tres nuevos modelos de caza muy avanzados. La ventaja obtenida por parte de la industria soviética y, posteriormente rusa durante el periodo 1975-1997 estuvo sustentada en el desarrollo del MiG-31, el Su-27S y el MiG-29. Estos tres modelos realizaron su primer vuelo en torno a 7-9 años con anterioridad a la tendencia tecnológica general, una ventana temporal similar a sus competidores previamente desarrollados por los Estados Unidos.

Las diferencias en los niveles tecnológicos de los aviones de caza alcanza su máximo en el año 1997 con el desarrollo del primer modelo de quinta generación. El F-22A Raptor, el primer avión de quinta generación desarrollado en el mundo, puede ser considerado como una ruptura, en términos tecnológicos, respecto a los modelos de caza previamente desarrollados. En particular, la fecha del primer vuelo del F-22 fue en torno a 7 años por delante de la tendencia tecnológica general de la industria. El resultado más significativo de este desarrollo, es que la tecnología de la industria norteamericana en ese momento se situó en torno a 20 años por delante de la correspondiente a Rusia, una diferencia que nunca antes se había alcanzado por ninguna parte desde el comienzo de la era de los cazas a reacción. Al margen de este caza, con posterioridad se han desarrollado dos cazas de quinta generación, el F-35 Lightning II por parte de la industria norteamericana y el T-50 PAK-FA, por parte de la industria rusa. Sin embargo, ambos cazas están situados por debajo de

la recta de 45 grados, indicando que su nivel tecnológico se encuentra por detrás del que presenta esta industria en su conjunto, a pesar de que estos dos modelos sean los cazas más avanzados que pueden producir las industrias de ambos países en el momento actual.

La Tabla 3.3 presenta los periodos de tiempo en los cuales cada uno de los dos países presentaba una ventaja tecnológica en la construcción de aviones de caza, de acuerdo con nuestras estimaciones. La ventaja tecnológica inicial se situaba del lado de los Estados Unidos, consecuencia de que la industria aeronáutica norteamericana comenzó las investigaciones y del desarrollo de la tecnología de la propulsión a reacción mucho antes de lo que lo hizo la industria soviética. Sin embargo, el acceso de los soviéticos a los desarrollos tecnológicos alemanes en el diseño y construcción de aviones de caza a reacción, así como la adquisición por parte de la Unión Soviética de los motores a reacción británicos del modelo Nene fabricados por la Rolls-Royce justo antes de la finalización de la Segunda Guerra Mundial, produjo un importante movimiento en la balanza de ventaja tecnológica hacia el lado soviético. No obstante, esta ventaja de la industria aeronáutica soviética tuvo una corta duración en el tiempo y durante toda la década de los 50, los progresos de la industria de construcción de cazas norteamericana fueron muchos más intensos que los equivalentes en el caso de la industria soviética. Por el contrario, durante la década de los 60, la superioridad tecnológica en la construcción de aviones de caza a reacción fue mantenida por la Unión Soviética. Al principio de los años 70, la ventaja tecnológica cambia de nuevo de país, debido a los nuevos desarrollos realizados por parte de la industria norteamericana, si bien esta ventaja tecnológica vuelve a cambiar de bando durante el periodo que va desde 1975 hasta 1997, aunque en este periodo se produce una situación de equilibrio, con una ventaja muy limitada para la industria soviética/rusa. Desde el año 1997 hasta el momento actual, la ventaja tecnológica se ha situado en el lado de los Estados Unidos. Esta evolución viene resumida en la Tabla 3.3, si bien en general los periodos en los cuales ha existido una ventaja tecnológica de la industria soviética/rusa han sido cuantitativamente

menos importantes respecto a los periodos en los cuales la ventaja ha caído del lado de la industria norteamericana.

**Tabla 3.3: Ventaja tecnológica en aviones de caza**

Periodo	País
1944-1947	E.E.U.U.
1947-1951	U.R.S.S.
1951-1962	E.E.U.U.
1962-1972	U.R.S.S.
1972-1975	E.E.U.U.
1975-1997	U.R.S.S./Rusia
1997-hoy	E.E.U.U.

La Tabla 3.4 muestra la frontera tecnológica en la industria para ambos países, indicando el modelo de caza que presenta la tecnología más avanzada para cada momento del tiempo, es decir, el modelo de caza que representa el "estado de las artes" en esta industria para los dos países considerados.<sup>8</sup> La columna indicada por FPV se refiere al año en que el modelo realizó el primer vuelo. La tercera columna, denominada "Adelanto", representa el tiempo, medido en términos de años, que un modelo de caza particular estuvo por delante de la tendencia tecnológica general de la industria. La cuarta columna denominada "Ventaja" muestra el adelanto, también medido en años, de cada caza situado en la frontera tecnológica respecto al caza más avanzado del otro país.

Tal y como se puede observar de la estimación realizada, en el caso de los aviones de caza de primera generación, la ventaja tecnológica que presentaba la mayoría

<sup>8</sup>Esta tabla no intenta representar el estado de las artes en la tecnología de producción de aviones de caza en el mundo, dado que otros países, tales como el Reino Unido, Francia, Suecia y, más recientemente China, han desarrollado aviones de caza avanzados que al no estar incluidos en la muestra no resulta posible conocer si alguno de ellos han representado la frontera tecnológica de la industria en algún momento del tiempo.

de modelos de esta generación de cada país frente al otro, medida en años, era muy limitada. La mayoría de estas diferencias son menores a dos años, implicando que la frontera tecnológica para las dos industrias no era muy diferente respecto a la tendencia tecnológica general. Tan solo los casos del F-101A Voodoo (con una diferencia de 3 años y medio) y el F-105B Thunderchief (con 5 años) presentan diferencias apreciables respecto a los cazas soviéticos. Las principales diferencias tecnológicas entre ambas industrias aparecen con el desarrollo del F-14A, que supone una diferencia de 12,7 años, y el F-15A, con una diferencia de 13,6 años. No obstante, la mayor diferencia observada aparece con la realización del primer vuelo del F-22A Raptor, modelo que sitúa a la tecnología de aviones de caza norteamericana en torno a 20 años por delante de la tecnología de la industria rusa. De estos resultados parece derivarse una conclusión de importancia, cuando se realizan estudios para analizar las diferencias tecnológicas entre la industria norteamericana y la soviética/rusa, nos muestra que la brecha existente entre estos dos países es cada vez más importante conforme avanza el tiempo.

En la Tabla 3.4 también se incluye el T-50 PAK-FA, por ser el modelo de caza más avanzado existente, si bien aún se encuentra en fase de desarrollo y no ha comenzado su fase de producción. No obstante, dicho modelo no puede considerarse como perteneciente a la frontera tecnológica, ya que de hecho se encuentra atrasado respecto a la tendencia tecnológica general por un espacio aproximado a los 3 años. En el momento actual podemos considerar que el T-50 PAK-FA es el caza existente más avanzado, ligeramente por encima del F-22A Raptor, si bien hemos de tener presente que la fecha del primer vuelo de este avión ruso tuvo lugar en 2009, es decir, 12 años después de la fecha del primer vuelo del F-22A Raptor, tiempo que ha necesitado la industria rusa para dar lugar a un caza de una tecnología muy similar. Así, la diferencia tecnológica actual entre ambos cazas, de acuerdo a nuestras estimaciones, es de solo un año y medio, lo que indica que la industria aeronáutica rusa se encuentra en la actualidad muy por detrás de la correspondiente de Estados Unidos, y que hace que su último desarrollo, el T-50 PAK-FA, sea considerado como

un caza desfasado (en torno a 3 años), incluso antes de que se convierta en un avión operativo.

**Tabla 3.4: Frontera Tecnológica: Aviones de caza más avanzados**

Modelo	FPV	Adelanto	Ventaja	Nacionalidad
P/F-80 Shooting Star	1944	3,3	-	Estados Unidos
F6U Pirate	1946	3,2	1,9	Estados Unidos
MiG-15	1947	4,3	2,1	Unión Soviética
MiG-15b	1949	3,5	1,2	Unión Soviética
MiG-17	1950	3,0	0,5	Unión Soviética
F-89C Scorpion	1951	2,3	0,3	Estados Unidos
F-100A Super Sabre	1953	2,3	2,0	Estados Unidos
F-101A Voodoo	1954	4,8	3,5	Estados Unidos
F-105B Thunderchief	1956	7,9	5,1	Estados Unidos
F-106A Delta Dart	1957	7,7	0,8	Estados Unidos
Su-15	1962	4,7	2,0	Unión Soviética
MiG-25P	1965	2,9	1,2	Unión Soviética
F-14A Tomcat	1971	9,6	12,7	Estados Unidos
F-15A Eagle	1972	9,5	13,6	Estados Unidos
MiG-31	1975	9,3	2,8	Estados Unidos
Su-27S	1977	7,7	0,4	Unión Soviética
F-22A Raptor	1997	7,3	19,7	Estados Unidos
T-50 PAK-FA	2009	-3,1	1,5	Rusia

El listado de cazas que aparece en la tabla 3.4, como lo que han constituido la frontera tecnológica de esta industria, pueden resultar del todo sorprendente, dada la ausencia de algunos modelos que han tenido un importante impacto y que han sido considerados como muy avanzados tecnológicamente en su tiempo. Así, por ejemplo, por parte de la industria norteamericana, no aparecen aviones importantes como el F-86 Sabre, el F-4 Phantom II, el F-16 Fighting Falcon o incluso el F-35 Lightning

II. Por el lado soviético, tampoco aparecen aviones tan importantes como el MiG-19 o el MiG-21. Sin embargo, esto es consecuencia del hecho de que, en la misma época en la que fueron desarrollados estos modelos, la industria opuesta desarrolló un modelo más avanzado tecnológicamente. En el caso del F-86 Sabre, por ejemplo, este modelo no se ha situado en la frontera tecnológica debido a que en el mismo periodo fue desarrollado el MiG-15, que resulta ser más avanzado tecnológicamente (fundamentalmente en términos de prestaciones).

Los resultados obtenidos del análisis realizado son, en términos generales, consistentes con los presentados en la literatura relacionada. En la práctica, solo un número reducido de trabajos estudian el cambio tecnológico que se ha producido en la industria de los aviones de caza a reacción y existen pocas comparaciones entre las industrias de los Estados Unidos y de la Unión Soviética/Rusia. El primer trabajo que tuvo como objetivo medir el cambio tecnológico en los aviones de caza a reacción es el realizado por Stanley y Miller (1979). Estos autores aplican el mismo método de análisis que utilizamos en nuestro caso, el enfoque de la regresión del tiempo de aparición, enfoque inicialmente desarrollado por Alexander y Nelson (1973). Estos autores consideran una muestra de 39 aviones de caza a reacción de los Estados Unidos, que han sido desarrollados durante el periodo 1944 a 1979. Como conjunto de características de funcionamiento que reflejan su nivel tecnológico, consideran la potencia específica, el factor sostenido de carga, el rango de Breguet, la ratio de carga, y la capacidad de operar desde portaaviones. Estos autores también usan una base de datos con 13 cazas soviéticos, con el conjetivo de comparar los niveles tecnológicos alcanzados por las industrias de ambos países. El principal resultado que obtienen es que ninguna de las dos industrias presenta una ventaja dominante en el largo plazo, presentando niveles tecnológicos muy similares. Tan solo durante la mitad de la década de los 50, la industria norteamericana parece haber disfrutado de una ligera ventaja, gracias fundamentalmente al desarrollo de los cazas que dieron lugar a la Serie Centenaria (F-100 a F-106). Este resultado es consistente con nuestras estimaciones, que indican que durante el periodo 1951-1962, los aviones de

caza producidos por los Estados Unidos eran más avanzados que sus equivalentes soviéticos, debido al desarrollo de los cazas que conformaron la Serie Centenaria.

Los resultados obtenidos por Stanley y Miller también sugieren que la tasa a la que se produce el progreso tecnológico en los aviones de caza ha reaccionado ha ido disminuyendo con el tiempo, al menos en términos de las variables consideradas. En particular, estos autores calculan que realizar una mejora general en un modelo de caza como el F-15, necesitaría un periodo de tiempo entre dos veces y cinco veces más elevado para conseguir un progreso comparable a la diferencia tecnológica existente entre este caza y el F-4. Sin embargo, hemos de indicar que estos autores no tienen en cuenta el progreso tecnológico que se produce en términos de aviónica y en los sistemas de armamento.

### 3.6 Conclusiones

La medición y la predicción del progreso tecnológico constituye un elemento fundamental para aquellas industrias que producen equipos altamente complejos y con una carga tecnológica muy importante. Este es el caso de las industrias de componentes electrónicos, y de equipos, tanto informáticos como de telecomunicaciones. La relevancia de este análisis es aún más importante en el caso de los equipos de defensa. Esto es debido a la utilidad de estos equipos y sus implicaciones sobre la seguridad nacional, en los cuales la comparación del progreso tecnológico en los sistemas de armas disponibles comparados con el de los potenciales enemigos resulta crucial para el gobierno, los analistas militares y la propia industria.

En este capítulo hemos utilizado la metodología propuesta por Alexander y Nelson (1973), que consiste en la estimación de una regresión simple del tiempo de aparición de un equipo respecto a un conjunto de características técnicas y de funcionamiento. La principal aportación de este capítulo consiste en la aplicación de dicha metodología para diferentes industrias de forma simultánea, de manera que permite, por un lado, trazar la tendencia tecnológica agregada respecto al equipo

estudiado y, por otra, comparar directamente el grado de desarrollo tecnológico alcanzado por cada una de estas industrias. En particular, dicha metodología ha sido aplicada a las industrias aeronáuticas que producen aviones de caza de los Estados Unidos y de la Unión Soviética/Rusia, que pueden considerarse como las más importantes a nivel mundial y más avanzadas tecnológicamente. Este análisis nos permite situar cada modelo de caza desarrollado respecto al nivel tecnológico general alcanzado por ambas industrias, por lo que permite comparar de forma directa el nivel tecnológico de los diferentes modelos desarrollados por los dos países. De forma adicional, permite comparar a nivel agregado el nivel tecnológico alcanzado por las industrias aeronáuticas de ambos países. También hemos definido el concepto de frontera tecnológica, construida en términos del modelo de caza más avanzado existente en cada momento del tiempo.

