

Trabajo de Fin de Grado
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Análisis de las actuaciones de aviones comerciales
incluyendo efectos de incertidumbre meteorológica

Autor: Cristina Calero Calatayud

Tutor: Damián Rivas Rivas

Dep. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Trabajo de Fin de Grado
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Análisis de las actuaciones de aviones comerciales incluyendo efectos de incertidumbre meteorológica

Autor:
Cristina Calero Calatayud

Tutor:
Damián Rivas Rivas
Catedrático

Dep. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2016

Trabajo de Fin de Grado: Análisis de las actuaciones de aviones comerciales incluyendo efectos de
incertidumbre meteorológica

Autor: Cristina Calero Calatayud

Tutor: Damián Rivas Rivas

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

A mi familia y amigos

A mis maestros

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría dejar claro que no soy partidaria de dejar plasmados mis sentimientos en ningún papel, pero puesto que debo rellenar un apartado de agradecimientos trataré de hacerlo de la mejor manera posible.

A la hora de agradecer el proyecto final y gran parte de mi formación como futura graduada en ingeniería Aeroespacial no cabe la menor duda que debe aparecer el nombre de Damián Rivas, tanto a nivel personal como académico ha sido no solo mi tutor sino el apoyo que en determinados momentos de la carrera he necesitado y siempre me ha brindado.

Por otro lado, aunque es cierto que los amigos, compañeros de carrera...etc me han acompañado en esta etapa final y han sido un gran apoyo, sin duda el motor que me ha dado la fuerza necesaria para acabar esta carrera de fondo han sido los más cercanos, mi familia. Y es aquí donde comienzo a tener problemas al expresarme con palabras y dejarlo por escrito, así que simplemente me limitaré a dejar plasmado en mi proyecto final un sincero agradecimiento a mis padres, hermanos y a mi abuela, agradecimiento que ya me encargaré yo de hacerles llegar con algo más que palabras. Pero sobretodo no me gustaría dejar de reservar unas líneas para aquellos familiares que durante mis años de carrera he perdido y que estoy completamente segura que estarían orgullosos de verme en este momento, es precisamente por ellos por los que finalmente me he decidido a rellenar este capítulo. Gracias.

Cristina Calero Calatayud

Sevilla, 2016

Resumen

El objetivo del presente proyecto es el de estudiar el efecto de la incertidumbre en las predicciones meteorológicas, usadas en la gestión del tráfico aéreo para la selección de trayectorias, en parámetros de interés en el vuelo como lo son el consumo de combustible y el tiempo de vuelo.

Para ello se tomará el caso de una avión comercial concreto, como es el Boeing 767-300 ER, y el vuelo de crucero en una trayectoria concreta, la cual ha sido seleccionada por una fuente externa que ha reportado los datos necesarios.

Una vez explicado el caso particular en el que se centra el estudio, cabe mencionar que dicho estudio consistirá en la realización de un programa que tomando como datos de entrada el viento medio en cada uno de los segmentos de la trayectoria, datos aportados por la fuente externa, nos aporte como valores de salida el consumo de combustible y el tiempo de vuelo en cada segmento. Una vez obtenidos estos datos, mediante análisis posteriores se tratará de observar la incertidumbre de los mismos y la influencia que en ellos ha tenido la dispersión de los datos del viento medio.

Para que el estudio sea más completo se planteará tanto el caso de recorrer la ruta hacia el Este como hacia el Oeste, lo que permitirá observar la diferencia del efecto de la incertidumbre del viento en caso de ser de cola o de cara.

Por último cabe mencionar que el método empleado en el proyecto es el sistema de predicción por “ensembles” (EPS) que ha demostrado ser una forma efectiva de considerar la incertidumbre meteorológica a través de la dispersión de los datos de los distintos miembros del “ensemble”.

Abstract

The main goal of this project is to study the effect of uncertainty in weather forecast, used by air traffic management for the selection of trajectories, on parameters of interest in the flight such as fuel consumption and flight time.

To get this goal the particular case of a commercial plane will be taken, such as the Boeing 767-300ER, and cruise flight on a specific path which has been selected by an external source that has reported the data required.

Once decided the particular case in which the study focuses, the content of the study will consist of the implementation of a program which takes as input arguments the average wind in each of the segments of the trajectory, data provided by the external source, and provides, as output arguments, the value of fuel consumption and flight time in each segment. Once obtained all the necessary information, further analysis will allow us to observe the uncertainty of them and the influence that wind uncertainty has on this parameters.

For a complete study, both the case of travel to the east and west will be studied, which will allow us to observe the difference in the effect of uncertainty of wind in the case of tail wind or head wind.

Finally it should be mentioned that the method used in the project is the Ensemble Prediction System (EPS) that has proven to be an effective way to consider the weather uncertainty through the dispersion of data from the various members of the “ensemble”

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xii
Índice	xiii
Índice de Tablas	xiv
Índice de Figuras	xv
1 Introducción	1
1.1 Contexto	1
1.2 Motivación	2
1.3 Objetivo y metodología	3
2 Formulación del problema	5
2.1 Ecuaciones del movimiento	5
2.2 Condiciones de contorno.	6
2.3 Modelos suplementarios.	6
2.3.1 Modelo de atmósfera	6
2.3.2 Modelo de tierra	7
2.3.3 Modelo de avión: BADA	7
2.4 Formulación final del problema	10
3 Ruta y vientos	13
3.1 Descripción de la ruta	13
3.2 Descripción de los vientos	14
4 Análisis de los resultados	16
4.1 Resultados para un solo miembro.	16
4.2 Resultados para los 35 miembros considerando los segmentos.	21
4.3 Análisis de la dispersión	26
4.4 Resultados para los 35 miembros tomando valores totales	32
4.5 Resultados por intervalos.	33
5 Conclusiones	35
5.1 Resumen y conclusiones	35
5.2 Trabajo futuro	36
Referencias	37
Anexos	38
Anexo A: Programa	38
Anexo B: Datos de viento y velocidad respecto a tierra	53
Anexo C: Datos del consumo de combustible.	62
Anexo D: Datos del tiempo de vuelo	67
Anexo E: Curvas teóricas t-Vg con valores obtenidos en el programa.	72
Glosario	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Parámetros característicos del Boeing 767-300 ER	8
Tabla 2-2 Coeficientes de resistencia del modelo aerodinámico	8
Tabla 2-3 Coeficientes de consumo específico	9
Tabla 2-4 Coeficiente de corrección	9
Tabla 3-1 Waypoints	13
Tabla 3-2 Distancia y rumbo de cada segmento	14
Tabla 3-3 Criterio de signos del viento	14
Tabla 3-4 Datos de viento del primer miembro con recorrido hacia el Este	15
Tabla 3-5 Datos de viento del primer miembro con recorrido hacia el Oeste	15
Tabla 4-1 Datos obtenidos para el primer miembro ruta hacia el Este	16
Tabla 4-2 Datos obtenidos para el primer miembro, ruta hacia el Oeste	17
Tabla 4-3 Dispersión de la velocidad respecto a tierra, E	21
Tabla 4-4 Dispersión de la velocidad respecto a tierra, O	21
Tabla 4-5 Dispersión del consumo, E	22
Tabla 4-6 Dispersión del consumo, O	22
Tabla 4-7 Dispersión del tiempo de vuelo, E	23
Tabla 4-8 Dispersión del tiempo de vuelo, O	23
Tabla 4-9 Comparación de la dispersión en la velocidad, consumo y tiempo	24
Tabla 4-10 Datos de combustible y velocidad respecto a tierra, segmento 9 ruta Este	25
Tabla 4-11 Datos de combustible y velocidad respecto a tierra, segmento 1 ruta Oeste	28
Tabla 4-12 Datos de tiempo de vuelo y velocidad respecto a tierra, segmento 9	30

ÍNDICE DE FIGURAS

1-1 Predicción de trayectorias por “ensembles”.	4
2-1 Austrian airlines Boeing 767-300 ER	8
2-2 Velocidad respecto a tierra	10
2-3 Caso $\lambda_1 = \lambda_2$	11
2-4 Caso $\varphi_1 = \varphi_2$	12
2-5 Segmento y condiciones iniciales	12
3-1 Trayectoria desde la costa de EEUU hasta la de Francia.	13
4-1 Velocidad respecto a tierra por segmento para el primer miembro	18
4-2 Consumo de combustible por segmento para el primer miembro	18
4-3 Tiempo de vuelo por segmento para el primer miembro	18
4-4 Consumo por segmentos del primer miembro. Este	19
4-5 Porcentajes de consumo por segmento del primer miembro. Este	19
4-6 Consumo por segmentos del primer miembro. Oeste	19
4-7 Porcentajes de consumo por segmento del primer miembro. Oeste	19
4-8 Tiempo de vuelo por segmentos del primer miembro. Este	19
4-9 Porcentajes de tiempo de vuelo por segmento del primer miembro. Este	20
4-10 Tiempo de vuelo por segmentos del primer miembro. Oeste	20
4-11 Porcentajes de tiempo de vuelo por segmento del primer miembro. Oeste	20
4-12 Dispersión de la velocidad respecto a tierra, E	21
4-13 Dispersión de la velocidad respecto a tierra, O	21
4-14 Dispersión del consumo, E	22
4-15 Dispersión del consumo, O	22
4-16 Dispersión del tiempo de vuelo, E	23
4-17 Dispersión del tiempo de vuelo, O	23
4-18 Curva teórica cualitativa de mF-Vg	25
4-19 Curva mF-Vg último segmento	26
4-20 Curva mF-Vg y valores obtenidos, Este	27
4-21 Curva mF-Vg y valores obtenidos, Oeste	28
4-22 Curva t-Vg y valores obtenidos para todos los segmentos	29
4-23 Curva t-Vg y valores obtenidos para el segmento 9	30
4-24 Dispersión del consumo de combustible, Este	31
4-25 Dispersión del consumo de combustible, Oeste	31

4-26	Dispersión del tiempo de vuelo, Este	31
4-27	Dispersión del tiempo de vuelo, Oeste	31
4-28	Dispersión por puntos del consumo de combustible, Este	32
4-29	Dispersión por puntos del consumo de combustible, Oeste	32
4-30	Dispersión por puntos del tiempo de vuelo, Este	32
4-31	Dispersión por puntos del tiempo de vuelo, Oeste	32
4-32	Consumo de combustible por intervalos, Este	33
4-32	Consumo de combustible por intervalos, Este	33
4-32	Tiempo de vuelo por intervalos, Este	34
4-32	Tiempo de vuelo por intervalos, Oeste	34

1 INTRODUCCIÓN

A lo largo de este capítulo se llevará a cabo una descripción detallada del contexto en el que se encuentra enmarcado el proyecto en base al cual se justificará la motivación del mismo, así como la metodología empleada para alcanzar los objetivos principales del mismo.

1.1 Contexto

El presente proyecto se enmarca dentro de lo que se conoce como “Trajectory prediction considering ensemble weather uncertainty” (Predicción de trayectorias considerando incertidumbre meteorológica).

En la actualidad las herramientas de soporte de decisiones (DST, Decision support tools) del control del tráfico aéreo (ATC, air traffic control) están diseñadas para ayudar a los controladores a la gestión de la aeronave en el espacio aéreo a lo largo de la ruta. Algo común en todas estas herramientas es que de ellas se espera una estimación precisa de la trayectoria de la aeronave. Sin embargo, hoy en día aún siguen teniendo algunos errores a la hora de predecir las trayectorias, siendo la incertidumbre meteorológica probablemente uno de los que más impacten.

Actualmente los predictores de trayectorias usados tienen en cuenta las previsiones de viento, sin embargo no consideran la incertidumbre de dicho pronóstico. Es por ello que cada vez cobra mayor importancia la necesidad de conocer e investigar métodos para generar y analizar estimaciones de incertidumbre en las predicciones y el efecto de éstas en las trayectorias.

La importancia del estudio de la incertidumbre meteorológica se ve reflejado en el gran número de autores que la han estudiado usando distintos métodos. Tales como Nilim et al.[1] que considera un escenario para la gestión del tráfico aéreo basado en la trayectoria con el objetivo de minimizar los retrasos debidos a la incertidumbre meteorológica, escenario donde los procesos meteorológicos se modelan con el modelo estacionario de las cadenas de Markov, Peper et al.[2] que presenta un método para tener en cuenta la incertidumbre meteorológica en la información de la gestión del flujo aéreo basándose en las redes Bayesianas o Clarke et al.[3] que desarrolla una metodología de estudio de la capacidad aeroespacial teniendo en cuenta la incertidumbre meteorológica y formula un algoritmo de programación dinámico-estocástico para la gestión del flujo de tráfico.

Por todo ello se puede apreciar como poco a poco ha ido comenzando a plantearse la manera de cuantificar y tener en cuenta la incertidumbre de las predicciones meteorológicas y su implicación en la gestión del tráfico aéreo.

La predicción del estado meteorológico a través de conjuntos conocidos como “ensembles” es una de las técnicas usadas hasta el momento, donde a través de la propagación de las soluciones del conjunto se tiene en cuenta la incertidumbre en la predicción.

Existen dos posibles enfoques para la predicción de trayectorias sujetas a la incertidumbre proporcionada por “ensembles” de predicciones meteorológicas, como aparece explicado en el artículo “Probabilistic Analysis of Aircraft Fuel Consumption Using Ensemble Weather Forecasts”[4] donde se presentan dos posibilidades el método probabilístico, en el cual las distribuciones probabilísticas de parámetros meteorológicos de interés, como por ejemplo el viento, evolucionan a lo largo de la trayectoria del avión usando predictores probabilísticos de trayectorias (pTP) dando lugar a distribuciones probabilísticas de parámetros de interés de la aeronave, tales como el consumo de combustible. Y el método determinista, a través del sistema de predicción por “ensembles” (EPS), que es el que se llevará a cabo en este proyecto y se explicará más detalladamente a lo largo del mismo.

Sin embargo, está técnica de predicción por “ensembles”, pese a que se ha demostrado que es una forma efectiva de cuantificar las incertidumbres como se explica en el proyecto de IMET [4], en la práctica no suele ser considerada en las aplicaciones de gestión de tráfico aéreo (ATM).

No obstante, aunque este proyecto no llegará a predecir la trayectoria óptima, sí tratará de demostrar cuan potentes pueden resultar estos métodos a la hora de considerar los efectos de las condiciones meteorológicas sobre parámetros que afectan a la trayectoria. En particular, se estudiará el efecto de la incertidumbre meteorológica y en concreto el efecto del viento en el consumo del avión y el tiempo de vuelo.

1.2 Motivación

Una vez definido el ámbito en el que se encuentra enmarcado el proyecto, a continuación se describirán cuáles han sido las motivaciones fundamentales, dentro de este contexto, que han llevado a la realización del mismo.

En primer lugar y a colación con lo mencionado anteriormente, los sistemas de gestión de tráfico aéreo futuros deben hacer frente a los retos establecidos por el espacio aéreo de hoy, tales como aumentar la capacidad y la eficiencia del sistema sin dejar de conservar o incluso aumentar los niveles de seguridad.

Para poder alcanzar esas metas es necesario un cambio paradigmático en las operaciones a través de tecnología e investigaciones innovadoras. En estos sistemas futuros las trayectorias deben ocupar un lugar fundamental en los procedimientos operativos conocidos como TBO o Trajectory-Based Operations, que deberán tener por objeto un sistema basado en la trayectoria para acomodarse, en la medida de lo posible, a las peticiones de los usuarios.

Es por ello que la primera motivación del presente proyecto surge a la hora de plantear el hecho de que uno de los principales factores que afecta a la consecución de estos retos es la incertidumbre, que es una propiedad inherente del mundo real socio-técnico de los sistemas complejos, donde la gestión del tráfico aéreo (ATM) no es una excepción.

Otro de los motivos que nos lleva a centrar el estudio en el efecto de la incertidumbre meteorológica sobre los vuelos comerciales radica en el hecho de que dicha incertidumbre es un factor crítico en el transporte aéreo por diversos aspectos: la seguridad, el medio ambiente y el coste de operación.

Por otro lado el hecho que establece definitivamente la importancia de estudios como el que se plantea en el presente proyecto es que si se quiere aumentar la capacidad de los sistemas de ATM a la vez que conservar los altos niveles de seguridad y mejorar el rendimiento global, los niveles de incertidumbre deben reducirse y se debe tratar de encontrar nuevas estrategias para tratar con la incertidumbre residual. En particular, es necesario que se desarrollen procedimientos para integrar la incertidumbre de la información en los procesos de planificación del ATM, teniendo en cuenta las fuentes de incertidumbre principales que afectan a dichos sistemas siendo la de mayor efecto la de las predicciones meteorológicas.

Por todo ello se debe aceptar que la incertidumbre es inevitable y por tanto ésta debe ser tratada en lugar de ignorada, sobre todo en temas tan cruciales como el desarrollo de sistemas de predicción de trayectorias.

Finalmente la relevancia de este proyecto radica en el hecho de que el viento es una de las principales fuentes de incertidumbre en la predicción de trayectorias y en que la incertidumbre del crucero tiene un gran impacto en el vuelo global, dado que la fase de crucero es la que ocupa una mayor proporción del vuelo, al menos en las rutas de largo alcance.

Así pues, aunque es evidente que además del estudio que se desarrolla en el proyecto son necesarios muchos más para poder lograr el control o al menos el conocimiento del efecto de la incertidumbre meteorológica sobre los distintos parámetros del avión y su trayectoria, con éste en concreto se tratará de dar una visión general de uno de los métodos que se pueden emplear para análisis de este tipo y, en la medida de lo posible, se tratará de llegar a conclusiones que nos permitan interpretar su efecto sobre el consumo de combustible en los segmentos de crucero.

1.3 Objetivo y metodología

En el presente apartado se definirá brevemente la metodología empleada para obtener los datos que se analizarán posteriormente, así como los objetivos fijados al principio del proyecto que se han tratado de alcanzar con la realización del mismo.

Para comenzar, el primer objetivo del proyecto es el de desarrollar un programa mediante la herramienta de software matemático Matlab (Matrix Laboratory) que al introducirle un conjunto de datos del viento medio a lo largo de una trayectoria nos permita obtener el combustible consumido y el tiempo de vuelo para cada uno de esos casos. En cuanto a los datos de entrada, estos nos serán proporcionados por una fuente externa al proyecto que seleccionará tanto la ruta a estudiar como los segmentos en que se divide dicha ruta. Así pues tanto la altitud de vuelo, los segmentos en los que se divide la trayectoria como el viento medio en cada segmento, son datos que nos han sido proporcionados y que el programa utilizará como entrada para realizar los cálculos pertinentes.

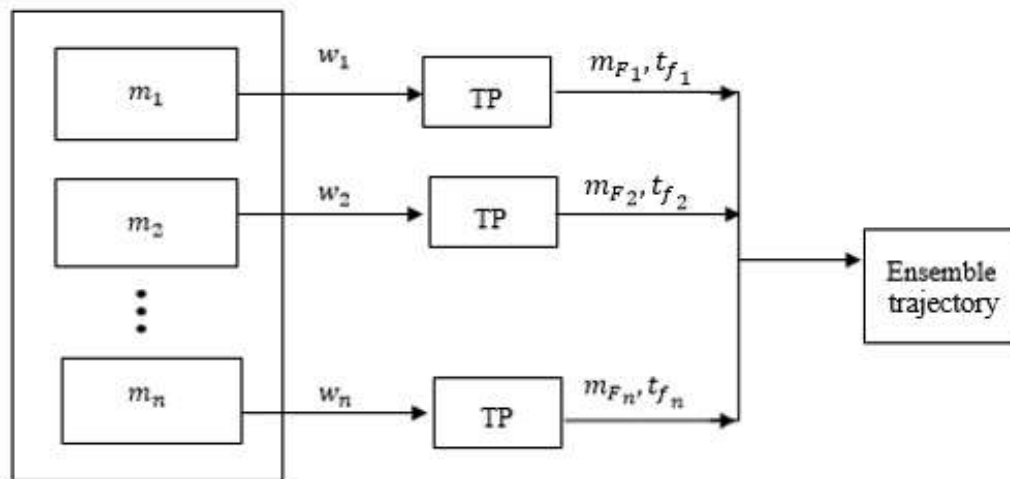
En cuanto a los datos del viento medio, cabe mencionar que por cada segmento son reportados un total de 35 datos distintos de viento medio que, como se explicará más adelante, son los miembros que conforman el “ensemble” cuya dispersión contiene la incertidumbre en la predicción que tratamos de estudiar. Dichos valores son obtenidos de lo que se conoce como EWF (Ensemble of Weather Forecasting).

Una vez desarrollado el programa que habiendo tomado 35 datos de viento medio en cada segmento proporciona los respectivos consumos de combustible y tiempos de vuelo, se dispondrá de información suficiente para analizar y obtener resultados y valoraciones.

Así pues el siguiente paso es el tratamiento de dicha información, de forma que analizando mediante tablas y gráficos los datos obtenidos se pueda observar la relación existente entre la incertidumbre de las predicciones meteorológicas, que queda reflejada en la dispersión en los datos del viento medio de los distintos miembros del “ensemble”, con la incertidumbre que se genera en el consumo de combustible y el tiempo de vuelo.

Por tanto y como se mencionó en el contexto del proyecto, el método que se ha decidido seguir ha sido el del sistema de predicción por “ensembles”. Este método consiste en que a través de un predictor determinista de trayectorias (TP), que en nuestro caso será el programa de Matlab que se ha diseñado para el cálculo del consumo de combustible y el tiempo de vuelo, para cada miembro del conjunto de vientos medios que constituyen el “ensemble” se obtiene su correspondiente dato del parámetro de interés en el vuelo, en nuestro caso el consumo de combustible y el tiempo de vuelo. Así pues, con esta metodología de trabajo, a partir de un “ensemble” de predicciones meteorológicas, se obtiene otro “ensemble” de predicciones de consumo de combustible y otro de predicciones de tiempos de vuelo que al proceder de un conjunto cuya dispersión está considerando la incertidumbre de las predicciones, están teniendo en cuenta también dicha incertidumbre.

A continuación se presenta un esquema donde se puede apreciar con más claridad lo explicado anteriormente sobre la metodología seguida.



1-1 Predicción de trayectorias por “ensembles”. Leyenda: m- miembro, w- viento medio, mF- masa de combustible consumido, tf- tiempo de vuelo .

La entrada requerida por el programa, el cual se detalla en el Anexo A, dependerá del problema que se esté tratando. En nuestro caso, como ya se ha comentado anteriormente, tomaremos como datos de entrada los valores del viento medio en cada uno de los segmentos de la trayectoria. Una vez introducidos estos vientos en el programa éste nos proporciona los valores de los consumos de combustible y tiempos de vuelo para cada uno de los segmentos considerados, obteniendo el “ensemble” de datos de la trayectoria.

Este método de predicción de trayectoria por “ensembles” genera un gran volumen de información. Es por ello que se requiere de algún tipo de procesamiento posterior para poder analizar los resultados. Es aquí donde se encuentra la otra fuente de trabajo del proyecto.

Para el tratamiento de datos se ha optado por el estudio mediante gráficas y tablas realizadas tanto con Matlab como con la herramienta Excel. Con ello lo que se pretende es comparar los distintos resultados obtenidos con objeto de llegar a conclusiones válidas sobre el efecto de la incertidumbre meteorológica en el consumo de combustible y en el tiempo de vuelo que es a fin de cuentas la meta a alcanzar con este proyecto.

Finalmente, descrita la metodología a seguir para la obtención de resultados, cabe destacar que además de cumplir con el objetivo principal del proyecto de estudiar la influencia de la incertidumbre meteorológica sobre el consumo y el tiempo de vuelo, como ya se mencionó anteriormente, se espera que este tipo de estudios sea relevante a la hora de poder determinar la cantidad de fuel y el tiempo necesario para la ruta, así como hacer más efectiva la selección de trayectorias óptimas. Si bien en el caso de este proyecto nos quedaremos en el estudio del efecto de la incertidumbre en sí dejando para estudios posteriores la aplicación de esto en la selección de trayectorias óptimas.

2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En el presente apartado del trabajo se llevará a cabo una descripción detallada de la formulación del problema que se va a tratar de resolver, que no es más que el cálculo del consumo de combustible y el tiempo de vuelo de un vuelo de crucero considerando los efectos del viento. El estudio está basado en la fase de crucero y tiene en cuenta la incertidumbre meteorológica proporcionada por un sistema de predicción por “ensembles” (EPS) que está demostrado que es una forma efectiva de cuantificar la incertidumbre del tiempo atmosférico. Para ello se presentarán en primer lugar las ecuaciones que definen el vuelo de crucero, con sus respectivas simplificaciones y ligaduras de vuelo. Posteriormente se definirán las condiciones de contorno necesarias para la integración de las ecuaciones así como los modelos suplementarios a tener en cuenta para resolverlas.

2.1 Ecuaciones del movimiento

En primer lugar, se considerará que durante toda la trayectoria se llevará a cabo un vuelo de crucero casi-estacionario, de forma que se despreciarán las aceleraciones ($\dot{V} \sim 0, \dot{\gamma} \sim 0$), formado por una serie de segmentos de crucero, cada uno de ellos definidos por un rumbo constante y una altitud constante ($\gamma = 0$). Debido a esto, suponiendo vuelo simétrico y modelo de tierra plana, las ecuaciones que describen el movimiento son las siguientes:

$$T = D \quad (2.1)$$

$$L = W \quad (2.2)$$

$$\frac{dr}{dt} = V_g \quad (2.3)$$

$$\frac{1}{g} \frac{dW}{dt} = -c_E T \quad (2.4)$$

Donde r es la distancia horizontal, t es el tiempo, V_g la velocidad respecto a tierra, T el empuje, D y L la resistencia aerodinámica y la sustentación respectivamente, W el peso de la aeronave, $g = 9.8m/s^2$ la gravedad y c_E el consumo específico del avión.