De los resultados obtenidos del análisis realizado anteriormente pueden derivarse diferentes implicaciones de relevancia. En primer lugar, encontramos la existencia, en una cantidad no despreciable y que puede suponer una gran diferencia en caso de conflicto, de una ventaja tecnológica por parte de la industria aeronáutica de aviones de caza de los Estados Unidos con respecto a la industria de la Unión Soviética/Rusia. En media, esta diferencia se ha cuantificado en alrededor de 2 años, como valor medio, sobre la totalidad del periodo considerado. En segundo lugar, esta diferencia tecnológica a favor de la industria norteamericana no ha sido constante durante el tiempo. Así, durante algunos periodos la ventaja tecnológica ha estado del lado de los Estados Unidos, pero durante otras épocas la ventaja ha caído del lado de la Unión Soviética, dependiendo de la introducción de modelos de cazas en particular y de la reacción de cada país ante el desarrollo de nuevos modelos por parte del otro. En cualquier caso, en términos cuantitativos la ventaja que ha presentado la industria de aviones de caza de la Unión Soviética/Rusia durante estos periodos ha sido muy limitada.

El resultado más importante obtenido es el hecho de que la diferencia tecnológica entre ambas industrias aumenta de forma considerable con el profundo cambio



tecnológico provocado por el desarrollo de aviones de caza de 5<sup>a</sup> generación. El desarrollo del F-22A Raptor aumentó la diferencia tecnológica entre los Estados Unidos y Rusia a unos niveles que no se habían producido en el pasado. En este caso particular, la diferencia tecnológica existente en el momento en el que el F-22A Raptor realizó su primer vuelo y el avión de caza más avanzado de Rusia en dicho momento ha sido estimado en unos 20 años. Incluso el avión de caza de 5<sup>a</sup> generación producido por la industria de Rusia, aún en fase de desarrollo y todavía no operativo, el T-50 PAK-FA, aparece como un producto desfasado de acuerdo con la tendencia general tecnológica estimada para estos equipos de combate. Estos resultados en su conjunto parecen indicar la existencia de importantes dudas acerca de la capacidad de Rusia, como heredera de la industria aeronáutica de la antigua Unión Soviética, para seguir los progresos tecnológicos de la industria norteamericana en el desarrollo de nuevos aviones de caza.

## Apéndice A

Tabla A.1: Aviones de caza a reacción por generación

Generación	Estados Unidos		URSS/Rusia	
Primera	P-80 Shooting Star	F-86 Sabre	MiG-9	Yak-23
	PH-1 Phantom	F2H Banshee	Yak-15	
	F-89 Scorpion	F3H Demon	Yak-17	
	F-94 Starfire	FJ-1 Fury	Yak-25	
	F3D Skynight	F7U-1 Cutlass	La-15	
	F-84 Thunderjet	F9F Panther	MiG-15	
	F-84F Thunderstreak		MiG-17	
Segunda	F-8 Crusader	F-104 Starfighter	MiG-19	
	F-102 Delta Dagger	F-101 Voodoo	MiG-21	
	F-106 Delta Dart	F-100 Super Sabre	Su-7	
	F4D Skyray	F-105 Thunderchief	Su-9/Su-11	
	F-11 Tiger	FJ-4 Fury		
Tercera	F-4 Phantom II		MiG-21bis	Su-17
	F-5A/B Freedom Fighter		MiG-23	Tu-28
	F-5E/F Tiger II		MiG-25	
	F-111		Su-15	
Cuarta	F-16 Fighting Falcon	F-15 Eagle	MiG-29	Su-33
	F-14 Tomcat	F15E Strike Eagle	MiG-31	Su-35
	F/A-18 Hornet	F/A-18E/F Super Hornet	Su-27	Su-30
Quinta	F-22 Raptor		T-50 PAK FA	
	F-35 Lightning II			

Tabla A.2: Cazas clasificados como avanzados

Estados Unidos		URSS/Rusia	
P/F-80A	F-89D	MiG-9	MiG-19P
PH-1	F3H-1N	Yak-15	MiG-19S
FJ-1	F-100A	MiG-9M	MiG-29PM
F6U	F-100C	MiG-15	Su-7
F-84B	F-104A	Yak-23	Su-9
F2H-1	F-105B	La-15	Su-11
F-86A	F-101C	MiG-15bis	Tu-128
F-80C	F-101B	MiG-17	Su-15
F9F-2	F-104B	MiG-17P	MiG-25P
F-84F	F-106A	MiG-17F	MiG-25PD
F-86D	F8U-2 (F-8C)	MiG-17PF	MiG-31
F-89C	F4H-1 (F-4B)	Yak-25	Su-27S
F4D-1	F-105D	MiG-19	MiG-29M
F7U-3			

Tabla A.3: Cazas clasificados como retrasados

Estados Unidos		URSS/Rusia	
F-84C	F-86F	Yak-17	Yak-38
F3D-1	F-94C	MiG-21F	MiG-23M
F-84D	FJ-3	MiG-21F-13	MiG-21bis
F-94A	F-86H	Yak-28P	MiG-23ML
F-84D	F-86K	MiG-21PF	MiG-29M
F9F-4	F-102A	MiG-21PFM	Su-33
F-86E	F9F-8 (F-9J)	MiG-21S	MiG-29K
F9F-5	F-11A	MiG-21SM	Su-35S
F-84G	FJ-4	MiG-23S	Su-30M
F-94B	F-86L	Su-15TM	T-50 PAK FA
F3D-2	F-89H		
F9F-6 (F-9F)	F3H-2		
F2H-3 (F-2C)	F-100D		
F2H-4 (F-2D)			

# Capítulo 4

## La curva de aprendizaje y el precio de los aviones de caza

### 4.1 Introducción

El precio final de los aviones de combate está determinado por un conjunto de variables de muy distinta naturaleza. En líneas generales, podemos identificar tres tipos de factores que influyen en el precio de estos equipos de defensa. En primer lugar, el precio final viene condicionado por el conjunto de características técnicas y operativas del equipo considerado. Cuanto mayor sea el nivel tecnológico incorporado, tanto debido a mejores o mayores características tanto técnicas como operativas, obviamente mayor será su coste. Así, en el capítulo segundo de la presente Tesis Doctoral hemos realizado un análisis de la evolución de los precios de los aviones de caza de los Estados Unidos, descomponiendo dicho precio en cambios producidos por el progreso tecnológico, a través del cálculo de precios ajustados por la calidad (precios hedónicos), y de cambios en los precios sin que varíen sus características técnicas y operativas, mostrando que una parte importante del aumento en los precios de estos equipos viene explicada por el progreso tecnológico implícito en los mismos. De este modo, la demanda de aviones de caza cada vez más

avanzados tecnológicamente y con mayores capacidades operativas se traslada a un mayor precio final de estos equipos. Esto provoca que aquellos países que quieren disponer de los últimos modelos más avanzados se vean obligados a disminuir la cantidad de nuevos aparatos a adquirir y/o extender la vida operativa de modelos que o bien resultan obsoletos tecnológicamente o se encuentran al final de su vida útil, dada una determinada restricción presupuetaria.

En segundo lugar, el precio final por unidad está relacionado con los costes fijos medios. Los costes fijos medios dependen a su vez de dos variables: los costes hundidos totales generados durante el proceso de desarrollo del producto, es decir, el coste fijo total en el que se incurre previo a la entrada en producción de estos equipos, y por el número total de unidades producidas. Estos costes fijos o hundidos provienen del gasto necesario para el diseño, experimentación, construcción de prototipos, pruebas, etc., costes fijos que en la práctica pueden ser muy importantes y que, obviamente, se trasladan al precio final de cada unidad producida. Esto provoca que el coste fijo medio asignado a cada unidad, sea muy sensible al número total de unidades producidas. Un ejemplo reciente lo tenemos en el caso del F-22 Raptor, un modelo de caza para el cual el coste fijo medio ha sido incluso superior al precio de producción de cada unidad. Según los cálculos realizados por la Oficina de Contabilidad del Gobierno de los Estados Unidos, GAO (2012), (Government Accountability Office), el coste total de este modelo de avión (una vez finalizada su producción) ha sido de 412 millones de dólares por unidad, de los cuales alrededor del 40% corresponde a los costes de producción de cada unidad, mientras que el restante 60% corresponde al coste fijo medio imputado a cada unidad, proveniente de los costes de investigación, desarrollo, pruebas y prototipos. Este porcentaje tan elevado del coste fijo medio viene derivado del relativo escaso número de unidades producidas de este modelo (un total de 187 unidades más 8 unidades pre-operacionales) y al hecho de que este modelo supone el primer avión de caza de quinta generación, por lo que muchos de los equipos que incorpora suponen una importante innovación con respecto a equipos anteriores. Obviamente, cuanto mayor sea el número de unidades

producidas de un determinado modelo, menores serán los costes fijos medios y, por tanto, menor el coste final de adquisición de cada unidad.

Por último, y en tercer lugar, el precio de producción por unidad de los aviones de caza viene muy influido por el denominado proceso de aprendizaje en la práctica (*learning-by-doing*) generado en la fase final de producción. Este factor provoca una importante reducción en los costes de producción a medida que aumenta el número de unidades producidas, manteniéndose el resto de factores constantes. Un elemento de gran importancia y que es ampliamente conocido en la industria aeronáutica (y en muchas otras industrias) es el hecho de que los costes de producción unitarios son una función decreciente de la producción acumulada. A esto es a lo que en la literatura económica se ha venido en denominar rendimientos a escala dinámicos, un concepto relacionado aunque de naturaleza diferente a los rendimientos a escala estáticos, éstos últimos siendo una función del tamaño de la planta. Este fenómeno ha sido ampliamente estudiado a partir de la especificación de la denominada curva de aprendizaje o curva de progreso, instrumento que fue precisamente desarrollado por Wright (1936) en la industria aeronáutica, al observar que el coste de producción por unidad era una función decreciente del número de unidades producidas. En lo que respecta a la industria aeroespacial, el aprendizaje aparece fundamentalmente en el proceso de ensamblaje del producto final, proceso el cual es intensivo en mano de obra especializada. Debido a la existencia de la curva de aprendizaje, para establecer el precio de los aviones de combate se utiliza habitualmente el precio de la unidad producida número 100 como valor de referencia. Esto es debido a que, en el caso particular de los aviones de caza, se supone que alrededor de la unidad producida número 100, el aprendizaje adicional que se produce es poco significativo por lo que los costes de producción unitarios se mantienen prácticamente constantes a partir de dicha unidad. Véase, por ejemplo, Ziemer y Kelly (1993), los cuales analizan la evolución de los precios de los aviones a reacción, especificando los diferentes factores que determinan dichos precios, tales como el número de unidades producidas, la tasa de producción, la curva de aprendizaje o factores específicos a las empresas

productoras.

La idea de partida de la curva de aprendizaje es relativamente simple. Los individuos y las organizaciones aprenden de repetir una determinada tarea. Esto es lo que en términos generales se denomina aprendizaje en la práctica (*learning-by-doing*), como el proceso de adquisición de conocimientos sobre las artes productivas a medida que se produce, a lo que también se denomina experiencia. Existen diferentes explicaciones de que se produzca este fenómeno, que es general a muchas industrias aunque con diferente intensidad. Así, este fenómeno se produce principalmente en aquellas industrias que producen equipos complejos y en las cuales la mano de obra representa un importante porcentaje de los costes de producción totales. Aunque la curva de aprendizaje o experiencia fue primeramente observada y aplicada a la industria aeronáutica, con posterioridad se ha convertido en un instrumento ampliamente utilizado en una gran cantidad de productos industriales otros que los aviones, desde la construcción de barcos hasta la generación de electricidad o la fabricación de microprocesadores. A partir de los primeros desarrollos y aplicaciones, la estimación de curvas de aprendizaje o de progreso alcanzó una elevada popularidad entre consultores e ingenieros con posterioridad a la Segunda Guerra Mundial. Esta gran popularidad de debió principalmente a que las curvas de aprendizaje era un instrumento muy simple que podía ser aplicado a un fenómeno muy complejo.<sup>1</sup>

Existe una gran variedad de elementos de diferente naturaleza que pueden explicar el fenómeno de la reducción de los costes unitarios a medida que aumenta la producción: aprendizaje en la práctica, economías de escala, reducción en la calidad del producto, cambios en la ratio trabajo/capital, o mejoras organizacionales, entre otros. El aprendizaje en la práctica hace referencia a una situación en la cual, manteniendo constante el resto de factores de producción (tanto en cantidad como en calidad), a medida que aumenta la producción acumulada se reducen los costes de producción, como consecuencia del aprendizaje de los trabajadores,

---

<sup>1</sup>Véase, por ejemplo, Dutton, Thomas y Butler (1984) para una descripción de los orígenes de la curva de aprendizaje y sus diferentes aplicaciones.



siendo la producción acumulada una medida de su experiencia. Una característica clave de la curva de experiencia es que la tasa de aprendizaje es mayor al inicio de la producción, siendo una función decreciente de la producción, lo cual tiene obviamente importantes implicaciones para el comportamiento estratégico de las empresas en términos de decisiones de producción y de determinación de los precios. En términos generales, la curva de aprendizaje presenta la regularidad de que cada vez que se dobla la producción, el coste por unidad disminuye en un porcentaje constante. Así, el aspecto que reviste un mayor interés es que la relación observada parece mostrar un patrón regular, lo que indica que puede ser representada en términos matemáticos, siendo ésta la características fundamental que ha llevado a su aplicación práctica generalizada.

A nivel teórico, podemos distinguir tres enfoques alternativos que incorporan el aprendizaje en la práctica en el análisis económico, si bien han sido relativamente pocos los desarrollos teóricos que se han llevado a cabo para explicar las causas de este fenómeno, al menos en lo que se refiere a la literatura económica. En primer lugar, destacan los trabajos iniciales realizados por Alchian (1959), Hirschleifer (1962), y Preston y Keachie (1964), entre otros, para incorporar el aprendizaje en la práctica a la teoría clásica de los costes de producción, desarrollando una teoría dinámica de los costes. Otra rama de la literatura, más a nivel agregado, fue iniciada por Arrow (1962), desarrollando un modelo teórico macroeconómico de crecimiento incorporando el fenómeno de aprendizaje en la práctica, si bien en este modelo la experiencia es una función de la inversión, y que constituye un elemento fundamental de los modelos de crecimiento endógeno. Finalmente, otra rama de la literatura se ha centrado en estudiar los efectos del aprendizaje en la práctica sobre la estructura de las industrias, la existencia de barreras a la entrada de nuevas empresas y la fijación de precios estratégicos. Los estudios seminales en esta rama de la literatura son los realizados por Rosen (1972), Lee (1975) y Spence (1981).

Otro concepto que va unido al de aprendizaje en la práctica es el relacionado con la persistencia en el tiempo de dicho conocimiento acumulado. Este es el

denominado "*organizational forgetting*", término que podemos traducirlo como olvido organizacional. Este concepto, relacionado con el de aprendizaje en la práctica, hace referencia a la depreciación que sufre el conocimiento adquirido a través de la producción. De este modo, el stock de conocimientos adquiridos a partir de la producción no permanece indefinidamente en el tiempo, sino que se deprecia debido a una gran variedad de factores. Inicialmente esta depreciación de los conocimientos adquiridos en la producción venía explicada por la interrupción en un momento dado del tiempo de la producción. Esta interrupción en la producción no solo provoca una paralización en la adquisición de conocimientos, sino que los ya adquiridos se "olvidan" o deprecian, de modo que cuando se vuelva a reanudar la producción el coste de producción será superior al existente con anterioridad a la interrupción, reflejando un menor nivel de conocimientos. Este puede ser el caso de una huelga, de una disminución en la demanda del producto o en un cambio en los métodos de producción. Sin embargo, la depreciación de la experiencia adquirida parece ser un fenómeno muy extendido, observándose incluso cuando no se producen interrupciones en la producción.

En la práctica, la estimación de las curvas de aprendizaje constituyen un elemento fundamental para la determinación del precio de un avión ya que en la producción de este tipo de equipos se observa un importante proceso de aprendizaje en la práctica, que reduce significativamente los costes de producción a medida que se aumenta el número total de unidades producidas. En el caso particular de los aviones de combate, el procedimiento de adquisición de los mismos es no competitivo, al menos en la fase de producción. En este contexto, las curvas de aprendizaje resultan fundamentales para las decisiones del gobierno en términos de fijación de precios y del número de unidades a adquirir de un modelo en particular. En este capítulo analizamos el proceso de aprendizaje en la práctica y la depreciación que se produce en el reciente proceso de producción de un conjunto de aviones de caza de los Estados Unidos: el F/A-18E/F Super Hornet, el F-22A Raptor y el F-35A Lightning II. La estimación de las curvas de aprendizaje se realizan utilizando el precio de

adquisición de los aviones a través del "coste *flyaway*", que es el concepto de precio más directamente relacionado con los costes de producción. Los resultados obtenidos muestran que las curvas de aprendizaje para el Super Hornet y el Raptor son muy similares para ambos modelos y en línea con las obtenidas en la literatura empírica para otros aviones. En particular, obtenemos curvas de aprendizaje con valores en torno al 85% para ambos cazas. Los resultados para el Lightning II son diferentes, presentando una menor tasa de aprendizaje (con una curva de aprendizaje estimada superior al 90%), lo que puede ser debido al hecho de que se están produciendo de forma simultánea tres modelos diferentes de este avión en la misma cadena de montaje.

Por otra parte, los resultados obtenidos indican la extencia de una elevada tasa de depreciación en la experiencia adquirida. Dado que los datos utilizados tienen una frecuencia anual, las estimaciones realizadas muestran que la depreciación es prácticamente total para los tres modelos estudiados, resultado que la evidencia empírica también encuentra para otras industrias. En el caso particular de los equipos analizados, éstos presentan una tasa de producción relativamente reducida, por lo que es de esperar una elevada depreciación del aprendizaje previamente adquirido.

La estructura del resto del capítulo es la siguiente. En el epígrafe segundo se presentan los principales elementos que configuran la curva de aprendizaje. El epígrafe tercero introduce el concepto de depreciación en los conocimientos adquiridos a través del aprendizaje en la práctica (*organizational forgetting*). El epígrafe cuarto realiza una panorámica de la literatura empírica. El epígrafe 5 describe los datos y variables utilizadas. Los principales resultados del análisis realizado se presentan en el epígrafe sexto. El epígrafe 7 incluye una discusión de los resultados. El capítulo finaliza con las principales conclusiones obtenidas.

## 4.2 La curva de aprendizaje

Las curvas de aprendizaje constituyen un instrumento cuantitativo que surge con el objetivo, no de explicar, sino de representar la relación negativa observada entre el coste de producción de un determinado bien o equipo y el número de unidades producidas de dicho bien o equipo a lo largo del tiempo en una determinada línea de montaje o planta. Inicialmente las curva de aprendizaje, también denominadas curvas de experiencia, fueron desarrolladas en el trabajo pionero de Wright (1936), el cual modeliza dicho fenómeno usando una ley potencial.<sup>2</sup> Wright, ingeniero de Boeing, observó que la cantidad de trabajo requerida para la construcción de un avión disminuía a una tasa constante cada vez que se doblaba la producción. A partir de esta observación desarrolló la denominada curva de aprendizaje o curva de experiencia. El modelo pionero desarrollado por Wright (1936), es el denominado modelo acumulativo en el cual el coste medio de producción es una función del número total de unidades producidas. Posteriormente Crawford (1944) desarrolla el denominado modelo unitario, en el cual la curva de aprendizaje se construye en términos de la relación entre el coste por unidad de producción y la producción acumulada. Ambos modelos son equivalentes en la práctica, aunque calculan el coste de producción de forma diferente.

Esta disminución en los costes de producción, sin que varíen el resto de elementos productivos, viene explicada por el proceso de aprendizaje en la práctica durante la producción. Tanto en aprendizaje a niveles organizativos como el aprendizaje de la mano de obra ocurren durante el proceso productivo. A nivel agregado, este proceso es equivalente al aumento en la Productividad Total de los Factores o progreso tecnológico neutral, que da lugar a un aumento en la producción final manteniéndose constante la cantidad de factores productivos.

El fenómeno del aprendizaje en la práctica aparece fundamentalmente en los

---

<sup>2</sup>La ley potencial (*power law*) se utiliza para el análisis de una gran variedad de fenómenos de muy distinta naturaleza en los campos de la física, demografía, biología, sociología, etc.

procesos de ensamblaje y, por tanto, están directamente relacionados con el factor de producción humano. Hirschmann (1963) apunta a la existencia de dos tipos de aprendizaje: aprendizaje de la mano de obra y aprendizaje de la organización. En términos generales, el proceso de aprendizaje en la práctica será muy reducido o casi inexistente en aquellas industrias intensivas en capital, con procesos de producción altamente automatizados, dado que se trata de un proceso asociado al factor trabajo. Por el contrario, el aprendizaje en la práctica será más intenso en aquellas industrias intensivas en mano de obra y que utilicen herramientas complejas o bien produzcan bienes de alto contenido tecnológico. La evidencia empírica disponible confirma estos resultados.

El fenómeno del aprendizaje en la práctica aparece en un elevado número de industrias. Aunque se trata de un fenómeno observado inicialmente en la industria aeronáutica, con posterioridad se ha observado el mismo fenómeno en la fabricación de diferentes equipos y bienes de muy diferente naturaleza. No obstante, la intensidad de este proceso es diferente dependiendo de las características particulares de cada proceso productivo. En términos generales, las tareas repetitivas y estandarizadas, en las cuales la mano de obra tiene una aportación fundamental en la producción del bien final, son las que dan lugar a un mayor proceso de aprendizaje en la práctica, lo que se traduce en importantes aumentos en la productividad.

A nivel teórico, en la literatura el proceso de aprendizaje en la práctica ha sido incorporado como un elemento fundamental tanto a nivel de industria como a nivel agregado. En términos generales, podemos considerar que la producción en una industria viene determinada por la siguiente función tecnológica:

$$Y_t = A_t F(K_t, L_t) \quad (4.1)$$

donde  $Y_t$  es la producción,  $K_t$  es el stock de capital físico,  $L_t$  es la mano de obra,  $F(\cdot)$  es una función matemática que transforma factores productivos en bienes finales y donde  $A_t$  es una medida de la productividad total de los factores o la tecnología neutral, que podemos definirla como:

$$A_t = A(E_t, t) \quad (4.2)$$

donde  $E_t$  representa la experiencia acumulada y donde  $t$  es el tiempo. Siguiendo a Irwin y Klenow (1994), la función definida anteriormente para  $A_t$  puede especificarse como:

$$A_t = A_0 E_t^\beta e^{\gamma t} \quad (4.3)$$

esto es, la productividad total de los factores depende de la experiencia acumulada (o economías de escala dinámicas) y del tiempo, representando una medición del progreso tecnológico neutral en el sentido de Hicks, donde  $A_0$  sería el nivel de productividad al comienzo de la producción,  $\beta$  sería el parámetro asociado al proceso de aprendizaje y  $\gamma$  sería el parámetro asociado al transcurso del tiempo. La experiencia o producción acumulada se transforma en un stock de conocimientos sobre cómo producir, lo cual aumenta la productividad total de los factores. Aún manteniendo constante la cantidad de factores productivos, la producción aumentaría en el tiempo, como consecuencia de la mayor experiencia acumulada.

La curva de aprendizaje tradicional puede ser definida a partir de la siguiente función matemática:

$$P_i = \alpha E_i^\beta \quad (4.4)$$

donde  $P_i$  es el número de horas de trabajo (o coste o precio) necesarios para producir la unidad  $i$  de un determinado equipo,  $\alpha$  es el número de horas o coste requerido para producir la primera unidad,  $E$  es el número acumulado de unidades producidas reflejando la "experiencia", y  $\beta$  es el índice de aprendizaje que define la pendiente de la curva de aprendizaje, siendo  $\beta < 0$ . Este parámetro es la pendiente de la función de progreso logarítmica. De este modo, el índice de aprendizaje puede definirse como:

$$\beta = \frac{\log \theta}{\log 2} \quad (4.5)$$

donde  $\theta$  es el denominado ratio de aprendizaje, o lo que es lo mismo, la tasa de progreso que define la pendiente de la curva de aprendizaje, que se calcula como:

$$\theta = 2^\beta \quad (4.6)$$

La figura 4.1. muestra diferentes curvas de aprendizaje, para diferentes tasas de progreso (70, 80 y 90%) que aparecen habitualmente en los estudios empíricos. Partiendo de un coste o precio inicial normalizado a 1, cada curva muestra el coste o precio en función de las unidades producidas, para cada una de las tasas consideradas. Cuanto menor sea la tasa de progreso mayor es el índice de aprendizaje. La figura 4.1 muestra como la evolución de los costes por unidad de producción a lo largo del proceso productivo difieren notablemente en función de la tasa de progreso por lo que en términos prácticos el aprendizaje en la práctica es un fenómeno que puede tener importantes consecuencias sobre la determinación del precio final en función del número total de unidades producidas. Tal y como podemos observar en la figura 4.1., el precio después de 200 unidades producidas es de aproximadamente un 70% del precio inicial en el caso de una curva de progreso del 90%, en torno al 50% del precio inicial para una curva de progreso del 80% y de aproximadamente solo un 30% del precio inicial para una curva de progreso del 70%.

La especificación básica de la curva de aprendizaje puede modificarse para introducir otros factores adicionales a la producción acumulada, tales como la inversiones en aprendizaje, efectos desbordamiento, tasas de producción, etc., lo que ha dado lugar a una gran variedad de especificaciones a la hora de su estimación empírica. Sin embargo, a pesar de la gran cantidad de trabajos empíricos realizados y la aplicación de las curvas de aprendizaje en un elevado número de industrias, no se ha desarrollado una teoría que explique de forma adecuada el proceso de aprendizaje

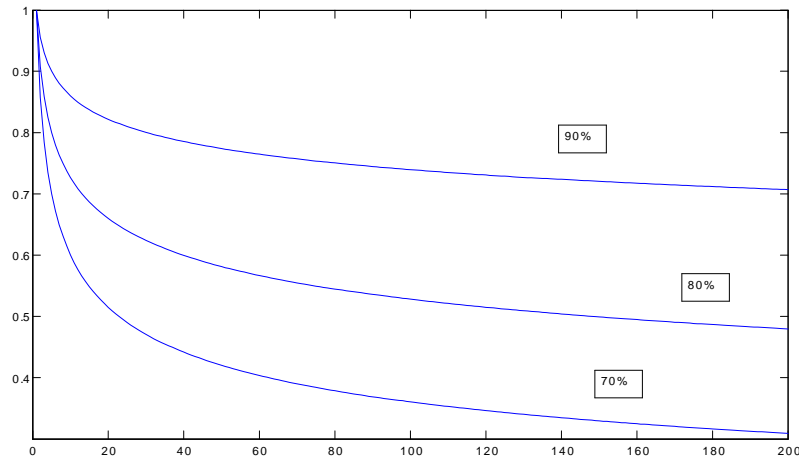


Figura 4.1: Curvas de aprendizaje o de progreso

en la práctica, si bien este elemento ha sido incorporado a diferentes modelos teóricos como un elemento clave para explicar determinados fenómenos. Desde un punto de vista teórico, las curvas de aprendizaje hacen referencia a un contexto en el cual el proceso de producción se desarrolla en un contexto dinámico. Esto supone un importante contraste con la teoría neoclásica de los costes de producción, la cual se ha desarrollado en un contexto estático y, por tanto, sin tener en cuenta el proceso de adquisición de conocimientos productivos a través de la experiencia.