En cuanto a las ecuaciones, la primera y segunda no son más que el equilibrio de fuerzas horizontales y verticales. La ecuación (2.3) se trata de la ecuación cinemática en la que queda definida la velocidad con respecto a tierra como la derivada de la posición respecto al tiempo. Cabe mencionar la importancia de considerar en nuestro problema la velocidad V_g ($\vec{V}_g = \vec{V} + \vec{w}$), donde \vec{V} es la velocidad aerodinámica, \vec{w} el viento y \vec{V}_g la velocidad respecto a tierra, dado que al tener en cuenta la presencia de viento ésta será distinta a la velocidad aerodinámica, como se verá en apartados posteriores.

Finalmente la ecuación (2.4) establece el modelo de gasto de combustible proporcional al empuje de la aeronave, con constante de proporcionalidad el consumo específico c_E .

En este problema queda un grado de libertad matemático, por lo que es necesario proporcionar una ligadura de vuelo adicional que nos permita integrar las ecuaciones. En nuestro caso la ligadura de vuelo que se impondrá será Mach constante.

Además, cabe mencionar que en cada segmento de vuelo se supone un viento medio constante que puede ser diferente en cada segmento. Esta condición de viento medio constante junto con la ligadura de vuelo de Mach constante da lugar a una velocidad respecto a tierra que no varía a lo largo de cada tramo.

2.2 Condiciones de contorno

A continuación se definirán las condiciones de contorno necesarias para integrar las ecuaciones diferenciales.

Por un lado, cabe mencionar que cada uno de los segmentos de la trayectoria vendrá definido por dos waypoints, los cuales, como se comentó en la introducción del proyecto, será seleccionados y reportados por una fuente externa al proyecto. Por tanto la distancia entre dichos puntos es un dato conocido, mientras que el tiempo no, por lo que interesa tomar como variable independiente dicha distancia r .

Por otro lado, puesto que uno de nuestros objetivos es el de calcular el consumo de combustible total de la aeronave, debemos imponer una condición de contorno bien al principio del crucero, W_i , o al final del mismo, W_f . En este proyecto se impondrá como condición de contorno el peso del avión al final del crucero. La razón por la que se toma esta decisión es debido a que a priori no sabemos cuál va ser el efecto de las condiciones meteorológicas en el consumo y dado que el peso inicial depende de dicho parámetro no nos es posible fijar un valor inicial que nos asegure que podamos estudiar y comparar todos los casos sin quedarnos sin combustible o sin sobrecargar el avión, lo cual haría que las comparaciones no fueran del todo correctas.

Por ello tomamos la decisión de elegir como parámetro fijo, común para todos los vuelos a comparar, el peso final del avión, variando el inicial en cada uno de los casos.

De esta forma a la hora de realizar los cálculos para determinar el consumo de combustible se llevará a cabo una integración hacia atrás, es decir, conociendo el valor del consumo al final del último segmento de la trayectoria, mediante la integración que se describirá en apartados posteriores se obtendrá el valor del consumo inicial de dicho segmento que será el que se usará como condición de contorno para la siguiente integración del segmento anterior.

2.3 Modelos suplementarios

En este apartado se describen de manera detallada los modelos suplementarios de atmósfera, tierra, aerodinámico y propulsivo necesarios para poder resolver las ecuaciones del movimiento (2.1), (2.2), (2.3), (2.4).

2.3.1 Modelo de atmósfera

El modelo de atmósfera proporciona la temperatura, la presión y la densidad del aire en función de la altitud. En particular, el modelo que se considerará para la realización de este proyecto es el de atmósfera estándar internacional, modelo ISA (International Standard Atmosphere), estándar de la ISO 2533:19751, que es un modelo matemático sencillo que pese a que nunca se comporta exactamente como la atmósfera real, sí se parece lo bastante como para que sea un modelo útil en muchas ocasiones, tales como diseño de vehículos aéreos.

Su objetivo es el de crear un marco de referencia invariante para la navegación aérea y que permita la realización de cálculos aerodinámicos consistentes.

El modelo parte de los valores de presión, temperatura y densidad al nivel del mar, denotándolos con el subíndice '0', y obtiene el resto de valores a diferentes alturas mediante relaciones físicas básicas.

Partiendo de las siguientes hipótesis:

- Atmósfera en calma
- Gas perfecto

El modelo establece la siguientes ecuaciones diferenciando entre la zona de la troposfera y estratosfera

1) En la troposfera, $0 < h < h_{11}$ donde $h_{11} = 11000 \text{ m}$ es la altitud de la tropopausa, se tiene:

$$\Theta = \Theta_0 - \alpha_T h \quad (2.5)$$

$$p = p_0 \left(1 - \frac{\alpha_T h}{\Theta_0}\right)^{\frac{g}{R_a \alpha_T}} \quad (2.6)$$

$$\rho = \rho_0 \left(1 - \frac{\alpha_T h}{\Theta_0}\right)^{\frac{g}{R_a \alpha_T} - 1} \quad (2.7)$$

Siendo $\Theta_0 = 288.15 \text{ K}$, $p_0 = 1.01325 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$, $\rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$, $\alpha_T = 6.5 \cdot 10^{-3} \text{ K/m}$
 $R_a = 287.05 \text{ J/(kgK)}$ y $g = 9.8 \text{ m/s}^2$.

2) En la estratosfera (en la parte baja de la misma), para $h > h_{11}$, se tiene

$$\Theta = \Theta_{11} \quad (2.8)$$

$$p = p_{11} \exp\left(-\frac{g(h-h_{11})}{R_a \Theta_{11}}\right) \quad (2.9)$$

$$\rho = \rho_{11} \exp\left(-\frac{g(h-h_{11})}{R_a \Theta_{11}}\right) \quad (2.10)$$

Siendo $\Theta_{11} = 216.65 \text{ K}$, $p_{11} = 0.22632 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ y $\rho_{11} = 0.3639 \text{ kg/m}^3$.

2.3.2 Modelo de tierra

El modelo de tierra considerado en el proyecto es el de tierra plana con gravedad constante independiente de la altitud de vuelo, siendo su valor $g = 9.8 \text{ m/s}^2$.

2.3.3 Modelo de avión: BADA

En lo que a temas aeronáuticos se refiere, BADA (Base of Aircraft Data) es una base de datos de aviones comerciales publicada por EUROCONTROL donde se pueden encontrar una serie de ficheros donde se especifican los coeficientes, características y parámetros de operación para 295 tipos de aeronaves diferentes. Los coeficientes que se detallan son los que se utilizan para el cálculo la resistencia aerodinámica y el flujo de combustible y los que se utilizan para especificar el crucero nominal.

En el caso de este proyecto, el avión que se va a considerar es un Boeing 767-300 ER con dos motores Jet PW4060 con los siguientes parámetros característicos:

Tabla 2-1 Parámetros característicos del Boeing 767-300 ER

Max W_{fuel}	76635 kg
MTOW	186880 kg
S_w	283.3 m^2

Se trata de un avión bimotor de fuselaje ancho desarrollado por el fabricante aeronáutico estadounidense Boeing Commercial Airplanes. Se caracteriza por disponer de dos turbofans, un diseño convencional de cola y un nuevo perfil alar para reducir la resistencia aerodinámica (ver figura 2-1)



2-1 Austrian airlines Boeing 767-300 ER

A continuación se define el modelo aerodinámico y propulsivo que se han considerado para la realización del proyecto los cuales se han obtenido de los datos de la revisión 3.12 de BADA

2.3.3.1 Modelo Aerodinámico

Este modelo aerodinámico considera la siguiente dependencia del coeficiente de resistencia con el de sustentación (polar parabólica de coeficientes constantes).

$$C_D = C_{D0} + C_{D2} \cdot C_L^2 \quad (2.11)$$

Siendo el valor de los coeficientes,

Tabla 2-2 Coeficientes de resistencia del modelo aerodinámico

C_{D0}	0.021112
C_{D2}	0.042118

La resistencia para nuestro modelo de avión vendrá dada por la siguiente expresión:

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S_w (C_{D0} + C_{D2} \cdot C_L^2) \quad (2.12)$$

2.3.3.2 Modelo Propulsivo

El consumo específico en el modelo BADA viene definido por la siguiente expresión, donde se puede apreciar la dependencia con la velocidad:

$$c_E = C_1 (1 + C_2' \cdot V) = C_1 (1 + C_2' \cdot a_0 \cdot \sqrt{\theta} \cdot M) = C_1 (1 + C_2 \cdot \sqrt{\theta} \cdot M) \quad (2.13)$$

Donde $a_0 = \sqrt{\gamma_a R_a \theta_0}$ y $\theta = \Theta / \Theta_0$

Para obtener los valores de C_1 y C_2 se requiere de unos coeficientes que vienen dados por BADA.

En primer lugar, los coeficientes de consumo específico de combustible:

Tabla 2-3 Coeficientes de consumo específico

C_{f_1}	0.74220 kg/(min · KN)
C_{f_2}	0.20605 · 10 ⁴ kt

* Siendo la conversión 1 nudo= 1 milla náutica por hora= 1852 m/h (metros por hora), aproximadamente 0.5144 metros por segundo

Por otro lado se requiere de un coeficiente de corrección de flujo de combustible de crucero:

Tabla 2-4 Coeficiente de corrección

$C_{f_{cr}}$	0.90048 (adimensional)
--------------	------------------------

Una vez definidos los coeficientes anteriores, los valores de C_1 y C_2 quedan determinados por las siguientes expresiones:

$$C_1 = C_{f_{cr}} \cdot C_{f_1} = 0.90048 \cdot 0.74220 \frac{kg}{min \cdot KN} \frac{1min}{60s} \frac{KN}{10^3N} = 1.1139 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{s \cdot N} \quad (2.14)$$

$$C_2 = C_{f_{cr}} \cdot \frac{a_0}{C_{f_2}} = 0.90048 \cdot \frac{340.3 \frac{m}{s}}{0.20605 \cdot 10^4 kt} \frac{1kt}{0.5144 \frac{m}{s}} = 0.28911 \quad (2.15)$$

2.4 Formulación final del problema

Finalmente en este apartado se plantea el problema a resolver, que se tendrá que repetir por cada tramo de la trayectoria y en cada tramo dos veces, una por cada sentido seguido por el avión, Este y Oeste.

Dado que, como se comentó anteriormente, el objetivo del proyecto es el de analizar la influencia de las condiciones meteorológicas en el consumo de combustible del avión y el tiempo de vuelo en una trayectoria concreta, el problema que se ha resuelto es el del cálculo del combustible consumido y tiempo de vuelo empleado en un vuelo de crucero considerando efectos del viento y tomando como dato inicial de la integración el peso al final del trayecto.

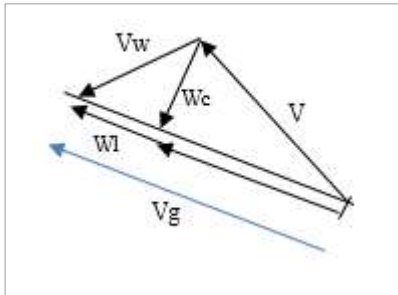
El crucero está formado por una serie de segmentos, en nuestro caso nueve, cada uno de los cuales viene definido por un rumbo fijo, una altitud constante, 11784.02 m y un Mach de vuelo también constante e igual a 0.8 y debido a estas dos últimas una velocidad aerodinámica también constante en cada tramo.

A esta altitud el valor de la densidad es $\rho = 0.32158 \text{ kg/m}^3$ y el de la velocidad del sonido $a = \sqrt{\gamma_a R_a \Theta} = 295.068 \text{ m/s}$, dando lugar a un valor de la velocidad aerodinámica, $V = M \cdot a = 236.05 \text{ m/s}$

En cuanto al viento se considerará que en cada segmento viene definido por un módulo y una dirección fijas con lo que se podrá descomponer en una componente de viento cruzado y otra de viento longitudinal que serán a su vez de módulo constante en cada segmento. Tanto los segmentos en los que se divide la trayectoria como el viento medio proyectado longitudinal y transversalmente en el segmento son datos reportados por una fuente externa, como se mencionó con anterioridad.

Estos valores de viento repercutirán directamente en la ecuación del movimiento (2.3) ya que como ya se comentó, $\vec{V}_g = \vec{V} + \vec{w}$. Además, al ser la velocidad aerodinámica constante y el viento medio constante en cada segmento, la velocidad respecto a tierra también será constante a lo largo del mismo.

En nuestro caso, como los datos de viento vendrán descompuestos en una componente longitudinal y otra de viento cruzado, el valor de la velocidad V_g vendrá dado por la siguiente expresión:



2-2 Velocidad respecto a tierra

$$V_g = \sqrt{V^2 - w_c^2} + w_l \quad (2.16)$$

Donde w_c es el viento cruzado siendo indiferente el criterio de signos utilizado, y w_l es el viento longitudinal que tomará valores positivos cuando sea de cola y negativos cuando sea de cara.