Inicialmente, y una vez conocida la importancia y extensión del fenómeno del aprendizaje en la práctica, los intentos se centraron en incorporar el aprendizaje en la teoría neoclásica de los costes de producción, usando especificaciones alternativas. Los primeros desarrollos teóricos en esta dirección fueron realizados por Alchian (1959) y Hirschleifer (1962), los cuales elaboraron una teoría dinámica de los costes de producción basada en la curva de aprendizaje, estableciendo una conexión entre el proceso de aprendizaje y la teoría neoclásica de los costes de producción. Otros desarrollos en la misma dirección fueron los realizados por Preston y Keachie (1964), Oi (1967) y Womer (1979) entre otros, todos ellos realizando extensiones de la teoría de los costes de producción incorporando el aprendizaje en la práctica.



Otra rama de la literatura ha tratado el fenómeno del aprendizaje en la práctica desde una perspectiva macroeconómica. El primer desarrollo en este sentido fue el realizado por Arrow (1962), el cual se considera el trabajo pionero de la incorporación de este fenómeno a los modelos de crecimiento económico. Aunque en términos generales, las curvas de aprendizaje consideran la producción acumulada como el indicador de experiencia, el modelo desarrollado por Arrow utiliza como variable de referencia la inversión bruta acumulada. La idea es similar al concepto estándar de curva de aprendizaje, pero la experiencia vendría determinada por la inversión acumulada y no por la producción acumulada. Levhari (1966a, b) realiza extensiones del modelo de Arrow (1962).

Una tercera rama de la literatura se ha centrado en estudiar los efectos estratégicos del aprendizaje en la práctica en el marco de la economía industrial. En este contexto, los procesos de aprendizaje tienen importantes implicaciones sobre la estructura del mercado y sobre el bienestar social, derivadas de hecho de que el aprendizaje puede generar barreras a la entrada en una industria y reducir el nivel de competencia. Así, una de las principales conclusiones que se derivan de los estudios realizados por el Boston Consulting Group (1970) fue la recomendación a las empresas de aumentar la producción lo máximo posible de un determinado producto al inicio de su proceso productivo con objeto de ir moviéndose lo más rápidamente a lo largo de la curva de aprendizaje respecto a las empresas competidoras y de esta forma lograr una ventaja estratégica debido a los menores costes de producción generados por el mayor aprendizaje. Los trabajos iniciales en esta rama de la literatura fueron realizados por Rosen (1972), el cual estudia las implicaciones del aprendizaje en la práctica en el caso de una empresa competitiva y de Lee (1975), el cual muestra que el aprendizaje puede dar lugar a la existencia de barreras a la entrada en un modelo de fijación de precios dinámico. Spence (1981) estudia el caso de un marco de competencia de Cournot, mostrando que las curvas de aprendizaje dar lugar a la aparición de barreras a la entrada de nuevas empresas en una industria. Extensiones en la misma línea son las realizadas por Fudenberg y Tirole (1983) y Dasgupta

y Stiglitz (1988), llegando al resultado de que las curvas de aprendizaje pueden generar incentivos a fijar el precio por debajo de los costes marginales estáticos, especialmente al inicio de la introducción de un nuevo producto. Más recientemente, Cabral y Riordan (1994) estudian las implicaciones estratégicas sobre la fijación de precios de la curva de aprendizaje en el contexto de un duopolio con productos diferenciados.

### 4.3 La persistencia del aprendizaje y el olvido organizacional

Un elemento relacionado con el aprendizaje en la práctica es el concepto de olvido organizacional (*organizational forgetting*) o cómo es la persistencia a lo largo del tiempo de la experiencia adquirida a través de los procesos productivos. El olvido organizacional hace referencia al proceso de depreciación del stock de conocimientos previamente adquiridos y parte del supuesto que la experiencia adquirida a través de la producción no es mantenido de forma permanente en el tiempo, sino que se va depreciando a través de un proceso de olvido. El concepto de olvido organizacional fue desarrollado inicialmente por Argote, Beckman y Epple (1990) como un proceso que se produce de forma simultánea al aprendizaje en la práctica. En términos generales el aprendizaje en la práctica se supone que es un proceso acumulativo y persistente en el tiempo. Sin embargo, Argote et al. (1990) muestran que el conocimiento que ha sido adquirido a través del aprendizaje no es persistente en el tiempo y que se deprecia. En términos generales, este proceso sería similar al del aprendizaje pero a la inversa.

Teniendo en cuenta la existencia de olvido organizacional, la experiencia,  $E$ , se supone se deprecia a una tasa exponencial constante  $\delta$  y se acumula como resultado de la producción realizada:

$$E_1 = 0,$$

$$E_i = 1 + e^{-\delta t} E_{i-1}$$

Si  $\delta = 0$ , entonces la experiencia adquirida no se deprecia y estaríamos en el caso estándar de la curva de aprendizaje. Por el contrario, si  $\delta > 0$ , entonces no toda la experiencia adquirida en la producción previa se mantiene y se añade a la nueva experiencia que se adquiere conforme se producen unidades adicionales. En la práctica, la depreciación del stock de conocimiento o experiencia puede deberse a una variedad de factores. El más evidente es la interrupción en la producción, debida a huelgas, a insuficiencia en el nivel de demanda del producto, o bien a cambios tecnológicos que alteren la organización productiva. En el caso de que se produzca una interrupción en la producción, la experiencia previamente acumulada se va perdiendo de forma continua, por lo que al reanudarse de nuevo la producción los costes serán superiores a los alcanzados en el momento previo a la interrupción. Sin embargo, Argote et al. (1990) apuntan a que la depreciación del conocimiento adquirido puede producirse incluso sin interrupciones en el proceso productivo y que se trata de un fenómeno consustancial al propio aprendizaje.

La existencia de depreciación en el stock de conocimientos tiene importantes consecuencias para la forma de la curva de aprendizaje. En el modelo básico, sin depreciación, la curva de aprendizaje nos llevaría a que los costes de producción tendiesen a cero a medida que la producción acumulada fuese cada vez más elevada, dado que el proceso de aprendizaje es continuo. Esto no sucedería en el caso en que existiese depreciación del conocimiento. En particular, la literatura supone que el olvido organizacional es una proporción del stock de conocimientos. Por tanto, cuanto mayor sea el nivel de conocimientos alcanzados, mayor es la cantidad que se deprecia del mismo y, por tanto, para hacer frente a dicha depreciación se necesita un mayor nivel de adquisición de conocimientos. Dado que la curva de aprendizaje implica que el stock de conocimientos es una función creciente y cóncava de la producción acumulada, la depreciación de dicho conocimiento nos llevará a una

situación en la cual la ganancia de experiencia sea equivalente a la depreciación de la misma. A partir de dicho momento, mayores niveles de producción acumulada provocarán una disminución en el stock de conocimientos al ser su depreciación superior a la ganancia de experiencia a medida que se producen más unidades del producto.

Bailey (1989) aporta evidencia experimental que apunta a que el olvido por parte de los individuos es una función creciente de su stock de conocimientos aprendidos. Por otra parte, el olvido organizacional puede tener importantes consecuencias a nivel de industria. Así, Besanko, Doraszelski, Kryukov y Satterthwaite (2010) extienden el modelo de aprendizaje en la práctica desarrollado por Cabral y Riordan (1994) incorporando olvido organizacional y mostrando que éste no supone simplemente la negación de aprendizaje, sino que constituyen fuerzas económicas distintas que interaccionan entre ellas y que tienen una gran influencia sobre la determinación de los precios y la dinámica de la industria.

## 4.4 Breve revisión de la literatura empírica

La literatura empírica respecto a la curva de aprendizaje o curva de experiencia es muy amplia, y la estimación de las curvas de aprendizaje se han llevado a cabo en una gran cantidad de industrias y para una elevada cantidad de productos. Aunque este instrumento de análisis fue desarrollado inicialmente en la industria aeronáutica, con posterioridad se extendió rápidamente a otras industrias donde también se ha observado un proceso de disminución de los costes como consecuencia de la experiencia adquirida a través de la producción, apuntando a que se trata de un fenómeno generalizado en industrias con determinadas características, tales como productos relativamente complejos y uso intensivo de la mano de obra y alta cualificación de la misma. De hecho, el *Boston Consulting Group* popularizó esta técnica en los años 60, utilizándola como una de las herramientas de su análisis y aplicándola a una gran cantidad de industrias. Dutton y Thomas (1984)

analizan un total de 108 estudios en los que se calcula la curva de aprendizaje para diferentes industrias, como la electrónica, máquinas-herramientas, papel, aviones, acero, automóviles, etc., mostrando que la mayoría de industrias tienen una ratio de progreso entre el 70 y el 90%.

Por citar los estudios más representativos, para el caso de la industria aeronáutica, ejemplos son Wright (1936), Asher (1956), Conway y Schultz (1959), Alchian (1963), Sturme y (1964), Hartley (1965, 1969), Reinhardt (1973), Womer y Patterson (1983), Frischtak (1994), Mishina (1999), Benkard (2000, 2004) y Kleiner, Nickelsburg y Pilarski (2012). Para el caso de la construcción naval, ejemplos son los trabajos de Searle (1945), Rapping (1965), Argote, Beckman y Epple (1990) y Thompson (2001, 2007); para el caso de la energía Joskow y Rozanski (1979) y Zimmerman (1982); para el caso de los semiconductores Gruber (1992) y Irwing y Klenow (1994), etc. Por otra parte, la depreciación del aprendizaje también ha sido objeto de análisis empírico, siendo los trabajos más importantes los realizados por Argote et al. (1990), Darr, Argote y Epple (1995), Benkard (2000), Shafer, Nembhard and Uzumeri (2001), Thornton y Thompson (2001) y Thompson (2003).

De todos los estudios empíricos realizados, quizás los que son más conocidos y los que mayores implicaciones han generado son los realizados para la industria de construcción de buques, fundamentalmente gracias a la información obtenida del programa "*Liberty*".<sup>3</sup> Los buques de la clase "*Liberty*" fueron construidos en gran número en un total de 16 astilleros en los Estados Unidos durante la Segunda Guerra

---

<sup>3</sup>El programa "*Liberty*", fue creado por la *U.S. Maritime Commission* en el año 1941, implicando la producción masiva de buques de transporte para el esfuerzo bélico requerido por la participación de los Estados Unidos en la Segunda Guerra Mundial. En total, fueron producidos 2.708 buques dentro de este programa. La importancia de este caso radica en el hecho de que se trata de la producción a gran escala de un tipo de buque con un diseño único. Así, de las especificaciones básicas de los buques tipo "*Liberty*", fueron construidos un total de 2.580 unidades. Esto hace que esta información sea de gran importancia para el análisis del aprendizaje en la práctica y haya constituido el caso de estudio más importante para el análisis de este fenómeno dentro de la literatura económica.

Mundial, generando una importante información respecto a los inputs necesarios para construir cada buque a lo largo del tiempo. El primer estudio sobre este programa fue realizado por Searle (1945) el cual constató que durante el periodo que va de diciembre de 1941 a diciembre de 1944, el número de horas de trabajo requeridas para fabricar un buque disminuyó desde un índice de 100 a principios del periodo, a un valor de 45 al final del mismo, es decir, un impresionante aumento de la productividad del 122% durante todo el periodo o, equivalentemente, un 40% de aumento anual. Para la realización de su análisis, Searle (1945) utiliza datos de 10 astilleros estimando un modelo que relaciona en número de horas de trabajo con la producción acumulada. De estos resultados se obtiene que cada vez que se doblaba la producción, la cantidad de horas de trabajo necesarias para finalizar cada unidad disminuían entre el 12 y el 24%. Lane (1951) también analiza el aprendizaje en la producción de estos buques, realizando un estudio para los distintos astilleros de forma individual y llegando a resultados muy similares a los obtenidos por Searle (1945).

Rapping (1965) estima una función de producción en la cual el output viene medido por el número de buques construidos, siendo una función de los factores productivos mano de obra y de los servicios del capital físico, usando para ello datos de 15 astilleros, constatando la existencia de rendimientos crecientes a escala. Analizando el fenómeno del aprendizaje, llega al resultado de que cada vez que se aumentaba la producción acumulada al doble, esto suponía un aumento del 29% en el ritmo de producción, manteniendo constante los factores productivos capital y trabajo. Este autor también realiza dicho análisis a nivel individual de cada astillero, llegando a resultados similares, con una ganancia media de la productividad del 23% (entre el 11 y el 34% para cada astillero de forma individual). Argote et al. (1990) utilizan los mismos datos para estudiar la dinámica del aprendizaje y de su depreciación. Estos autores muestran que las medidas de la curva de aprendizaje a partir de la producción acumulada sobreestiman la persistencia de la experiencia adquirida. Usando datos correspondientes a 13 astilleros estiman que del stock

de conocimientos existente al principio del año, tan solo un 3,2% permanece a la finalización del mismo, es decir, el conocimiento se deprecia muy rápidamente. Sin embargo, Thompson (2001) muestra que el aumento en la producción por trabajador observada a lo largo del tiempo viene explicada con un aumento en la intensidad del uso del capital físico y por una reducción en la calidad, mientras que otros factores adicionales, como cambios en la tecnología de producción y en la utilización de la capacidad productiva también juegan un papel relevante a la hora de explicar la evolución en la productividad. Thornton y Thompson (2001) se centran en el estudio de efectos desbordamiento del conocimiento entre los diferentes astilleros, mostrando que son una importante fuente para el crecimiento de la productividad, incluso más que el propio aprendizaje, lo que contrasta con los resultados obtenidos por Argote et al. (1990), los cuales solo encuentran evidencia muy limitada sobre los efectos desbordamiento entre los distintos astilleros participantes en el programa "Liberty". Por el contrario, Thompson (2007), utilizando nuevos datos sobre el programa "Liberty", también estudia la persistencia de la experiencia adquirida, obteniendo que su depreciación es insignificante, en contraste con los resultados obtenidos por Argote et al. (1990).

Otra industria que ha recibido una especial atención por parte de la literatura empírica ha sido la industria aeronáutica. De hecho, el primer análisis de la curva de aprendizaje fue precisamente aplicado a la fabricación de aviones. El trabajo pionero fue realizado por Wright (1936) el cual observó que el número de horas de trabajo necesarias para producir un avión era una función decreciente del número de aviones del mismo tipo previamente producidos. Estos resultados tuvieron una relevancia muy elevada y tanto las Fuerzas Aéreas de los Estados Unidos como la industria comenzaron a estimar la curvas de aprendizaje como elemento fundamental para determinar los costes y los precios en la fabricación de aviones, tal y como muestra Asher (1956). Alchian (1963) estudia el número de horas de trabajo directas necesarias en la producción de 22 aviones militares, incluyendo bombarderos, cazas, entrenadores y transportes, durante el Segunda Guerra Mundial, centrándose en el

ajuste de las curvas de aprendizaje estimadas y de los errores de predicción que se derivan de las mismas. Por su parte, Sturme y (1964) estima las curvas de aprendizaje para 18 aviones británicos. En términos generales, los valores estimados de la curva de aprendizaje se sitúan en torno al 80%, un porcentaje similar al valor estimado inicialmente por Wright (1936). Hartley (1969) obtiene que la curva de aprendizaje para los materiales es mucho menor que la correspondiente a las horas de trabajo en la fase de ensamblaje, obteniendo una pendiente entre el 89 y el 97%.

Reinhart (1973) estudia la estructura de costes y de ingresos del programa de la Lockheed Tri-Star L-1011, arrojando una curva de aprendizaje del 77,4% para este modelo de avión. Womer y Patterson (1983) usan diferentes especificaciones para estimar la curva de aprendizaje para el avión de carga C-141, usando datos de 12 lotes de producción que incluyen un total de 284 unidades, obteniendo valores entre el 76 y el 81%. Frischtak (1993) estima la curva de aprendizaje correspondiente al avión Brasilia EMB-120, obteniendo valores de 72,2-81,8% para el avión completo y del 74,7-82,9% para el fuselaje. Mishina (1999) estudia el programa de fabricación del Boeing B-17 Flying Fortress, obteniendo una disminución del 27,9% en la cantidad de horas de trabajo por aparato cada vez que se doblaba la producción, si bien este autor argumenta que las ganancias en productividad estaban provocadas fundamentalmente por mejoras en el sistema de producción más que por el proceso de aprendizaje de los trabajadores.

Argote et al. (1999) también se centran en el estudio del L-1011, pero analizando la persistencia del aprendizaje, así como de la importancia de los costes de ajuste en función de la tasa de producción. En concreto, el programa de producción del Tri-Star L-1011 se caracterizó por experimentar grandes variaciones en la tasa de producción a lo largo del tiempo. Estos autores observan que la depreciación de los conocimientos fue un elemento fundamental en la evolución de este programa y que los costes de producción aumentaban a medida que disminuía la tasa de producción. Benkard (2000) analiza también el aprendizaje en el caso del L-1011, utilizando diferentes especificaciones alternativas en las que se incluyen la depreciación del



conocimiento, los costes de ajuste, precios de los inputs y efectos desbordamiento (*spillovers*). Por su parte, Benkard (2004) realiza un análisis de la dinámica de la industria de los aviones comerciales, introduciendo la curva de aprendizaje y sus persistencia en un modelo oligopolístico dinámico y calibrando el modelo para los datos de producción del L-1011. El modelo calibrado es capaz de replicar los principales aspectos observados en la industria, como es la fijación de un precio de los aparatos persistentemente por debajo de los costes marginales estáticos. Finalmente, Kleiner et al. (2012) analizan el caso de la producción del MD-80, llegando a la conclusión de que el olvido organización es prácticamente inexistente en este caso.

Otras industrias relevantes donde también se han aplicado las curvas de aprendizaje es la producción de equipos para la generación de energía y la industria de semiconductores. Por citar solo los más relevantes, Joskow y Rozanski (1979) estudian el proceso de aprendizaje en la práctica en la construcción y operación de plantas nucleares, medido por una parte como el aumento en la producción de energía eléctrica a medida que se gana experiencia y, por otra, en el proceso de producción de las propias plantas nucleares. Zimmerman (1982) encuentra que los costes de producción de las plantas de energía nuclear disminuyen no solo como consecuencia de que las empresas aumenten su nivel de conocimientos, sino también debido a la experiencia adquirida por la industria, indicando nuevamente la importancia de los efectos desbordamiento. Joskow y Rose (1985) por el contrario, encuentran que la transferencia de experiencia entre las industrias de fabricación de plantas generadoras usando carbón es muy limitado.

Por su parte, Gruber (1992) estudia los procesos de aprendizaje en la industria de chips de memoria semiconductores, obteniendo que los procesos de aprendizaje son muy distintos para los diferentes chips, aunque estos sean muy similares. Por otra parte, obtienen que las curvas de aprendizaje no son muy diferentes para las distintas generales de memorias. Irwin y Klenow (1994) estudian 32 empresas de varios países, que producen diferentes tipos de semiconductores, considerando también la existencia de posibles efectos desbordamiento y obteniendo tasas de aprendizaje

entre el 14 el 28,7%.

## 4.5 Datos y variables

En la literatura empírica relacionada encontramos el uso de básicamente dos tipos de información a la hora de estimar curvas de aprendizaje. En primer lugar, el número de horas-trabajador por unidad producida. Esta es la variable representado a los costes que se ha utilizado habitualmente en la industria aeronáutica y en la industria naval. La otra variable de referencia en la literatura empírica es el precio por unidad producida. Esta variable se ha utilizado fundamentalmente en la industria automovilística y en la industria electrónica. En nuestro caso, no disponemos de información sobre el número total de horas-trabajador por unidad producida, por lo que utilizaremos el precio de producción por unidad. Además, el hecho de que el DoD utilice estimaciones de las curvas de aprendizaje para la fijación del precio de adquisición de los diferentes lotes, hace que la variable relevante para la estimación del aprendizaje en la práctica en esta industria, sea el precio de adquisición, que en la práctica debe ser igual al coste de producción, más el beneficio industrial negociado para la industria.

Nuestro objetivo fundamental consiste en determinar la evolución de precio de los aviones de caza producidos más recientemente en función del número de unidades producidas, como medida del proceso de aprendizaje implícito en la fabricación de los mismos. En este sentido, es de suponer la existencia de una relación directa entre el coste de producción y el precio final del producto. Este supuesto se fundamenta en el hecho de que estamos tratando un producto cuyo precio se determina en un mercado no competitivo o que podríamos denominar de monopolio bilateral. Para definir el precio de un avión existen diferentes medidas. Una de las más usadas es el "coste *flyaway*", que valora el precio del avión en términos de su coste marginal, es decir, lo que cuesta producir un avión, siendo uno de los componentes que determina el precio de adquisición por parte del DoD de estos equipos. De hecho, el DoD

utiliza las curvas de aprendizaje como uno de los instrumentos fundamentales para determinar el precio de adquisición de los aviones, ya que en la fase de adquisición no existe ningún tipo de competencia.

La estimación de la curva de aprendizaje resulta un elemento fundamental a la hora de determinar el precio de los aviones de caza. La existencia de aprendizaje en la práctica implica que, a medida que aumenta el número acumulado de unidades producidas, su precio se ve reducido. Por tanto, el precio por unidad no resulta ser una constante, sino que es una variable que depende del número acumulado de unidades producidas. Este tema ya fue señalado, aunque de manera tangencial, en el capítulo 2, donde se usó como variable el precio de los aviones de caza a reacción. Para definir el precio de un avión de combate, habitualmente se utiliza el precio correspondiente a la unidad producida número 100, tal y como indican Knaack (1978) y Ziemer y Kelly (1993), con objeto de tener en cuenta la curva de aprendizaje y su efecto sobre el coste de producción. El hecho de utilizar como precio de referencia el correspondiente a la unidad producida número 100 resulta de las estimaciones habituales llevadas a cabo para la producción de aeronaves y de la observación de que a partir de dicho número de unidades producidas, las ganancias en experiencia resultan ser muy limitadas, por lo que su precio (coste de producción) se mantiene prácticamente constante.

Los aviones que conforman nuestra base de datos son aquellos que están en fase de producción en el momento actual o lo han estado hasta fechas muy recientes. Estos aviones son el F/A-18E/F Super Hornet, el F-22A Raptor, y el F-35A Lightning II. Los datos correspondientes al F/A-18E/F se refieren a adquisiciones durante el periodo fiscal 1997-2013, sumando un total de 554 unidades producidas. Los datos del F-22A corresponden a las compras realizadas por la USAF para el periodo fiscal 2000-2009, con un total de 182 unidades adquiridas (de un total de 195 unidades producidas, 9 de las cuales fueron aviones de prueba en la etapa I y 6 más, aviones de prueba en la etapa II, un avión para reemplazar un aparato de test perdido en accidente más dos aparatos EMD, Engineering and Manufacturing Development, véase Gertler, 2013).

Finalmente, con respecto al F-35 Lightning II, los datos corresponden a la versión A, dado que aún es muy limitada la producción de las versiones B y C, y solo teniendo en cuenta los aparatos fabricados para los Estados Unidos, incluyendo un total de 108 unidades. En este caso los datos corresponden a las adquisiciones realizadas para los años fiscales 2007 a 2014.

Los datos utilizados tienen frecuencia anual y provienen directamente de los presupuestos del Ministerio de Defensa de los Estados Unidos (DoD). Se trata del precio de adquisición de la aeronave medido por el denominado coste "*flyaway*", que refleja de forma directa a los costes de producción. Por otra parte, la producción viene determinada en términos del número de unidades adquiridas por el DoD. Esta aproximación es correcta en los casos del F-22A Raptor y del F/A-18E/F Super Hornet, modelos para los cuales toda la producción ha sido adquirida por parte de los Estados Unidos. Sin embargo, en el caso del F-35A Lightning II, no todas las unidades producidas de este modelo han sido adquiridas por los Estados Unidos, sino que parte de la producción ha sido adquirida por distintos países. Por otra parte señalar que, tal y como Balut, Gullede y Womer (1989) indican, en el caso de la adquisición de aviones, la información disponible es por lotes anuales, por lo que la cantidad de unidades procurada por el gobierno podría no ser una buena variable proxy de la tasa de producción.

#### 4.5.1 Datos discretos: Lotes

Si se dispone de información por unidad de producción, la curva de aprendizaje puede estimarse directamente a partir de los datos disponibles para cada una de las unidades producidas. Sin embargo, en muchas ocasiones no se dispone de información a nivel de unidad de producción, sino que la información disponible se refiere a lotes. Esto sucede en el caso de una gran variedad de productos y, también, en el caso de la producción de aviones militares. De hecho, este es nuestro caso, donde el precio de los aviones se refiere al precio de un lote determinado. En

este caso, se hace necesario determinar el coste unitario de cada avión, que no es el resultante de dividir el coste total de lote por el número de unidades que forman el lote, debido a la existencia de aprendizaje, que provoca que las primeras unidades del lote tengan un coste mayor que las últimas unidades del mismo. En este caso se plantea un problema adicional, consistente en encontrar la unidad media del lote cuyo coste refleje el coste medio de dicho lote, ya que el aprendizaje hace que el coste medio no se corresponda con la unidad media, sino con una unidad anterior.

Siguiendo a Smunt (1999), el coste total de un lote,  $CTL$ , puede definirse como:

$$CTL = \alpha(q_2^\beta - q_1^\beta) \quad (4.7)$$

donde  $q_2$  es la cantidad acumulada al final del lote y  $q_1$  es la cantidad acumulada producida al principio del lote. De forma similar, el coste por unidad puede definirse como:

$$C = \alpha\beta q^{\beta-1} \quad (4.8)$$

Si multiplicamos el coste unitario del punto medio del lote por la cantidad del lote, debería resultar el coste total del mismo dada por la expresión (4.7). Si definimos  $q_m$  como la unidad media del lote, entonces tendríamos:

$$CTL = \alpha\beta q_m^{\beta-1}(q_2 - q_1) \quad (4.9)$$

Dado que las expresiones (4.7) y (4.9) son las mismas, igualándolas podemos obtener una expresión de la unidad media del lote, resultando:

$$\alpha\beta q_m^{\beta-1}(q_2 - q_1) = \alpha(q_2^\beta - q_1^\beta) \quad (4.10)$$

y operando

$$q_m = \left[ \frac{(q_2^\beta - q_1^\beta)}{\beta(q_2 - q_1)} \right]^{\frac{1}{\beta-1}} \quad (4.11)$$

El problema para calcular la anterior expresión es que necesitamos previamente conocer cuál es el valor de  $\beta$ . En la práctica, se han propuesto diferentes alternativas. La primera consiste en estimar la curva de aprendizaje para los valores iniciales, usando la unidad media. A partir del índice de aprendizaje estimado inicialmente podemos obtener el valor de la unidad media del lote, dada por la expresión (4.11). Con el nuevo valor medio para cada lote se volvería a estimar la curva de aprendizaje, repitiendo el paso anterior. Dicho procedimiento iterativo se repetiría hasta alcanzar la convergencia en términos del índice de aprendizaje. Un ejemplo práctico de este procedimiento es el realizado por Shiue (1991). Otro procedimiento alternativo consiste en suponer un valor inicial para la curva de aprendizaje, por ejemplo del 80%, y utilizando el índice de aprendizaje correspondiente estimar la unidad media por lote. A partir de este valor inicial se procede a estimar de nuevo la curva de aprendizaje, siguiendo el método iterativo descrito anteriormente. El valor inicial para la curva de aprendizaje dependería del tipo de industria objeto de estudio.