Para formular el problema, describiremos los cálculos realizados en un segmento concreto siendo exactamente iguales para el resto de segmentos.

Así pues, asumiendo vuelo simétrico, los modelos descritos en el apartado 2.3 del proyecto y las ecuaciones (2.1), (2.2), (2.3), (2.4), para el cálculo del combustible consumido partimos de la siguiente expresión, que sale de combinar la ecuación (2.3) y (2.4).

$$\frac{dm}{dr} = - \frac{c_E \cdot T}{V_g} \quad (2.19)$$

La ecuación (2.17) es una ecuación no lineal en la que se describe la evolución de la masa de combustible del avión en función de la distancia recorrida.

Introduciendo en dicha ecuación la expresión (2.2) y las del modelo aerodinámico y propulsivo obtenemos la siguiente ecuación: $T = D$; $D = \frac{\rho V^2 S C_D}{2}$; $C_D = C_{D0} + C_{D2} C_L^2$; $C_L = \frac{2L}{\rho V^2 S}$; $L = mg$

$$\frac{dm}{dr} = -\frac{A+Bm^2}{V_g}, m(r_f) = m_f \quad (2.18)$$

Donde las constantes A y B vienen definidas por:

$$A = \frac{c_E}{2} \rho V^2 S C_{D0}, \quad B = \frac{2c_E C_{D2} g^2}{\rho V^2 S} \quad (2.19)$$

Nótese que ambas constantes A, B son positivas.

Por otro lado, para el cálculo del tiempo de vuelo en cada segmento basta con emplear la ecuación (2.3) obteniendo la siguiente expresión que al integrar nos dará el tiempo

$$\frac{dt}{dr} = \frac{1}{V_g} \quad (2.20)$$

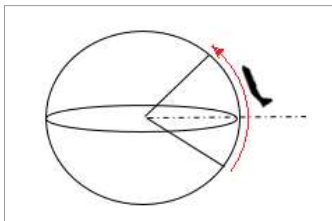
Finalmente, cada segmento viene definido por la longitud y latitud de los dos waypoints que lo componen. Por tanto, dado que las coordenadas de los waypoints son datos conocidos del problema, la distancia recorrida en cada segmento y el rumbo seguido durante el mismo, el cual como ya hemos comentado con anterioridad es constante, son a su vez conocidos y vienen determinados por las siguientes expresiones:

$$d = \left| \frac{R_E(\varphi_2 - \varphi_1)}{\cos(\chi)} \right| \quad (2.21)$$

$$\tan(\chi) = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\ln\left(\tan\left(\frac{\pi + \varphi_2}{4}\right)\right) - \ln\left(\tan\left(\frac{\pi + \varphi_1}{4}\right)\right)} \quad (2.22)$$

Donde R_E es el valor del radio terrestre, siendo este igual a 6356.766 km, φ_2, λ_2 la latitud y longitud del waypoint final del segmento y φ_1, λ_1 la latitud y longitud del waypoint inicial del segmento respectivamente.

Para $\lambda_1 = \lambda_2$ la trayectoria sigue un meridiano. La expresión (2.21) nos da un valor correcto del rumbo, $\chi = 0^\circ$ quedando la ecuación (2.22) de la siguiente forma:

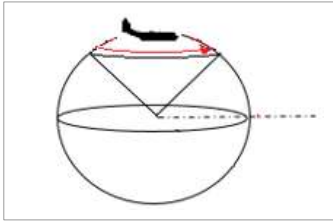


2-3 Caso $\lambda_1 = \lambda_2$

$$d = |\varphi_2 - \varphi_1| \cdot R_E \quad (2.23)$$

Las expresiones (2.21) y (2.22) no serán aplicables en el siguiente caso:

- Para $\varphi_1 = \varphi_2$, la trayectoria sigue un paralelo por lo que el rumbo se obtiene sin necesidad de recurrir a ninguna expresión, $\chi = 90^\circ$, pero ahora la expresión (2.22) no es válida siendo necesario recurrir a la siguiente ecuación:



2-4 Caso $\varphi_1 = \varphi_2$,

$$d = |\lambda_2 - \lambda_1| \cdot R_E \cdot \cos(\varphi) \quad (2.24)$$

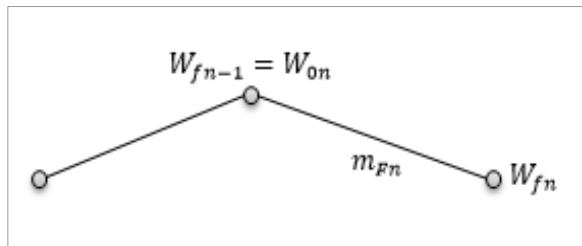
Conocida la distancia de cada segmento, y sabiendo que partimos con el peso del avión al final del trayecto como dato inicial para la integración, la expresión final que nos permite obtener el consumo de combustible en cada segmento es la siguiente:

$$m_F = \frac{(m_f^2 + A/B) \tan\left(\frac{\sqrt{AB} d}{V_g}\right)}{\sqrt{A/B} - m_f \tan\left(\frac{\sqrt{AB} d}{V_g}\right)} \quad (2.25)$$

Siendo A y B las constantes definidas en la ecuación (2.19) y d la distancia recorrida en el segmento.

La expresión (2.25) nos muestra la dependencia del consumo de combustible con el viento, $m_F = g(w)$.

Una vez obtenido el valor del consumo de combustible en el segmento final de la trayectoria, la condición inicial del nuevo segmento en la integración será:



$$W_{fn-1} = W_{0n} = W_{fn} + m_{Fn} \cdot g \quad (2.26)$$

Figura 2.5. Segmento y condiciones iniciales

De esta forma, en cada segmento se repite el mismo procedimiento cambiando únicamente la condición inicial, es decir el peso de la aeronave al final de cada segmento.

Finalmente, la expresión final que nos permite calcular el tiempo de vuelo en cada segmento es la siguiente:

$$t_{vuelo} = \frac{d}{V_g} \quad (2.27)$$

3 RUTA Y VIENTOS

En el siguiente apartado se procederá a describir tanto la ruta considerada para realizar el estudio, que vendrá dada por los distintos waypoints que la componen, como la situación meteorológica con la que se encuentra el avión en su trayectoria, es decir las distintas componentes del viento en cada segmento.

Por otro lado, sería posible el estudio de distintas trayectorias, sin embargo como se mencionó con anterioridad, el objeto de este proyecto es el de observar el efecto de las condiciones meteorológicas exclusivamente por lo que se tomará una ruta fija. No obstante y dado que el objetivo es el de considerar la incertidumbre de las predicciones, se tomarán varios estados de la atmosfera distintos en aras de poder estudiar la incertidumbre de estos datos y de los resultados obtenidos con ellos.

3.1 Descripción de la ruta

Puesto que la información de los vientos ha sido proporcionada por una fuente externa al proyecto y por tanto la elección de la ruta y los segmentos en los que ésta se divide también, el porqué de la elección de una u otra trayectoria no figura en esta descripción.

No obstante a continuación se describirá de forma precisa las características de la ruta elegida para el estudio.

En primer lugar, cabe mencionar que la ruta a considerar vendrá definida por una serie de waypoints, los cuales a su vez quedan definidos por su latitud y longitud. Cada pareja de waypoints conforman un segmento de la trayectoria del cual a través de las formulas 2.21 y 2.22 obtenemos la distancia recorrida y el rumbo que serán datos de entrada de nuestro programa.

Así pues, la ruta a estudiar viene definida por los siguientes puntos:

Tabla 3-1 Waypoints

WP	Longitud (°)	Latitud(°)
1	-73.779	40.64
2	-70	42
3	-60	46
4	-50	48
5	-40	49
6	-30	49
7	-20	49
8	-10	48
9	0	46
10	6.164	43.625



3-1 Trayectoria desde la costa de EE.UU hasta la de Francia.

Tabla 3-2 Distancias y rumbo de cada segmento.

Segmento	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Distancia (m)	349151,4	912765,	788396,4	743445,6	727874,5	727874,5	743445,6	788396,4	551999,4
Rumbo (°)	64,40	60,91	73,65	81,42	90,00	90,00	98,58	106,35	118,51

Donde la ruta de 1 a 10 será la correspondiente a viajar hacia el Este, es decir desde EEUU a Francia, y la ruta de 10 a 1 la opuesta hacia el Oeste. De esta forma, aunque solo se dispone de datos sobre la ruta hacia el Este y los vientos de esta opción, en los resultados se planteará también el caso de recorrer la trayectoria hacia el Oeste que se ha conseguido haciendo pequeñas variaciones como se verá a continuación.

3.2 Descripción de los vientos

Una vez definida la ruta a estudiar y con ella la distancia y el rumbo de cada uno de los segmentos, el siguiente dato requerido para la realización del problema es el valor del viento en dichos segmentos. Para ello se tomarán los datos del viento medio que han sido proporcionados.



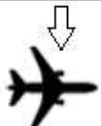

Para modelar el viento en un estudio como este en el que el objetivo es tener en cuenta la incertidumbre, es necesaria una técnica probabilística, de manera que dicha incertidumbre se pueda estudiar. Como se viene diciendo a lo largo del proyecto, la técnica de predicción por “ensembles” (EPS) es la tendencia actual, que consiste en tomar un EWF (Ensemble of Weather Forecasting) y alterar ligeramente las condiciones iniciales y/o los parámetros que modelan los procesos atmosféricos y considerar los tiempos de reacción. De esta forma, se obtiene una muestra representativa del posible estado futuro del tiempo, de una forma determinista.

Se conoce como “forecast ensemble” a un conjunto de entre 10 y 50 predicciones meteorológicas, cada una de las cuales es conocida como miembro. Existen diversos tipos, el PEARP de Météo France que consta de 35 miembros, MOGREPS de UK Met office con 12 miembros o el europeo ECMWF con 51 miembros son alguno de ellos.

En nuestro caso, para la trayectoria que nos ha sido dada, se nos ha proporcionado un conjunto de 35 miembros, de cada uno de los cuales se nos han reportado los valores del viento longitudinal y transversal medios proyectados ambos directamente sobre la línea que une los dos waypoints que forman el segmento.

El criterio de signos utilizado para definir dichos vientos, es el siguiente:

Tabla 3-3 Criterio de signos del viento

Viento longitudinal > 0	Viento de cola	
Viento longitudinal < 0	Viento de cara	
Viento cruzado > 0	El viento le llega al avión por el lado izquierdo, según el eje “y” positivo	
Viento cruzado < 0	El viento le llega al avión por el lado derecho, según el eje “y” negativo	

Como se puede ver en las tablas que se muestran a continuación, aunque el criterio de signos siga siendo el mismo los vientos van a depender del sentido al que se realice la ruta, así pues, los vientos que son de cara en el vuelo hacia el Este serán de cola cuando se recorre hacia el Oeste y así con todos los datos. Por tanto, bastará con cambiar el signo de todos los valores de la tabla 3.4 para obtener los vientos necesarios para resolver ese mismo problema con los datos del mismo miembro del EWF pero recorriendo los segmentos en sentido contrario (Ver tabla 3.5).

A continuación se presentan los datos de viento medio para uno de los miembros en caso de recorrerse los segmentos hacia el Este o hacia el Oeste

Tabla 3-4 Datos de viento del primer miembro con recorrido hacia el Este

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	50.70	50.81	46.73	46.94	46.45	27.01	16.79	5.49	7.79
Viento cruzado (m/s)	-20.22	-0.41	5.77	17.80	16.07	9.65	-17.48	-14.93	1.20
Vg (m/s)	285,89	290,86	282,72	282,33	278,95	262,86	252,19	241,07	243,84

Tabla 3-5 Datos de viento del primer miembro con recorrido hacia el Oeste

Segmento	10-9	9-8	8-7	7-6	6-5	5-4	4-3	3-2	2-1
Viento longitudinal (m/s)	-7.79	-5.49	-16.79	-27.01	-46.45	-46.94	-46.73	-50.81	-50.70
Viento cruzado (m/s)	-1.20	14.93	17.48	-9.65	-16.07	-17.80	-5.77	0.41	20.22
Vg (m/s)	184,49	181,25	189,25	188,44	192,06	208,83	218,62	230,09	228,26

Para ver el resto de datos de viento medio de todos los miembros del “ensemble” ver Anexo B

4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En el presente apartado del trabajo se presentan los resultados obtenidos tras el procesamiento de los datos calculados para los distintos miembros y la ruta recorrida en ambos sentidos. Debido a la dimensión de los datos de viento proporcionados, así como de los datos obtenidos tras ejecutar el programa de Matlab, el presente apartado se dividirá en distintas secciones.

Así pues, con objeto de presentar con mayor claridad y de forma ordenada los resultados, en primer lugar se detallarán los obtenidos sobre los distintos segmentos de un solo miembro, en particular del primer miembro del “ensemble”. Posteriormente se analizará la información obtenida de los distintos segmentos para todos los miembros y finalmente se estudiarán los valores globales de consumo y tiempo de vuelo.