Otra forma alternativa consiste en usar una aproximación al punto medio, procedimiento que resulta independiente de la tasa de aprendizaje. Loerch (2013) propone la siguiente aproximación para estimar el punto medio de un lote:

$$q_m = \frac{q_2 + q_1 + 2\sqrt{q_1 q_2}}{4} \quad (4.12)$$

mostrando que los resultados obtenidos son muy similares a los procedimientos iterativos descritos anteriormente. En nuestro análisis utilizamos esta aproximación del punto medio para cada lote.

## 4.6 Resultados

Para implementar econométricamente la curva de aprendizaje (CA), definida anteriormente, basta con aplicar logaritmos a la expresión (4.4), tal que:

$$\log P_i = \alpha + \beta \log E_i + \varepsilon_i \quad (4.13)$$

donde  $\alpha > 0$ , representando el coste de producción de la primera unidad y donde  $-1 < \beta < 0$  representa el índice de aprendizaje. Dependiendo de si usamos la curva unitaria o la acumulativa media, la variable dependiente puede ser el precio de la unidad  $i$ , o el precio medio hasta la unidad  $i$ . En nuestro caso vamos a usar la especificación unitaria. Dado que los datos disponibles reflejan el número de adquisiciones por año, el precio se refiere al de la unidad media de cada lote anual, siendo el indicador de experiencia la producción acumulada. Al margen de la producción acumulada, también utilizamos como variables explicativas adicionales el tiempo y la tasa de producción, siendo esta última aproximada por las adquisiciones anuales. La pendiente de la curva de aprendizaje viene dada por el parámetro  $\theta$ , siendo  $\theta = 2^\beta$ .

Tabla 4.1: Estimación de la curva de aprendizaje. F/A-18E/F Super Hornet

	(1)	(2)	(3)	(4)
Constante	5,700 (0,119)***	6,107 (0,123)***	6,341 (0,110)***	6,344 (0,117)***
Aprendizaje	-0,218 (0,022)***	-0,347 (0,033)***	-0,180 (0,012)***	-0,173 (0,057)***
Tiempo	-	0,031 (0,007)***	-	-0,001 (0,011)
Producción	-	-	-0,245 (0,035)***	-0,254 (0,076)***
$\theta$ (%)	85,98	78,62	88,27	88,70
$R^2$	0,867	0,943	0,969	0,969

Errores estándar estimados entre paréntesis.

\*\*\*, \*\*, \*, implica significatividad al 1%, 5% y 10%, respectivamente.

Tabla 4.2: Estimación de la curva de aprendizaje. F-22A Raptor

	(1)	(2)	(3)	(4)
Constante	13,099 (0,053)***	13,109 (0,064)***	13,081 (0,075)***	13,012 (0,072)***
Aprendizaje	-0,228 (0,013)***	-0,237 (0,032)***	-0,241 (0,037)***	-0,501 (0,134)***
Tiempo	-	0,004 (0,015)	-	0,292 (0,146)*
Producción	-	-	0,025 (0,068)	0,064 (0,032)*
$\theta$ (%)	85,40	84,85	84,62	70,66
$R^2$	0,975	0,976	0,975	0,985

Errores estándar estimados entre paréntesis.

\*\*\*, \*\*, \*, implica significatividad al 1%, 5% y 10%, respectivamente.

Tabla 4.3: Estimación de la curva de aprendizaje. F-35A Lightning II

	(1)	(2)	(3)	(4)
Constante	5,752 (0,061)***	5,706 (0,066)***	5,774 (0,082)***	5,765 (0,018)***
Aprendizaje	-0,135 (0,017)***	-0,064 (0,056)	-0,106 (0,071)	0,257 (0,041)***
Tiempo	-	-0,042 (0,031)	-	-0,117 (0,012)***
Producción	-	-	-0,049 (0,115)	-0,325 (0,038)***
$\theta$ (%)	91,07	-	-	83,68
$R^2$	0,911	0,934	0,914	0,996

Errores estándar estimados entre paréntesis.

\*\*\*, \*\*, \*, implica significatividad al 1%, 5% y 10%, respectivamente.

Las tablas 4.1 a 4.3 muestran los resultados de las estimaciones de la curva de aprendizaje para los tres aviones analizados. Utilizando la especificación básica, que es la que se utiliza en la literatura para estimar la curva de aprendizaje, y estimando por mínimos cuadrados ordinarios, obtenemos una curva de aprendizaje del 86% para el Super Hornet, del 85,4% para el Raptor y del 91% para el Lightning II. En los dos primeros casos, la tasa de aprendizaje resulta similar a la que se viene obteniendo para esta industria en modelos de caza construidos con anterioridad, que



se sitúa en torno al 85%. No obstante, la tasa de aprendizaje obtenida para el F-35A es mucho más reducida que la obtenida para los dos modelos anteriores.

Introduciendo el tiempo en la regresión, éste solo resulta significativo para el caso del Super Hornet, pero con un valor estimado positivo, contrario al esperado. Esto puede ser debido al hecho de que utilizamos datos de lotes anuales, que pueden no recoger de forma adecuada la relación teórica negativa entre el tiempo y los costes de producción. La columna (3) muestra los resultados, pero considerando la tasa de producción utilizando como proxy de la misma la cantidad de unidades adquiridas. Únicamente para el caso del Super Hornet, el parámetro estimado es significativo, siendo en este caso la curva de aprendizaje del 88,27%. Por último, la columna (4) muestra los resultados considerando tanto el tiempo como la tasa de producción. En este caso el tiempo resulta ser una variable significativa y con el signo correcto para el F-35A, mientras que en el caso del F-22A es significativa al 10%, pero con signo contrario al teórico, al igual que para la tasa de producción.

Por otra parte, la constante estimada nos indica el valor de la primera unidad producida. El valor estimado de la constante es muy similar para el Super Hornet y el Lightning II, mientras que es mucho más elevada para el caso del Raptor. De la estimación realizada, se obtiene que el coste de la primera unidad producida del F/A-18 y del F-35A, es sitúa en torno a los 298 millones de dólares (constantes, utilizando el deflactor de adquisiciones del DoD, correspondiente al año 2014), mientras que el coste de la primera unidad producida del F-22A alcanza los 440 millones de dólares.

A continuación, vamos a proceder a reestimar la curva de aprendizaje pero considerando la posibilidad del olvido organizacional. El stock de conocimientos de los trabajadores se define en términos del stock de conocimientos hasta el periodo anterior más la experiencia añadida entre ambos periodos, tal que:

$$E_t = \lambda E_{t-1} + q_t \quad (4.14)$$

siendo  $E_t$  la experiencia acumulada hasta el momento  $t$  y  $q_t$  es la experiencia adquirida entre el momento  $t-1$  y el momento  $t$ , equivalente al número de unidades

producidas en dicho espacio de tiempo. El parámetro  $\lambda$  ( $0 < \lambda < 1$ ) mide la depreciación que sufre el stock de experiencia periodo a periodo. Si  $\lambda = 1$ , toda la experiencia previamente adquirida se transmite al siguiente periodo sin que sufra ninguna depreciación. Por el contrario si  $\lambda = 0$ , esto significa que la depreciación es total y no hay ninguna transmisión de experiencia adquirida entre periodos.

Con objeto de introducir la depreciación de la experiencia dentro de la función de aprendizaje, la ecuación (4.13) la estimamos usando mínimos cuadrados no lineales, de acuerdo con la siguiente especificación:

$$\log P_i = \alpha + \beta \log(\lambda E_{i-1} + q_i) + \gamma T_i + \varepsilon_i \quad (4.15)$$

Los resultados de las estimaciones aparecen en las tablas 4.4 a 4.6 y donde la variable "Olvido" hace referencia al valor estimado del parámetro  $\lambda$ . Tal y como podemos observar, los resultados muestran que dicho parámetro no es significativamente distinto de cero para el caso del F-22 y del F-35. Esto significa que la depreciación de la experiencia adquirida en la producción de estas unidades es total, sobre una base anual. El valor estimado para el caso del Super Hornet es de 0,072, indicando que, sobre una base anual, únicamente se mantiene el 7,2% de la experiencia adquirida.

Tabla 4.4: Estimación de la curva de aprendizaje. F/A-18E/F

	(1)	(2)
Constante	6,481 (0,168)***	6,464 (0,188)***
Aprendizaje	-0,504 (0,046)***	-0,498 (0,054)***
Tiempo	-	-0,002 (0,011)
Olvido	0,072 (0,010)***	0,064 (0,0351)*
$\theta$ (%)		
$R^2$	0,941	0,941

Errores estándar estimados entre paréntesis.

\*\*\*, \*\*, \*, implica significatividad al 1%, 5% y 10%, respectivamente.

Tabla 4.5: Estimación de la curva de aprendizaje. F-22A

	(1)	(2)
Constante	13,065 (0,098)***	13,135 (0,292)***
Aprendizaje	-0,189 (0,072)**	-0,229 (0,192)
Tiempo	-	0,012 (0,034)
Olvido	2,514 (5,458)	1,861 (5,120)
$\theta$ (%)		-
$R^2$	0,941	0,943

Errores estándar estimados entre paréntesis.

\*\*\*, \*\*, \*, implica significatividad al 1%, 5% y 10%, respectivamente.

Tabla 4.6: Estimación de la curva de aprendizaje. F-35A

	(1)	(2)
Constante	5,965 (0,086)***	5,894 (0,721)***
Aprendizaje	-0,239 (0,041)***	-0,165 (0,924)
Tiempo	-	-0,040 (0,551)
Olvido	0,179 (0,144)	-0,019 (2,921)
Curva de aprendizaje (%)		-
$R^2$	0,960	0,970

En términos generales, estos resultados no son muy diferentes de la evidencia empírica existente, en la cual la depreciación de la experiencia parece ser muy significativa. Por ejemplo, Epple, Argote y Murphy (1996) para la industria del automóvil, estiman una transferencia de conocimientos de 0,988 usando datos diarios, es decir, el olvido diario es del 0,12%, lo cual equivale a aproximadamente una depreciación del 33% mensual (suponiendo un total de 20 días de trabajo al mes). No obstante, otros trabajos obtienen una menor velocidad en la depreciación de la experiencia. Así, Benkard (2000) para el caso del Lockheed L-1011 TriStar, estima un parámetro entre 0,952 y 0,96, utilizando datos de producción mensuales.

Estos valores estimados implican que aproximadamente el 60% de la experiencia existente al principio de un año sobrevive al final de dicho periodo.

## 4.7 Discusión de los resultados

De los resultados de la estimación de las curvas de aprendizaje realizadas en el apartado anterior pueden extraerse un amplio conjunto de conclusiones que son relevantes tanto para determinar el proceso de aprendizaje en la producción de estos aviones como en la determinación de su precio final, así como algunos elementos importantes respecto a la estrategia de la industria de utilizar una misma plataforma con diferentes variantes. El primer resultado que obtenemos es que las tasas de aprendizaje en la producción del F/A-18E/F Super Hornet y del F-22A Raptor son mucho más elevadas que las correspondientes al F-35A Lightning II. De hecho los resultados obtenidos para los dos primeros modelos son muy similares a los obtenidos en la literatura para otros tipos de aviones. Por ejemplo, Wright (1936) estima un valor de  $\beta = -0.322$ , el cual corresponde a una curva de aprendizaje del 80%.

En el caso del F/A-18E/F Super Hornet obtenemos valores entre el 78 y el 88%, dependiendo de si se incluyen en la estimación variables adicionales como el tiempo y la tasa de producción. Un resultado similar se obtiene para el caso del F-22A Raptor, cuya curva de aprendizaje se sitúa entre el 70 y el 85%. No obstante, la regresión básica arroja para ambos modelos una curva de aprendizaje del 85%, que es el valor que consideramos como de referencia. La inclusión de las otras dos variables consideradas no aporta evidencia clara, lo cual viene explicado por dos elementos. En primer lugar, usamos datos anuales y para periodos relativamente cortos en los cuales cada modelo está en producción. En segundo lugar, la tasa de adquisición, que utilizamos como proxy de la tasa de producción, se mantiene muy estable en el tiempo, por lo que tiene poco contenido informativo..

La estimación para F-35A arroja resultados diferentes, obteniéndose una curva

de aprendizaje del 91%. El F-35 se ensambla en la planta de Lockheed en Fort Worth, Texas. La característica diferenciadora respecto a los dos modelos anteriores es que la cadena de montaje produce las tres versiones del F-35, A, B y C, que presentan significativas diferencias entre ellas. La idea de partida para el diseño del F-35 es utilizar un mismo fuselaje para producir tres variantes con diferentes características: una versión standard, otra versión de despegue y aterrizaje vertical y una versión con capacidad para operar desde portaaviones. Sin embargo, la producción simultánea de las tres diferentes versiones puede provocar importantes problemas respecto a la adquisición del aprendizaje y a su depreciación. La alternancia de los diferentes modelos en la misma cadena de montaje, supone la fabricación de un producto no homogéneo, por lo que cada versión está expuesta a periodos en los que su producción se encuentra detenida.