4.1 Resultados para un solo miembro

Como se ha comentado anteriormente, a fin de presentar los resultados de manera más ordenada se comenzará presentando los análisis realizados para el problema con un solo miembro. Así pues, tomando los valores de viento del primer miembro del “ensemble”, (tabla 3.4 y 3.5) y ejecutando el programa se obtienen los siguientes valores:

Tabla 4-1 Datos obtenidos para el primer miembro ruta hacia el Este

RUTA HACIA EL ESTE					
Tramo	WF (N)	mF (Kg)	d (m)	tiempo(s)	Vg (m/s)
1	13158,76	1341,82	349151,44	1221,30	285,89
2	33398,25	3405,67	912765,03	3138,17	290,86
3	29194,93	2977,05	788396,38	2788,65	282,72
4	27166,78	2770,24	743445,60	2633,29	282,33
5	26548,45	2707,19	727874,51	2609,30	278,95
6	27784,99	2833,28	727874,51	2769,09	262,86
7	29155,14	2973,00	743445,60	2947,91	252,19
8	31853,16	3248,12	788396,38	3270,39	241,07
9	21757,28	2218,63	551999,43	2263,74	243,84

	WF (N)	mF (kg)	d (km)	tiempo (min)
TOTAL	240017,74	24475,00	6333,35	394,03

Tabla 4-2 Datos obtenidos para el primer miembro, ruta hacia el Oeste

RUTA HACIA EL OESTE					
Tramo	WFv (N)	mFv (Kg)	d (m)	tiempo(s)	Vg (m/s)
9	27203,19	2773,95	551999,43	2.418,30	228,26
8	37875,38	3862,21	788396,38	3.426,43	230,09
7	36848,53	3757,50	743445,60	3.400,64	218,62
6	37036,50	3776,67	727874,51	3.485,45	208,83
5	39471,78	4025,00	727874,51	3.789,85	192,06
4	40250,51	4104,41	743445,60	3.945,30	189,25
3	41619,55	4244,01	788396,38	4.165,86	189,25
2	49174,06	5014,36	912765,03	5.035,98	181,25
1	18173,58	1853,19	349151,44	1.892,55	184,49

	WF (N)	mF (kg)	d (km)	tiempo (min)
TOTAL	327653,07	33411,31	6333,35	526,01

En primer lugar, observando las tablas 4.1 y 4.2 por separado se pueden observar los siguientes resultados:

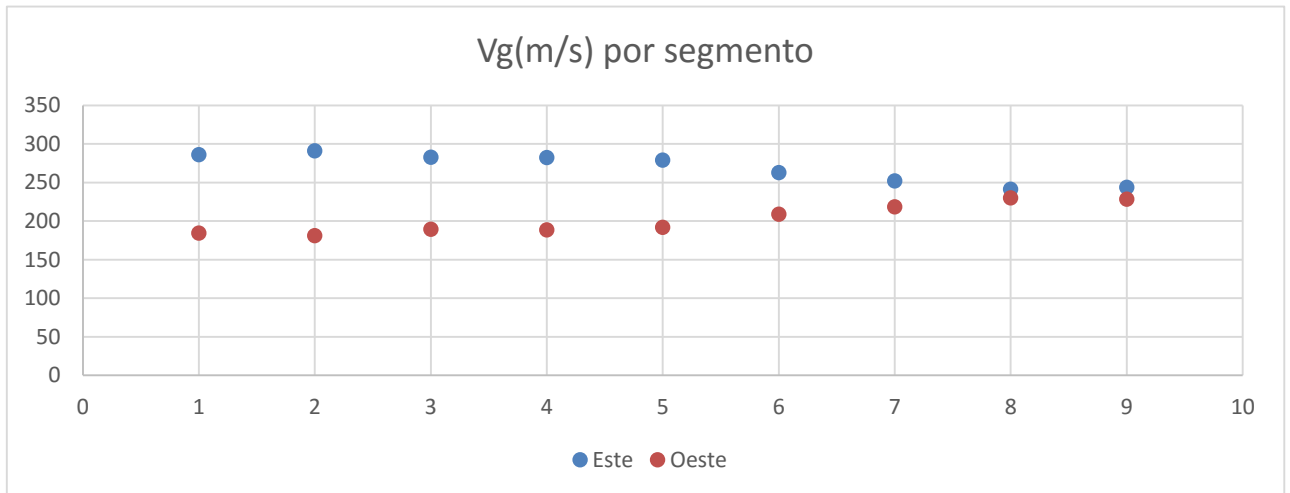
- El consumo de combustible y el tiempo de vuelo están principalmente condicionados por la distancia recorrida, ya que como se puede apreciar los tramos de mayor distancia son en los que se tarda más y se consume más, lo cual era de esperar.
- Sin embargo, en el caso del segmento 3 y 8 en los que la distancia recorrida es la misma, se puede observar el efecto del viento. En el caso del vuelo hacia el Este, tabla 4.1, la velocidad respecto a tierra del segmento 3 es mayor, debido a que el viento longitudinal es mayor y por ello tarda menos tiempo y consume menos que el tramo 8. Por otro lado, en la ruta hacia el Oeste el segmento 3 tiene una velocidad respecto a tierra menor que hace que pese a recorrer la misma distancia que el 8, el tiempo de vuelo y el consumo sea mayor. Esta misma comparación se puede hacer en los casos de los tramos 5 y 6.

Observando la comparación entre la ruta hacia el Este, en la que como se vio en el capítulo de viento y ruta el viento medio longitudinal es siempre de cola, y la ruta hacia el Oeste, con todos los vientos medios longitudinales de cara, se puede apreciar lo siguiente:

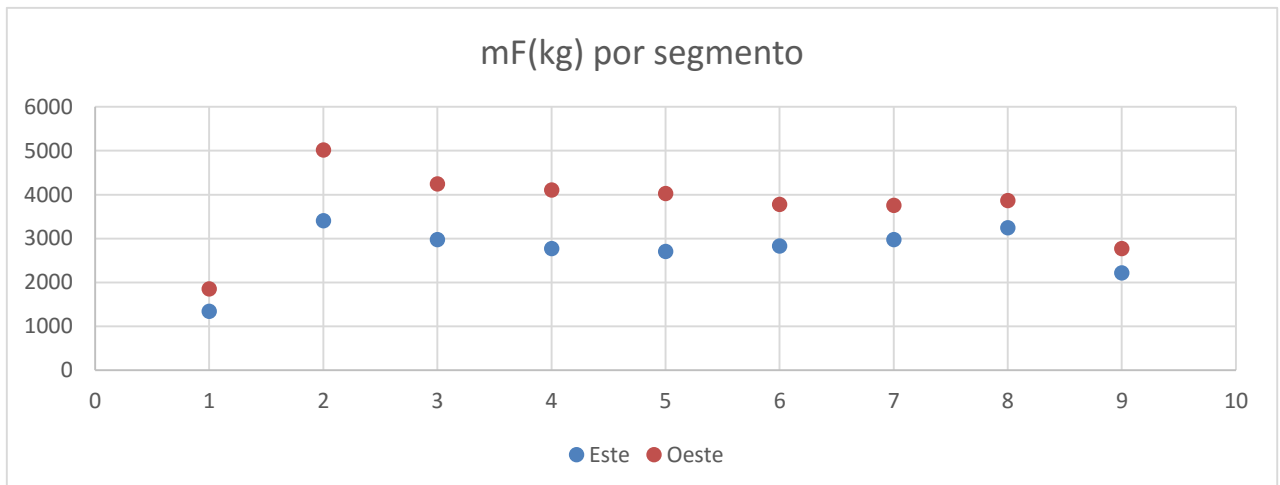
- Tanto el tiempo total de vuelo como el consumo de combustible es superior en el vuelo hacia el Oeste, ya que es en este sentido en el que nos encontramos con los vientos de cara.

Cabe mencionar que en la práctica la ruta a realizar en un sentido u otro no tiene por qué ser la misma, en caso de encontrar todos los vientos de cara como ha ocurrido en nuestro estudio se optaría por tomar una ruta alternativa, sin embargo en este estudio como el objetivo no es el de hallar la ruta óptima, sino el de observar el efecto de la incertidumbre en el consumo se ha optado por tomar la misma para ambos sentidos.

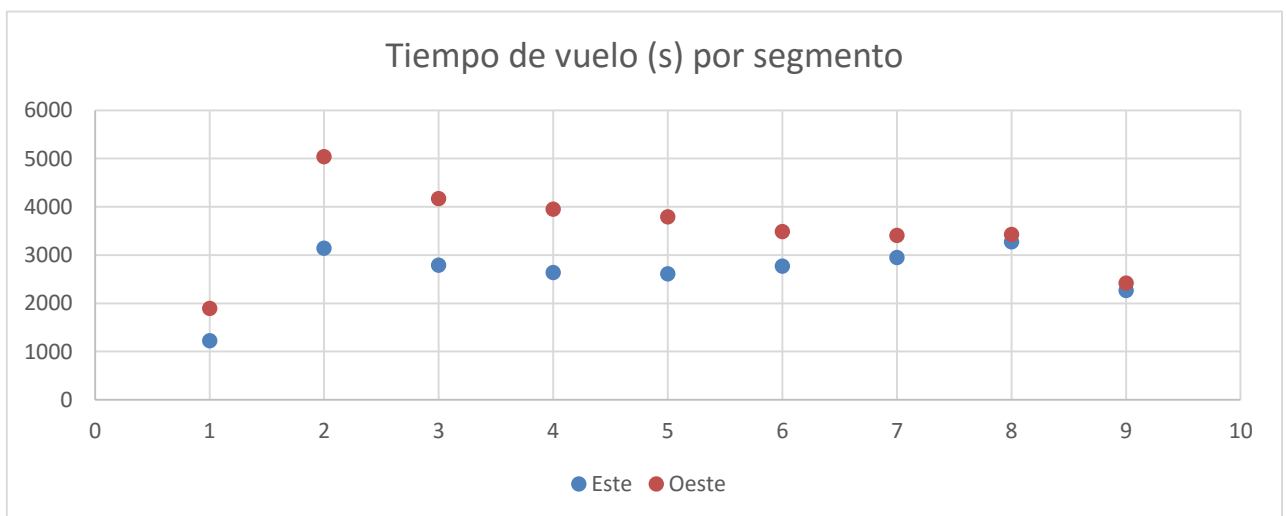
A continuación se presentan una serie de gráficas en la que se puede observar con más claridad los comentarios realizados sobre las tablas anteriores:



4-1 Velocidad respecto a tierra por segmento para el primer miembro



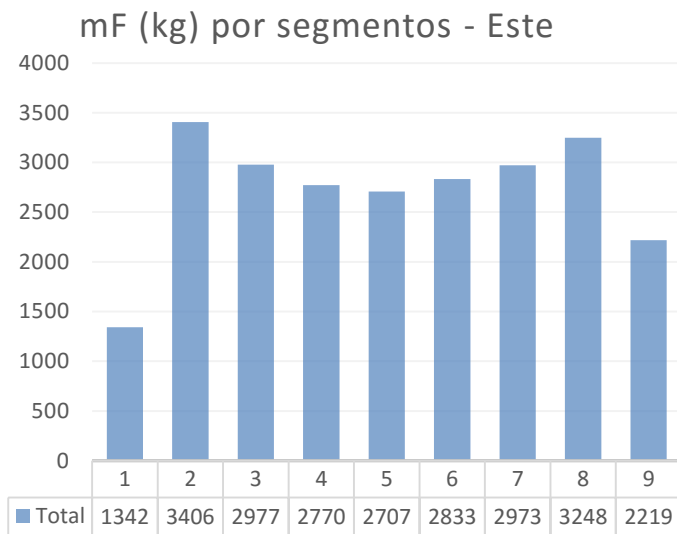
4-2 Consumo de combustible por segmento para el primer miembro



4-3 Tiempo de vuelo por segmento para el primer miembro

Por último se presentan a continuación los gráficos del combustible consumido por segmento así como el porcentaje sobre el total del consumo en cada uno de los segmentos que conforman la ruta. Cabe mencionar que pese a que el objetivo final del proyecto es el estudio de la incertidumbre, es necesario realizar previamente un análisis de los resultados obtenidos para un miembro, de forma que se compruebe que los valores hallados con el programa son coherentes, a fin de que los análisis posteriores en los que se consideren ya los 35 miembros sean válidos.

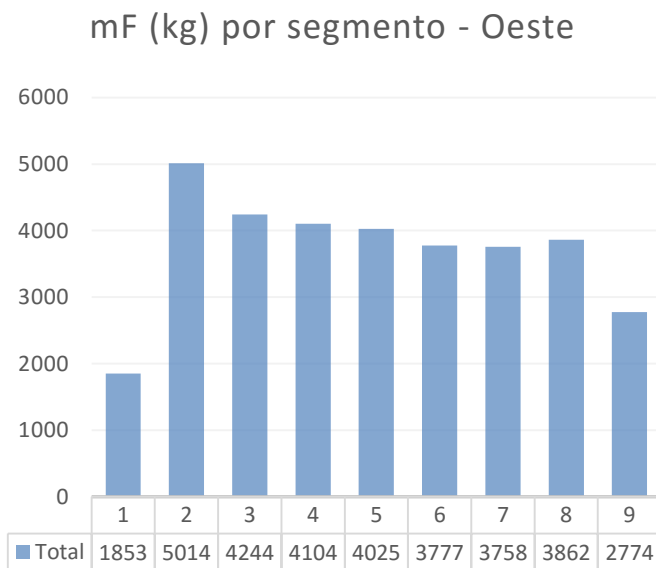
Es por ello que se ha considerado relevante la presentación de las siguientes gráficas que aportan una visión general de los consumos calculados con el programa:



4-4 Consumo por segmentos del primer miembro. Este



4-5 Porcentajes de consumo por segmento del primer miembro. Este

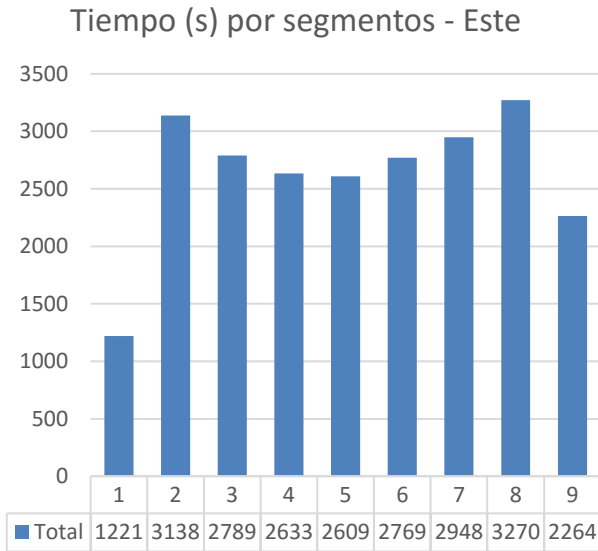


4-6 Consumo por segmentos del primer miembro. Oeste



4-7 Porcentajes de consumo por segmento del primer miembro. Oeste

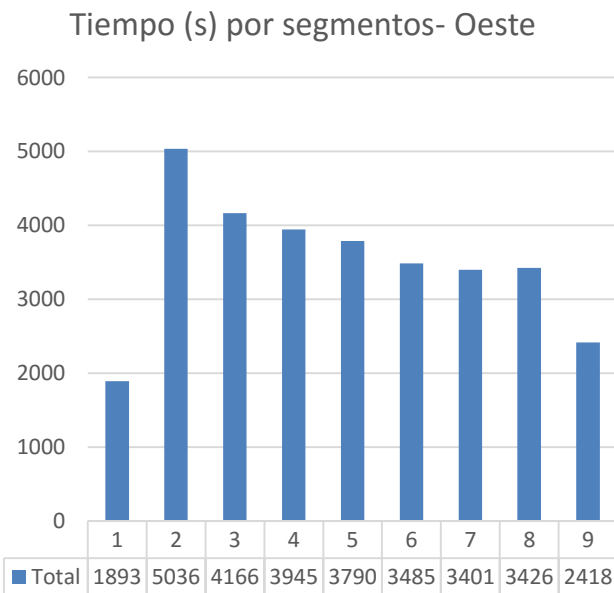
Al igual que con el consumo de combustible, a continuación se presentan las gráficas anteriores para el caso de los tiempos de vuelo.



4-8 Tiempo de vuelo por segmento del primer miembro. Este



4-9 Porcentaje de tiempos de vuelo por segmento del primer miembro. Este



4-10 Tiempo de vuelo por segmento del primer miembro. Oeste



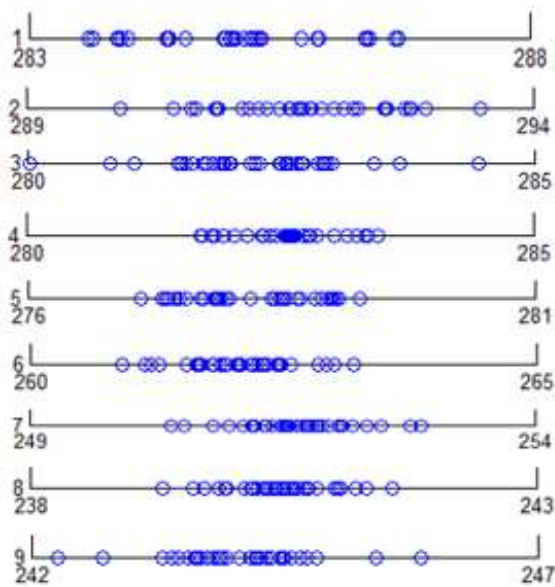
4-11 Porcentaje de tiempos de vuelo por segmento del primer miembro. Oeste

4.2 Resultados para los 35 miembros considerando los segmentos

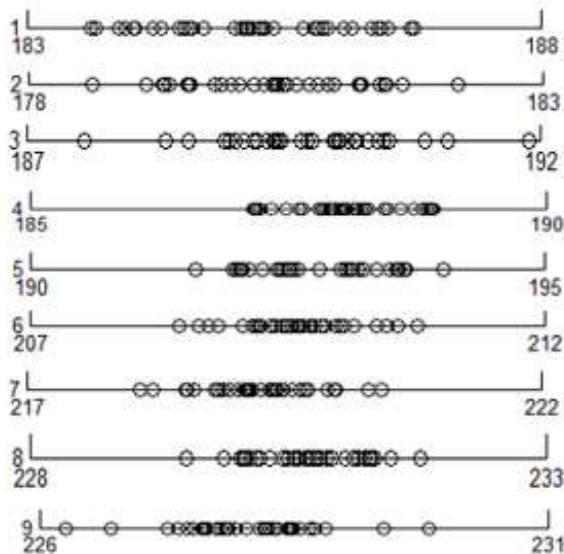
Una vez analizados los resultados obtenidos para un solo miembro, a continuación se detallan los análisis realizados considerando los 9 segmentos de la trayectoria para los 35 miembros que componen el “ensemble”.

El objetivo de la presentación de los resultados de este apartado es el de observar la dispersión en los valores del consumo y del tiempo de vuelo para los distintos miembros en cada segmento, y comparar la dispersión de los datos de la velocidad respecto a tierra. La forma de cuantificar esta dispersión en los datos consiste en tomar la diferencia entre el valor máximo y el mínimo del consumo total de combustible o del tiempo total de vuelo

En las siguientes gráficas se puede observar como mientras la dispersión de los datos de velocidad es prácticamente igual en la ruta hacia el Este y el Oeste en el caso de los datos de consumo y tiempo de vuelo, algunos segmentos presentan mayor dispersión que otros, habiendo también diferencia entre la dispersión que se produce en los datos de la ruta hacia el Este y hacia el Oeste en un mismo segmento.



4-12 Dispersión velocidad respecto a tierra, Este



4-13 Dispersión de la velocidad respecto a tierra, Oeste

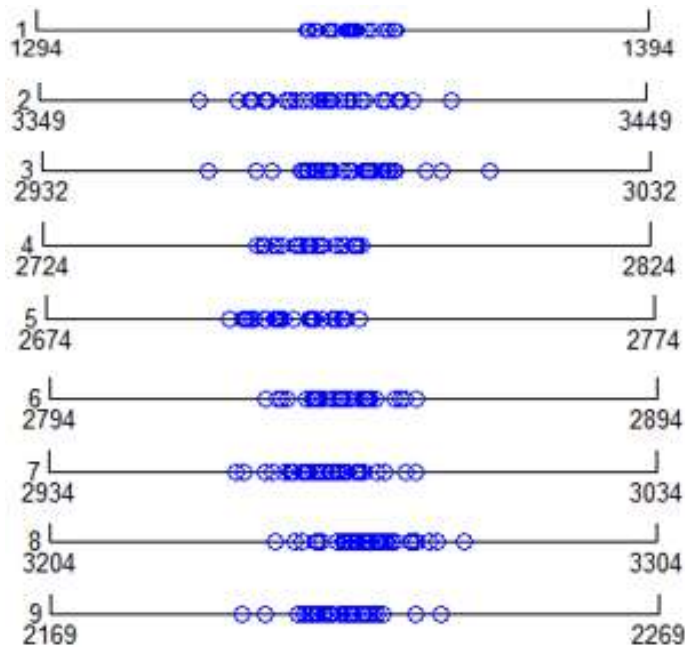
Tabla 4-3 Dispersión velocidad, E

TRAMO	DISPERSIÓN (m/s)
1	3,10
2	3,57
3	4,43
4	1,74
5	2,16
6	2,28
7	2,48
8	2,27
9	3,58

Tabla 4-4 Dispersión velocidad, O

TRAMO	DISPERSIÓN (m/s)
1	3,14
2	3,57
3	4,33
4	1,73
5	2,40
6	2,32
7	2,34
8	2,21
9	3,58

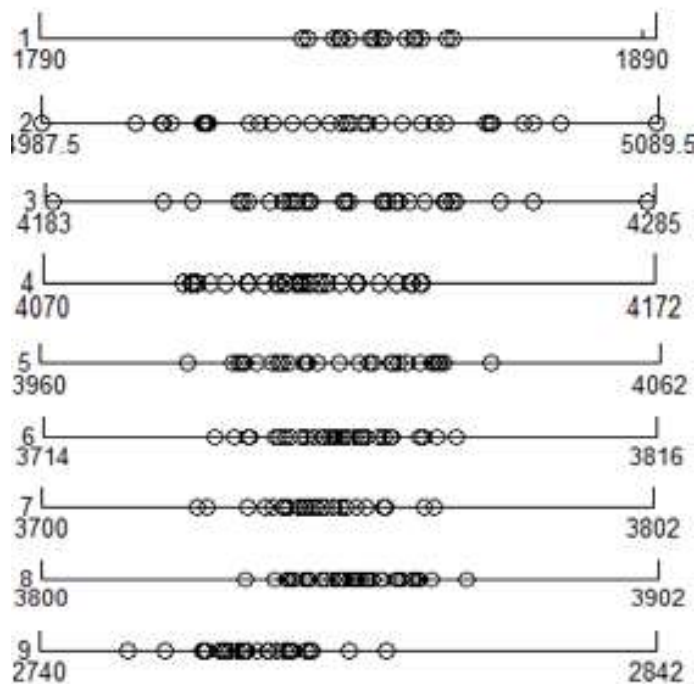
Realizando las representaciones análogas con los datos del consumo de combustible, obtenemos las siguientes figuras:



4-14 Dispersión del consumo, Este

Tabla 4-5 Dispersión consumo, E

TRAMO	DISPERSIÓN (kg)
1	14,62
2	41,60
3	46,43
4	16,97
5	21,03
6	24,63
7	29,47
8	31,10
9	32,71

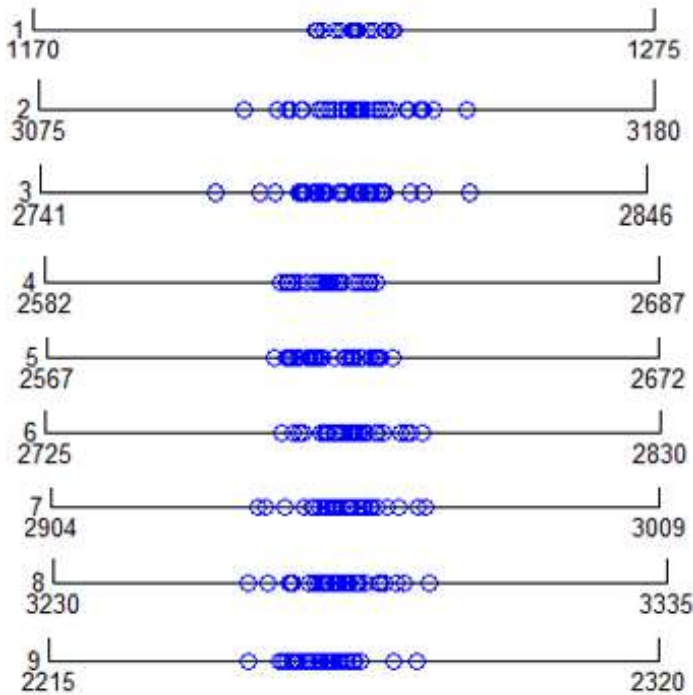


4-15 Dispersión del consumo, Oeste

Tabla 4-6 Dispersión consumo, O

TRAMO	DISPERSIÓN (kg)
1	31,53
2	101,38
3	99,22
4	39,84
5	49,80
6	40,19
7	39,65
8	36,60
9	42,82

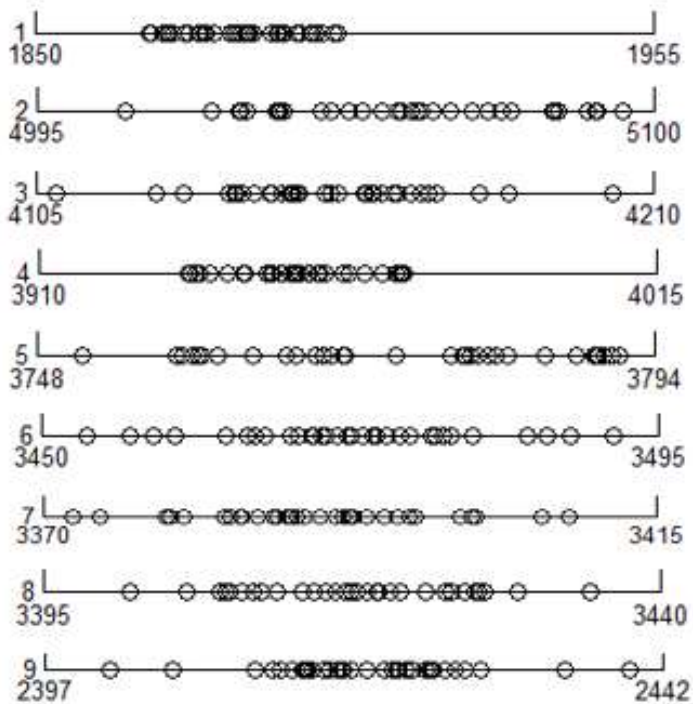
Finalmente se presentan las mismas figuras para el caso de la dispersión en el tiempo de vuelo