A este respecto, un estudio interesante es el realizado por Kleiner et al. (2012), los cuales analizan los casos de la producción del DC-9 y del MD-80. Tal y como apuntan estos autores, estos dos modelos comparten el mismo fuselaje, aunque las alas, la electrónica y los sistemas de integración son diferentes. La mezcla de ambos modelos en la misma línea de producción provocó un aumento muy significativo de los costes de fabricación del DC-9. Este podría ser también el caso del F-35, tal y como parece confirmar nuestros resultados. De hecho, las tres variantes del F35, A, B y C, presentan importantes diferencias entre ellas.

Al margen de los tres modelos anteriores, también se ha estimado la curva de aprendizaje correspondiente al EA-18G Growler. Este modelo es una versión del F/A-18E/F Super Hornet cuya misión principal es la guerra electrónica. Su producción se inició en el año 2007, una vez que ya habían sido adquiridas un número elevado de unidades del Super Hornet (más de 350 unidades). Aunque la plataforma es similar, incluye numerosas modificaciones para su adaptación a la misión encomendada de guerra electrónica. Sin embargo, el índice de aprendizaje estimado en este caso es de cero, lo que implica una curva de aprendizaje del 100%, es decir, no se observa ningún tipo de aprendizaje en la producción de esta versión,

ya que todo el aprendizaje había sido ya adquirido durante la producción del Super Hornet. Este caso contrasta con el obtenido para el F-35.

La especificación básica de la curva de aprendizaje ha sido extendida incluyendo las variables tiempo y la tasa de producción. Sin embargo, este análisis tiene importantes limitaciones. La primera es que los datos disponibles tienen frecuencia anual. La segunda es que la tasa de producción ha sido aproximada por el número de unidades adquiridas por parte del DoD. En el caso del F-22A y del F/A-18E/F, el único demandante de estos modelos es los Estados Unidos. Sin embargo, aún en este caso, el número de unidades adquiridas en cada año fiscal no tiene porqué coincidir con el número de unidades efectivamente producidas. No obstante, la diferencia probablemente sea muy reducida, dado que el nivel de adquisiciones y, por tanto, el nivel de producción, se mantiene prácticamente constante año a año. En el caso del F-35A, la diferencia es más significativa, dado que la producción real es superior a la utilizada en nuestro análisis, debido a que parte de la producción de este modelo de caza ha sido destinado a otros países distintos a los Estados Unidos.

Estos resultados ponen en duda la creación de plataformas con diferentes especificaciones para ser producidas de forma simultánea, en el caso en que planteen diferencias significativas, como estrategia para la reducción de los costes de producción y del precio de adquisición en la industria de aviones de caza. En el caso del F-35, la versión C tiene una mayor envergadura que las otras dos versiones, mientras que el motor de la versión B es muy diferente al de las otras dos versiones. Esto hace que la producción simultánea de las tres variantes, en la misma cadena de montaje, pueda afectar negativamente al proceso de aprendizaje en la práctica ralentizándolo en el tiempo e incluso aumentando su depreciación

Por otra parte, el valor de la constante de la curva de aprendizaje indica el coste estimado para la primera unidad producida de cada modelo. El valor estimado es muy similar para los F/A-18E/F y el F-35A, situándose en aproximadamente 298 millones de dólares (a precios constantes de 2014), mientras que es mucho más elevado para el caso del F-22A, superando los 440 millones de dólares. Si

finalmente el aprendizaje que se alcance en la producción del F-35 fuese similar a la de los otros modelos, entonces sería posible obtener un avión de 5ª generación a precios contenidos y mucho más moderados que los correspondientes al F-22A, siendo precisamente este el objetivo que persigue el programa del F-35.

Los datos son anuales, lo que dificulta la estimación de la persistencia en la experiencia. Además, la tasa de producción es relativamente reducida, por lo que es de esperar tasas elevadas de depreciación en la experiencia adquirida.

## 4.8 Conclusiones

En este capítulo hemos estudiado la relación entre el precio de adquisición de los aviones de caza y el número de unidades producidas de los mismos. Al aumentar el número de unidades producidas de un determinado modelo de caza no solo disminuye el coste fijo medio asociado a la fase de diseño y experimentación, que son considerados costes hundidos y que pueden ser muy elevados, más que el propio coste de producción de cada unidad, sino que también disminuyen los costes de producción por unidad debido a la existencia de un proceso de aprendizaje en la práctica. El aprendizaje en la práctica constituye un elemento de vital importancia en una gran variedad de industrias y supone una importante disminución en los costes de producción a medida que se fabrica un determinado bien o equipo.

El aprendizaje en la práctica es un fenómeno que aparece en aquellos procesos de fabricación que son intensivos en mano de obra cualificada y que implican la producción de equipos o bienes de cierta complejidad. Este es el caso de la industria aeroespacial, donde la fase más costosa es el ensamblaje del equipo final, que requiere una gran cantidad de mano de obra y de elevada cualificación, debido a que los equipos finales implican la unión de un gran número de componentes de alto contenido tecnológico y la integración de los mismos supone un proceso complejo.

En este capítulo hemos estimado las curvas de aprendizaje correspondientes a 3 modelos de caza de reciente fabricación: El F/A-18E/F Super Hornet, el F-22A

Raptor, y el F-35A Lightning II. Los resultados obtenidos muestran que la curva de aprendizaje para los dos primeros modelos es similar a la obtenida para modelos anteriores, situándose en torno al 85%. Sin embargo, el aprendizaje observado en la producción del F-35A es mucho más reducida.



# Capítulo 5

## Consideraciones finales

A lo largo de esta Tesis Doctoral hemos analizado diferentes cuestiones relacionadas con el progreso tecnológico y los costes de los aviones de caza a reacción. En términos generales, tres han sido las cuestiones fundamentales que hemos analizado. En primer lugar, un análisis de cuál ha sido el aumento en el precio de estos equipos ajustado por la calidad con el objetivo de obtener una cuantificación del progreso tecnológico incorporado en estos equipos de defensa. En segundo lugar, hemos estimado la tendencia tecnológica general de la industria y la comparación de la misma para las industrias aeronáuticas de los Estados Unidos y de la Unión Soviética/Rusia. Por último, y en tercer lugar, hemos estudiado cómo es el proceso de aprendizaje en la práctica en los últimos modelos producidos y sus implicaciones en el precio final en función de las unidades producidas.

Los aviones de caza a reacción han experimentado un significativo cambio tecnológico desde su invención y suponen seguramente uno de los productos tecnológicos más avanzados de entre los existentes en la actualidad y que incorporan un mayor número de innovaciones tecnológicas. Desde la invención del avión, su rápida incorporación como arma durante la Primera Guerra Mundial, el desarrollo de los motores a reacción a principios de la década de los 40 del siglo XX, hasta los últimos desarrollos de principios del siglo XXI, los aviones de caza han sufrido un profundo proceso de cambio, aumentando de forma significativa sus capacidades

operativas. El primer objetivo de esta Tesis Doctoral ha sido precisamente medir, en términos cuantitativos, dicho proceso de progreso tecnológico, a través de la determinación del precio ajustado por la calidad, usando el enfoque de precios hedónicos.

1. En el ámbito de la adquisición de equipos de defensa, una de las mayores preocupaciones de los gobiernos está relacionada con el precio de los aviones de caza. Así, el precio de los aviones de caza no ha dejado de crecer a lo largo del tiempo, incluso a tasas muy elevadas. Esto ha supuesto importantes problemas para la renovación de las flotas de aviones de caza, dadas unas limitaciones presupuestarias, lo que ha conllevado el aumento en la vida operativa de los cazas ya en servicio y/o la reducción del número de nuevas unidades incorporadas para sustituir a las dadas de baja. En términos generales, el precio de los aviones de caza producidos por los Estados Unidos, ha aumentado de media anual en torno al 13%, para los aviones de caza a reacción desarrollados durante el periodo 1944-2012, porcentaje muy superior al incremento medio general de los precios.
2. Este importante aumento en el precio de los aviones de caza a lo largo del tiempo ha ido paralelo al aumento de la carga tecnológica incorporada en estos equipos. Así, los aviones de caza no son un producto homogéneo en el tiempo, dado que las características técnicas y operativas de los mismos no se mantienen constante, sino que experimentan aumentos progresivos conforme se desarrollan nuevos modelos. Esto provoca que el coste por unidad sea más elevado con el paso del tiempo.
3. Un elemento importante tener en cuenta respecto a la evolución de los precios de los aviones de caza es la Ley de Augustine.
4. La estimación de los precios ajustados por la calidad, indican que el aumento de los precios experimentado por estos equipos, sin tener en cuenta los cambios

tecnológicos, ha sido de solo el 2,5%, y en cualquier caso, inferior al aumento en los distintos índices de precios,

5. De la estimación anterior se obtiene que el progreso tecnológico incorporado en los aviones de caza desarrollados por los Estados Unidos, ha sido superior al 10% anual para el periodo 1944-2012.
6. Existe la opción de producir aviones de caza más baratos y, de este modo adquirir un mayor número de unidades. Sin embargo, esto sería posible a costa de un menor nivel tecnológico incorporado y de menores capacidades operativas. Un ejemplo histórico de esta opción lo tenemos en el desarrollo del F-5. No obstante, esta opción no parece que sea considerada en la actualidad por los diferentes gobiernos, incluso por aquellos que cuentan con recursos financieros escasos. Esto se debe fundamentalmente al escaso valor que tienen estos equipos para cumplir sus objetivos en el caso en que presenten un menor nivel tecnológico frente a potenciales equipos rivales.
7. Obviamente, cada Fuerza Aérea tiene el deseo y objetivo de contar con los aviones más avanzados y de mayores capacidades operativas con el objetivo de alcanzar la superioridad aérea. Y es aquí donde entra en vigor la Ley de Augustine, que puede suponer un riesgo importante para el mantenimiento futuro de las capacidades operativas de las Fuerzas Aéreas a la hora de sustituir equipos obsoletos o que han llegado al final de su vida operativa por los nuevos cazas de última generación.
8. De todo lo anterior resulta que el número de aviones de caza a producir de diferentes modelos por parte de las distintas industrias aeronáuticas será cada vez más reducido. Esto puede observarse claramente en el número de modelos alternativos desarrollados para cada generación de cazas, que muestra una tendencia decreciente.

Otro elemento clave analizado en la presente Tesis Doctoral ha sido la estimación

de la tendencia tecnológica general que ha ido alcanzando a lo largo del tiempo la industria que produce aviones de caza. Este análisis también permite la comparación en el nivel tecnológico alcanzado por diferentes industrias aeronáuticas, así como la determinación de la relación entre el nivel tecnológico de cada modelo de caza desarrollado. Para ello hemos desarrollado un método simple, pero que permite medir y comparar el nivel tecnológico de cada modelo desarrollado respecto a la tendencia general de la industria. Este análisis puede tener implicaciones muy importantes, tanto para los gobiernos y los responsables de defensa, como para la propia industria. Dicho análisis ha sido utilizado para comparar las industrias de los Estados Unidos frente a la de la Unión Soviética/Rusia, en lo que se refiere a la producción de aviones de caza. Los principales resultados alcanzados se enumeran a continuación.

1. En términos medios, para el periodo 1944-2012, la industria aeronáutica de los Estados Unidos ha estado por delante de la industria de la Unión Soviética/Rusia. Esta ventaja tecnológica ha sido de, aproximadamente 2 años.
2. La ventaja tecnológica estimada de la industria aeronáutica norteamericana frente a la soviética/rusa, no se ha mantenido constante a lo largo del tiempo, sino que ha ido cambiando en función del desarrollo de modelos particulares. Aunque en los inicios la industria norteamericana era más avanzada que la soviética en el desarrollo de aviones a reacción, dicha brecha se cubrió rápidamente por el acceso de los soviéticos a los motores británicos y a la tecnología alemana. La década de los 50 estuvo determinada por la ventaja tecnológica de la industria norteamericana, mientras que la década de los 60, la ventaja fue del lado soviético. El punto de inflexión se produce en 1997, con el desarrollo por parte de los Estados Unidos del primer caza de 5ª generación, que hace que la ventaja tecnológica de la industria norteamericana sea muy superior a la rusa.

3. El análisis realizado también permite determinar la posición de cada modelo respecto a la tendencia tecnológica general de la industria en el momento en el que dicho modelo efectuó su primer vuelo. Esto permite clasificar cada modelo de caza como "adelantado" o "retrasado" tecnológicamente respecto al nivel tecnológico alcanzado por la industria.
4. A partir de los resultados anteriores es posible determinar lo que hemos denominado la frontera tecnológica, compuesta por aquellos modelos que han definido el nivel tecnológico más elevado en cada momento del tiempo. Esta frontera tecnológica ha estado compuesta por aviones tales como el P/F-80 Shooting Star, el F-100A Super Sabre, el F-105B Thunderchief, the F-14A Tomcat, el F-15A Eagle y el F-22A Raptor, por parte de la industria de los Estados Unidos, y por el MiG-15, MiG-17, Su-15, MiG-25P, MiG-31 y Su-27S, por parte de la industria de la Unión Soviética/Rusia.
5. Finalmente, los resultados obtenidos ponen en duda la capacidad de la industria aeronáutica rusa para desarrollar modelos de caza con un nivel tecnológico similar a los de la industria de los Estados Unidos. Con el desarrollo del F-22A, cuyo primer vuelo tuvo lugar en 1997, la industria norteamericana se situó en torno a 20 años por delante de la rusa. La respuesta de la industria rusa ha sido el desarrollo del T-50 PAK-FA. Sin embargo, el primer vuelo de este modelo no tuvo lugar hasta el 2009 (12 años después del primer vuelo del F-22A), mientras que su nivel tecnológico respecto al F-22A es de solo un año y medio. Además, la estimación realizada sitúa a este modelo como un caza "retrasado" respecto a la tendencia tecnológica general de la industria, cuantificándose dicho retraso en torno a 3 años.