4-16 Dispersión del tiempo, Este

Tabla 4-7 Dispersión tiempo, E

TRAMO	DISPERSIÓN (kg)
1	13,31
2	38,27
3	43,89
4	16,22
5	20,32
6	24,21
7	29,11
8	30,95
9	29,12



4-17 Dispersión del tiempo Oeste

Tabla 4-8 Dispersión tiempo, O

TRAMO	DISPERSIÓN (kg)
1	13,31
2	38,27
3	43,89
4	16,22
5	20,32
6	24,21
7	29,11
8	30,95
9	29,12

Finalmente para comentar las conclusiones extraídas tras observar las representaciones anteriores, se presenta en una tabla todos los resultados de la dispersión tanto hacia el Este como hacia el Oeste de la velocidad y el consumo.

Tabla 4-9 Comparación de la dispersión en los miembros del “ensemble” en velocidad y consumo

Segmento	Vg (m/s)	Consumo (kg)	Tiempo (s)	Vg (m/s)	Consumo(kg)	Tiempo (s)
	Este	Este	Este	Oeste	Oeste	Oeste
1	3,10	14,62	13,31	3,15	31,53	32,05
2	3,57	41,60	38,27	3,57	101,38	100,08
3	4,43	46,43	43,89	4,33	99,22	94,74
4	1,74	16,97	16,22	1,74	39,84	36,68
5	2,16	21,03	20,32	2,41	49,80	47,16
6	2,28	24,63	24,21	2,32	40,19	38,50
7	2,48	29,47	29,11	2,35	39,65	36,32
8	2,27	31,10	30,95	2,27	36,60	33,63
9	3,58	32,71	29,12	3,58	42,82	37,96

Una vez mostradas las gráficas podemos extraer una serie de conclusiones que planteamos a continuación.

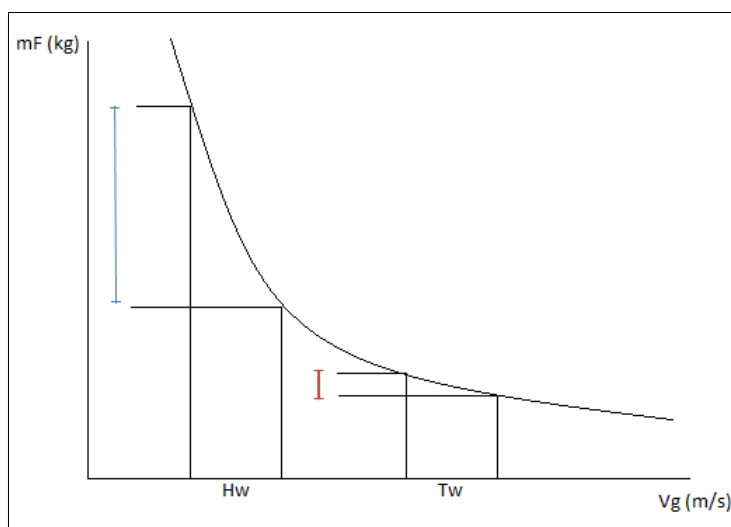
La primera surge al observar la dispersión de los datos del consumo de combustible y tiempo de vuelo cuando recorremos la ruta hacia el Este o hacia el Oeste. Se puede observar cómo la dispersión y por tanto la incertidumbre de los datos obtenidos en el caso de la ruta hacia el Oeste son mucho mayores.

Por otro lado, en la tabla 4-9 se encuentran sombreados en los mismos colores algunas parejas de datos que, aun teniendo la misma dispersión en la velocidad respecto a tierra, generan valores de combustible y de tiempos de vuelo que tienen distinta dispersión. Así por ejemplo en la ruta hacia el Este, los segmentos 2 y 9 presentan la misma incertidumbre en los datos de la velocidad respecto a tierra, sin embargo es en el tramo 2 donde los datos de consumo y de tiempo de vuelo presentan una mayor dispersión, siendo la diferencia con los del tramo 9 considerable. Lo mismo se puede observar con las parejas resaltadas en la tabla para la ruta hacia el Oeste.

La explicación a la diferencia entre la incertidumbre en el caso de volar hacia el Este o hacia el Oeste se encuentra en el hecho de que en el primer caso la velocidad respecto a tierra es mucho mayor al tener viento de cola, mientras que en el segundo al tener el viento de cara la velocidad respecto a tierra es menor.

De la misma manera los distintos resultados en la incertidumbre de los datos de consumo en los distintos segmentos dentro de la misma ruta, teniendo una misma dispersión en la velocidad respecto a tierra, se deben a que la intensidad del viento en cada segmento es distinta, siendo por tanto también distinta la velocidad respecto a tierra en cada tramo. Por tanto, aunque presente una misma dispersión el viento, es decir la V_g , los tramos que tengan valores de velocidad mayores, es decir vientos de cola mayores o vientos de cara de menor intensidad, presentarán una menor incertidumbre en el consumo y en el tiempo de vuelo.

La mejor manera de entender este fenómeno es representar cualitativamente la curva del consumo frente a la velocidad respecto a tierra.



4-18 Curva teórica cualitativa del consumo de combustible frente a Vg

En la figura (4-18) se puede observar lo comentado anteriormente. Debido a la forma de la curva teórica de la evolución del consumo de combustible con la velocidad respecto a tierra, la cual como ya se ha comentado en diversas ocasiones incluye el efecto del viento, se puede apreciar como al introducir valores de viento y por tanto de velocidad con una misma dispersión, la dispersión de valores de consumo que generan es diferente dependiendo de la magnitud de esos valores de la velocidad. Así, para valores elevados de la velocidad la dispersión en los resultados del consumo es menor que para valores menores.

Es por ello que, como aparece reflejado en dicha figura, vientos de cola generan una velocidad respecto a tierra mayor que hace que la incertidumbre en el consumo sea menor, mientras que vientos de cara dan lugar a velocidades menores que hacen que nos situemos en la parte izquierda de dicha gráfica.

Finalmente, en nuestro caso de estudio el plantear el vuelo hacia el Este y hacia el Oeste nos ha permitido observar este fenómeno ya que al ir hacia el Este todos los vientos son de cola y al ir hacia el Oeste son de cara.

En el caso del tiempo de vuelo la explicación es la misma puesto que la curva del tiempo frente a la velocidad respecto a tierra presenta la misma forma que la del consumo, como se verá en los siguientes apartados.

4.3 Análisis de la dispersión

Para completar los resultados obtenidos en el apartado anterior sobre la dispersión de los valores de viento, de consumo de combustible y del tiempo de vuelo, a continuación se presentan una serie de gráficas obtenidas por el programa de Matlab donde se observa claramente este fenómeno, está vez de forma cuantitativa sobre los datos reales que hemos obtenido.

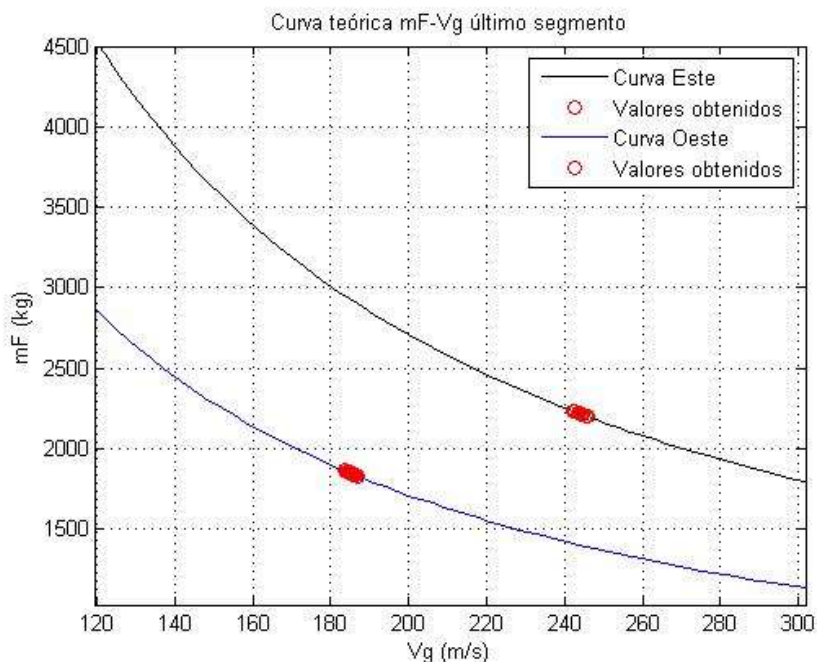
Además para dejar claro este estudio al final del apartado se mostrarán varias gráficas donde se observa más claramente dicha diferencia en las dispersiones de los datos de consumo y tiempo de vuelo.

Para empezar, cabe mencionar que la curva teórica representada en el apartado anterior del consumo frente a la velocidad respecto a tierra se obtendría dando valores a la velocidad en la expresión (2.25) que se vuelve a presentar a continuación:

$$m_F = \frac{(m_f^2 + A/B) \tan\left(\frac{\sqrt{AB} d}{Vg}\right)}{\sqrt{A/B} - m_f \tan\left(\frac{\sqrt{AB} d}{Vg}\right)} \quad (4.1)$$

Sin embargo, como se puede ver esta expresión depende de la distancia y de la masa final del avión. Es por ello que obtendríamos una gráfica por cada segmento, debido a que la distancia es distinta para cada uno, pero también al depender de la masa final de combustible tendríamos gráficas diferentes para cada miembro del “ensemble”, ya que en función de los distintos vientos, en cada segmento de cada miembro la masa final es distinta. El único caso en el que la masa de combustible final es independiente del miembro es en el caso del último segmento, ya que como se comentó en el planteamiento del problema se ha tomado la masa del avión al final de trayecto como dato inicial de la integración.

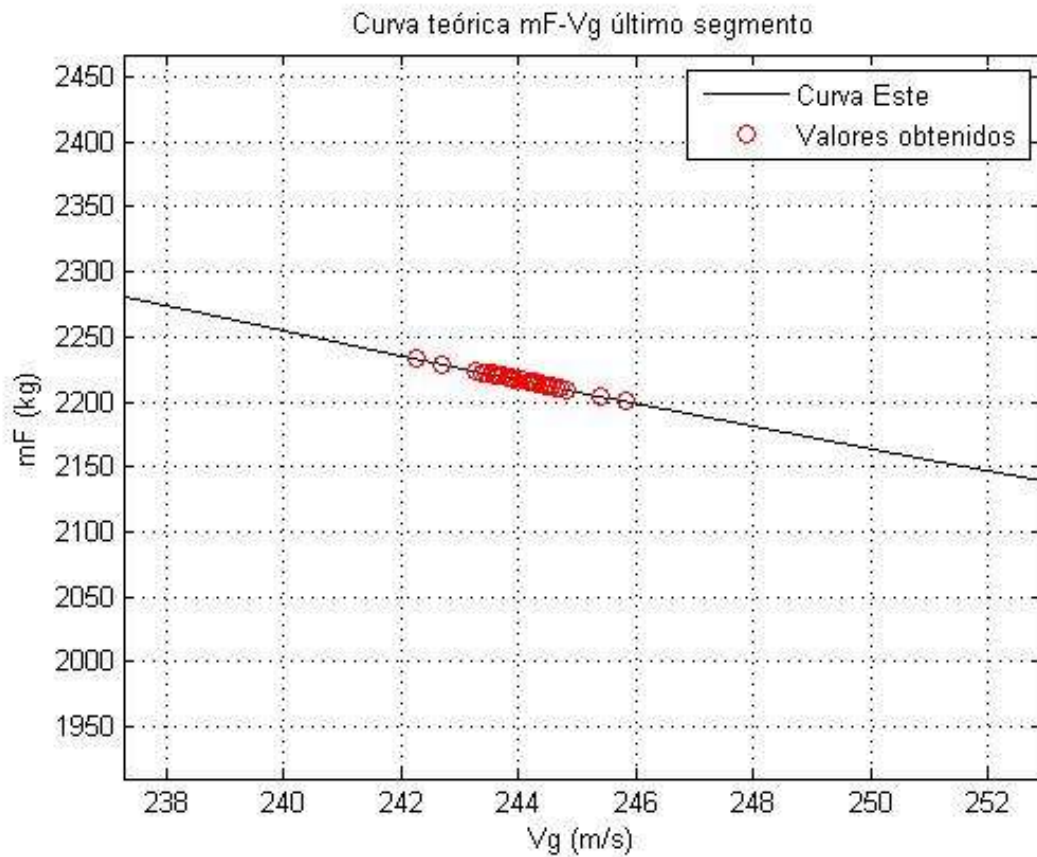
Así pues, a continuación se muestran las figuras correspondientes a dicha curva para el segmento 9 en el caso de la ruta hacia el Este, y el segmento 1, que corresponde con el último segmento de la ruta hacia el Oeste. Primero se representarán las dos curvas juntas en una misma gráfica para observar la diferencia entre ambas, y a continuación cada una por separado para observar con precisión los puntos obtenidos.