Por último, y en tercer lugar, esta Tesis Doctoral ha analizado las curvas de aprendizaje y la persistencia de la experiencia adquirida en la producción de tres modelos de caza recientes. Estos son el F/A-18E/F Super Hornet, el F-22A Raptor y el F-35A Lightning II. El proceso de aprendizaje en la práctica que se observa en

la fabricación de aviones tiene importantes consecuencias en la determinación del precio final de los mismos.

1. No obstante, el diseño y desarrollo de un único modelo con versiones muy diferenciadas tampoco parece ser la solución, a tenor de los resultados obtenidos para el caso del F-35. La producción de un equipo homogéneo genera importantes sinergias en términos de experiencia y acumulación de conocimientos, que pueden tener un importante impacto sobre los costes de producción.
2. De hecho, la existencia de la curva de aprendizaje implicaría que un solo modelo de caza debería ser producido al mismo tiempo.
3. Por último, indicar que el estudio futuro de las curvas de aprendizaje para cada una de las variantes del F-35, puede ser fundamentalmente para determinar la mejor estrategia a seguir por parte de la industria aeronáutica en el desarrollo de aviones de caza. En el momento actual, la producción aún es muy limitada para las versiones B y C de este caza, por lo que no es posible calcular las curvas de aprendizaje para los diferentes modelos. Sin embargo, a medida que progresa la producción, se dispondrá de la información necesaria, por lo que será posible conocer si esta estrategia de la industria es adecuada o si, por el contrario, esta estrategia retrasa el proceso de aprendizaje en la práctica.

# Bibliografía

- [1] Alchian, A. (1958): *Costs and outputs*. Rand Corporation.
- [2] Alchian, A. (1963): Reliability of progress curves in airframe production. *Econometrica*, 31(4), 679-693.
- [3] Alexander, A.J., y Nelson, J.R. (1973): Measuring technological change: Aircraft turbine engine. *Technological Forecasting and Social Change*, 5, 189-203.
- [4] Alexander, A.J. (1993): Comment on The deflation of military aircraft by R. Ziemer y P. Kelly, en *Price measurements and their uses*, M. Foss, M. Manser y A. Young (eds.). University of Chicago Press.
- [5] Arena, M., Younossi, O., Brancato, K., Blickstein, I., y Grammich, C. (2008): *Why has the cost of fixed-wing aircraft risen? A macroscopic examination of the trends in U.S. military aircraft costs over the past several decades*. RAND Corporation.
- [6] Argote, L., Beckman, S.L., y Epple, D. (1990): The persistence and transfer of learning in industrial settings, *Management Science*, 36(2), 140-154.
- [7] Arrow, K.J. (1962): The economic implications of learning by doing. *Review of Economic Studies*, 29(3), 155-173.
- [8] Asher, H. (1956): *Cost-quantity relationships in the airframe industry*. Rand Corporation.

- [9] Augustine, N.R. (1987): *Augustine's Laws*. Penguin Books: New York.
- [10] Bailey, C. (1989): Forgetting and the learning curve: A laboratory study. *Management Science*, 35(4), 340-352.
- [11] Bajari, P. y Benkard, C.L. (2005): Demand estimation with heterogeneous consumers and unobserved product characteristics: A hedonic approach. *Journal of Political Economy*, 113(6), 1239-1276.
- [12] Balut, Gullede y Womer (1989)
- [13] Benkard, C.L. (2000): Learning and forgetting: The dynamics of aircraft production. *American Economic Review*, 90(4), 1034-1054.
- [14] Benkard, C.L. (2004): A dynamic analysis of the market for wide-bodied commercial aircraft. *Review of Economic Studies*, 71, 581-611.
- [15] Besanko, D., Doraszelski, U., Kryukov, Y. y Satterthwaite, M. (2010): Learning-by-doing, organizational forgetting, and industry dynamics. *Econometrica*, 78(2), 453-508.
- [16] Bonnetain, P. (2003): A hedonic price model for islands. *Journal of Urban Economics*, 54(2), 368-377.
- [17] Boston Consulting Group (1968): *Perspective on experience*. Boston Consulting Group Inc.
- [18] Cabral, L. y Riordan, M. (1994): The learning curve, market dominance, and predatory pricing. *Econometrica*, 62, 1115-1140.
- [19] Coccia, M. (2005): Technometrics: Origins, historical evolution and new directions. *Technological Forecasting and Social Change*, 72(8), 944-979.
- [20] Court, A. (1939): Hedonic price indexes with automotive examples, in *The Dynamics of Automobile Demand*, New York, General Motors Corporation.



- [21] Darr, E., Argote, L. y Epple, D. (1995): The acquisition, transfer, and depreciation of knowledge in service organizations: Productivity in franchises. *Management Science*, 41(11), 1750-1762.
- [22] Department of the Navy: *Budget estimates, aircraft produrement* (several years).
- [23] Dutton, J. y Thomas, A. (1984): Treating progress functions as a managerial opportunity. *The Academy of Management Review*, 9(2), 235-247.
- [24] Dutton, J., Thomas, A. y Butler, J. (1984): The history of progress functions as a managerial technology. *Business History Review*, 58(2), 204-233.
- [25] Frenken, K., Saviotti, P.O. y Trommetter, M. (1999): Variety and niche creation in aircraft, helicopters, motorcycles and microcomputers. *Research Policy*, 28, 469-488.
- [26] Frischtak, C.R. (1994): Learning and technical progress in the commuter aircraft industry: an analysis of Embraer's experience. *Research Policy*, 23, 601-612.
- [27] Fudenberg, D. y Tirole, J. (1983): Learning-by-doing and market performance. *Bell Journal of Economics*, 14, 522-530.
- [28] Gertler (2013)
- [29] Griliches, Z. (1961): Hedonic price indexes for automobiles: An econometric analysis of quality change, in *The Price Statistics of the Federal Government: Review, Appraisal, and Recommendations*. National Bureau of Economic Research, n. 73.
- [30] Gruber, H. (1992): The learning curve in the production of semiconductor memory chips. *Applied Economics*, 24, 885-894.

- [31] Gunston, B. (2000): *The Osprey Encyclopedia of Russian Aircraft*. Osprey Publishing, Oxford: UK.
- [32] Hartley, K. (1969): Estimating military aircraft production outlays: The British experience. *Economic Journal*, 79(316), 861-881.
- [33] Hartley, K. (2010): The case for defence. *Defence and Peace Economics*, 21(5-6), 409-426.
- [34] Hirsch, W.Z. (1952): Manufacturing progress functions. *Review of Economics and Statistics*, 34(2), 143-155.
- [35] Hirsch, W.Z. (1956): Firm progress ratios. *Econometrica*, 24(2), 136-143.
- [36] Hirshleifer, J. (1962): The firm's cost function: A successful reconstruction? *Journal of Business*, 35(3), 235-255.
- [37] Holmes, T. (2007): *Jane's U.S. Military Aircraft Recognition Guide*. HarperCollins: New York.
- [38] Hutzler, W.P., Nelson, J.R., Pei, R.Y. y Francisco, C.M. (1985): Nonnuclear air-to-surface ordnance for the future: An approach to propulsion technology risk assessment. *Technological Forecasting Social Change*, 27, 197-227.
- [39] Inman, O.L., Anderson, T.R. y Harmon, R.R. (2006): Predicting U.S. jet fighter aircraft introductions from 1944 to 1982: A dogfight between regression and TFDEA. *Technological Forecasting Social Change*, 73, 1178-1187.
- [40] Irwin, D.A. y Klenow, P.J. (1994): Learning-by-doing spillovers in the semiconductor industry. *Journal of Political Economy*, 102(6), 1200-1227.
- [41] Jackson, P., Munson, K. y Peacock, L. (2006): *Jane's All the World's Aircraft*. Alexandria, VA: Jane's Information Group.

- [42] Joskow, P. y Rozanski, G. (1979): The effects of learning by doing on nuclear plant operation reliability. *Review of Economics and Statistics*, 61(2), 161-168.
- [43] Joskow, P. y Rose, N. (1985): The effects of technological change, experience, and environmental regulation on the construction cost of coal-burning generating units. *The RAND Journal of Economics*, 16(1), 1-27.
- [44] Keegan, J. (1993): *A History of Warfare*. London: Hutchinson.
- [45] Kirkpatrick, D.L. (2004): Trends in the costs of weapon systems and the consequences. *Defence and Peace Economics*, 15, 259-273.
- [46] Knaack, M. (1978): *Encyclopedia of US Air Force Aircraft and Missile Systems, Volume 1*. Washington DC: US Government Printing Office.
- [47] Kleiner, M., Nickelsburg, J. y Pilarski, A. (2012): Organizational and individual learning and forgetting. *Industrial and Labor Relations Review*, 65(1), article 4.
- [48] Kouvaritakis, N., Soria, A. y Isoard, S. (2000): Modelling energy technology dynamics: methodology for adaptive expectations models with learning by doing and learning by searching. *International Journal of Global Energy Issues*, 14(1-4), 104-115.
- [49] Martino, J.P. (1985): Measurement of technology using trade-off surfaces. *Technological Forecasting and Social Change*, 27, 147-160.
- [50] Martino, J.P. (1993): A comparison of two composite measures of technology. *Technological Forecasting and Social Change*, 44, 147-159.
- [51] Mishina, K. (1999): Learning by new experiences: Revisiting the Flying Fortress learning curve, in *Learning by Doing in Markets, Firms, and Countries*, N.R. Lamoreaux, D.M. Raff and P. Telmin (Eds.), University of Chicago Press.
- [52] Lane, F.C. (1951): *Ships for Victory*. Johns Hopkins Press: Baltimore.

- [53] Nicholas, T. y Rossi, R. (1991): *U.S. Historical Military Aircraft and Missile Data Book*. Fountain valley, CA: Data Search Associates.
- [54] Pugh, P.G. (2007): Retrospect and prospect: Trends in cost and their implications for UK aerospace. *Defence and Peace Economics*, 18(1), 25-37.
- [55] Rapping, L. (1965): Learning and World War II production functions. *Review of Economic Statistics*, 47, 81-86.
- [56] Romer, P., (1990): Endogenous technological change. *Journal of Political Economy*, 98, 71-102.
- [57] Rosen, S. (1974): Hedonic prices and implicit markets: Product differentiation in pure competition. *Journal of Political Economy*, 82(1), 34-55.
- [58] Saviotti, P.P. (1985): An approach to the measurement of technology based on the hedonic price method and related methods. *Technological Forecasting and Social Change*, 27, 309-334.
- [59] Saviotti, P.P. y Metcalfe, S. (1984): A theoretical approach to the construction of technological output indicators. *Research Policy*, 13, 141-151.
- [60] Searle, A.D. (1945): Productivity changes in selected wartime shipbuilding programs. *Monthly Labor Review*, 1132-1147.
- [61] Shafer, S., Nembhard, D. y Uzumeri, M. (2001): The effects of worker learning, forgetting, and heterogeneity on assembly line productivity. *Management Science*, 47, 1639-1653.
- [62] Sheshinski, E. (1967): Optimal accumulation with learning by doing, en Shell, K. (ed.), *Essays on the theory of optimal economic growth*, MIT Press, Cambridge.

- [63] Shiue, Y. (1991): An economic batch production quantity model with learning curve-dependent effects: a technical note. *International Journal of Production Economics*, 24, 35-38.
- [64] Smunt, T.L. (1999): Log-linear and non-log-linear learning curve models for production research and cost estimation. *International Journal of Production Research*, 37(17), 3901-3911.
- [65] Solow, R. (1957): Technical change and the aggregate production function. *Review of Economics and Statistics*, 39(3), 312-320.
- [66] Stanley, W. y Miller, M. (1979): *Measuring technological change in jet fighter aircraft*. Rand Corporation, R-2249-AF.
- [67] Stekler, H.O. (1985): Technological change in the military aircraft industry. *Technological Forecasting and Social Change*, 27, 419-429.
- [68] Stekler, H.O., Kuenne, R.E. y Strom, L. (1981): The dynamics of structural changes in the defense industries. *IDA Paper, P-1552. Institute for Defense Analyses*.
- [69] Stillion, J. y Perdue, S. (2008): *Air combat past, present and future*. Rand Corporation.
- [70] Stone, R. (1956): *Quantity and Price Indexes in National Accounts*. Paris: Organization for European Economic Cooperation.
- [71] Triplett, J. (2004): *Handbook on hedonic indexes and quality adjustments in price indexes: Special application to information technology products*. Directorate for Science, Technology and Industry. OECD.
- [72] Thompson, P. (2001): How much did the Liberty shipbuilders learn? New evidence from an old case study. *Journal of Political Economy*, 109(1), 103-137.

- [73] Thompson, P. (2007): How much did the Liberty shipbuilders forget? *Management Science*, 53(6), 908-918.
- [74] Thornton, R.A., y Thompson, P. (2001): Learning from experience and learning from others. An exploration of learning and spillovers in wartime shipbuilding. *American Economic Review*, 91(5), 1350-1368.
- [75] United States Air Force: *Budget Estimates* (several years).
- [76] Ziemer, R. y Kelly, P. (1993): The deflation of military aircraft, in *Price Measurements and Their Uses*, M. Foss, M. Manser and A. Young (Eds.), University of Chicago Press.
- [77] Zimmerman, M.B. (1982): Learning effects and the commercialization of new energy technologies: The case of nuclear power. *The Bell Journal of Economics*, 13(2), 297-310.
- [78] Womer, N.K. y Patterson, J.W. (1983): Estimation and testing of learning curves. *Journal of Business and Economic Statistics*, 1(4), 265-272.
- [79] Wright, T.P. (1936): Factors affecting the cost of airplanes. *Journal of Aeronautical Science*, 3(4), 122-128.
- [80] Yelle, J.E. (1979): The learning curve: Historical review and comprehensive survey. *Decision Sciences*, 10(2), 302-328.