4-19 Curva mF-Vg para el último segmento

Tabla 4-10 Datos de combustible y velocidad del segmento 9 ruta Este

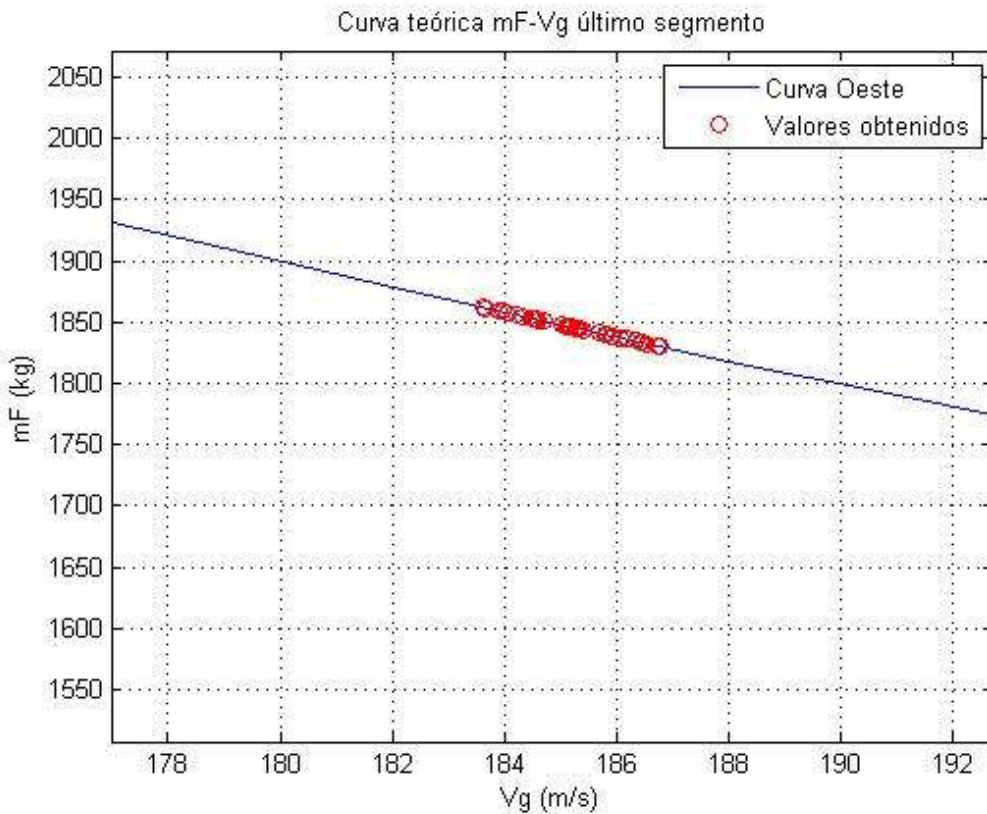
RUTA HACIA EL ESTE, SEGMENTO 9			Miembro	mF (kg)	Vg (m/s)
Miembro	mF (kg)	Vg (m/s)	18	2213,07	244,45
1	2218,63	243,84	19	2212,65	244,50
2	2214,78	244,26	20	2220,70	243,62
3	2200,46	245,85	21	2215,21	244,22
4	2233,17	242,26	22	2218,32	243,88
5	2217,82	243,93	23	2220,79	243,61
6	2215,65	244,17	24	2212,68	244,50
7	2214,28	244,32	25	2229,08	242,71
8	2219,06	243,80	26	2204,47	245,40
9	2210,61	244,72	27	2220,60	243,63
10	2222,73	243,40	28	2212,74	244,49
11	2219,65	243,73	29	2221,39	243,54
12	2213,81	244,37	30	2212,07	244,56
13	2222,24	243,45	31	2209,69	244,82
14	2211,23	244,65	32	2223,72	243,29
15	2218,22	243,89	33	2212,82	244,48
16	2215,09	244,23	34	2220,53	243,64
17	2220,15	243,68	35	2216,71	244,05



4-20 Curva mF-Vg y valores obtenidos para la ruta hacia el Este

Tabla 4-11 Datos de consumo y velocidad del segmento 1 ruta Oeste

RUTA HACIA EL OESTE, SEGMENTO 1			Miembro	mF (kg)	Vg (m/s)
Miembro	mF (kg)	Vg (m/s)	18	1833,92	186,42
1	1853,19	184,49	19	1846,75	185,13
2	1838,78	185,93	20	1845,14	185,29
3	1839,65	185,84	21	1836,35	186,17
4	1852,24	184,58	22	1855,78	184,23
5	1833,51	186,46	23	1861,90	183,63
6	1858,55	183,96	24	1830,37	186,78
7	1841,21	185,68	25	1861,47	183,67
8	1850,82	184,72	26	1830,77	186,74
9	1834,56	186,35	27	1837,23	186,08
10	1857,55	184,06	28	1855,03	184,31
11	1851,92	184,61	29	1859,25	183,89
12	1839,97	185,81	30	1832,89	186,52
13	1847,09	185,09	31	1847,83	185,02
14	1844,75	185,33	32	1843,98	185,41
15	1845,41	185,26	33	1839,20	185,88
16	1846,50	185,15	34	1852,70	184,54
17	1857,65	184,05	35	1845,99	185,20



4-21 Curva mF-Vg y valores obtenidos para la ruta hacia el Oeste

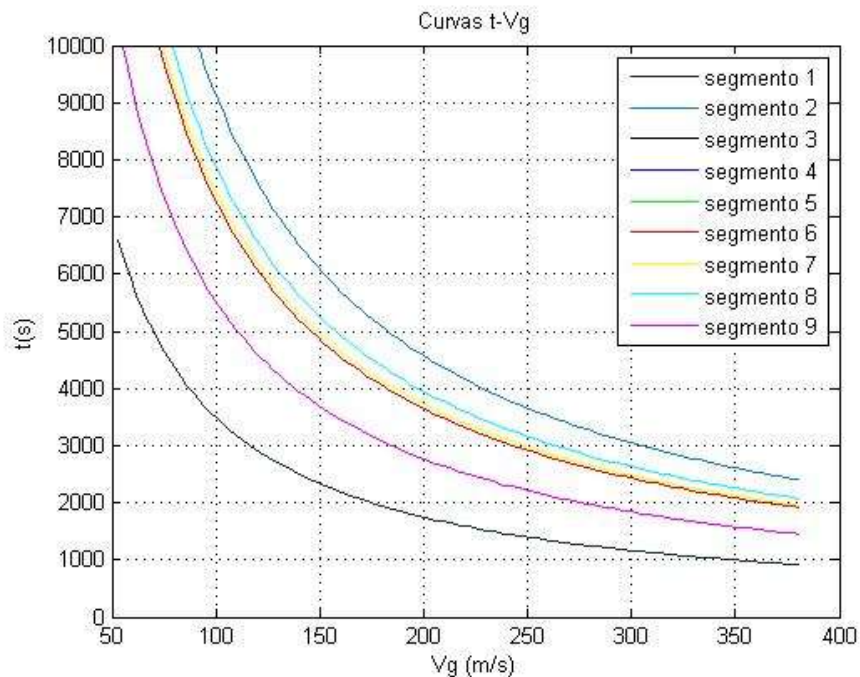
Una vez representadas las gráficas cabe comentar las apreciaciones que hicimos al comienzo del capítulo.

- En primer lugar, en la figura 4-19 se puede ver que efectivamente la curva teórica de la ruta hacia el Este y hacia el Oeste son distintas, dado que la distancia recorrida en el último segmento de ambas es distinta.
- Por otro lado, se puede ver cómo los vientos de cola se encuentran en el lado derecho de la gráfica mientras que los de cara en la izquierda, y que dada la forma de la curva esta posición hace que la dispersión de los datos de consumo sea mayor cuanto más a la izquierda se encuentre, es decir cuanto mayores sean los vientos de cara, y por tanto menor la velocidad respecto a tierra.
- Finalmente cabe mencionar que al tener que representar en distintas curvas los valores de la ruta hacia el Este y hacia el Oeste y además al tratarse de distintos segmentos, no se puede apreciar con tanta claridad el hecho de que en la ruta hacia el Oeste la dispersión de los datos del consumo sea mayor

Para continuar con el estudio de la incertidumbre de los datos, y debido a las limitaciones que la curva del consumo frente a la velocidad presenta como se comentó anteriormente, se ha planteado el estudio de la evolución del tiempo de vuelo respecto a la velocidad respecto a tierra, que viene dado por la siguiente expresión:

$$t_{vuelo} = \frac{d}{V_g} \quad (4.2)$$

Dicha curva solo va a depender del segmento, ya que varía con la distancia. A continuación se presentan las curvas teóricas de los nueve segmentos.

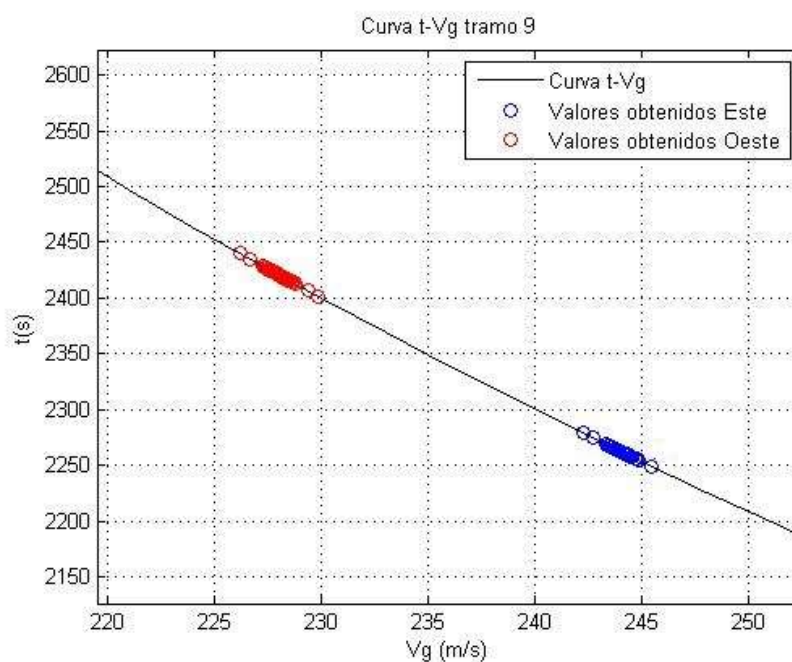


4-22 Curvas t-Vg para todos los segmentos

Dado que se obtiene una curva por segmento, se puede representar en ella los datos obtenidos tanto en la ruta hacia el Este como en la ruta hacia el Oeste, ya que la expresión (4.2) es independiente del sentido en que se recorra. Así pues, a continuación se presentan el caso del último segmento:

Tabla 4-12 Datos de tiempo y velocidad para el segmento 9

SEGMENTO 9, RUTA ESTE Y OESTE				Miembro	t (s) Este	t (s) Oeste	Vg (m/s)
Miembro	t (s) Este	t (s) Oeste	Vg (m/s)	18	2258,10	2424,73	244,45
1	2263,74	2418,30	243,84	19	2257,68	2425,22	244,50
2	2259,84	2422,82	244,26	20	2265,84	2416,03	243,62
3	2259,84	2439,70	245,85	21	2260,28	2422,62	244,22
4	2278,50	2401,74	242,26	22	2263,43	2418,60	243,88
5	2262,93	2419,31	243,93	23	2265,94	2415,75	243,61
6	2260,73	2421,74	244,17	24	2257,71	2425,43	244,50
7	2259,33	2423,37	244,32	25	2274,36	2406,37	242,71
8	2264,18	2417,84	243,80	26	2249,38	2434,91	245,40
9	2255,60	2427,69	244,72	27	2265,74	2416,00	243,63
10	2267,90	2413,59	243,40	28	2257,77	2425,25	244,49
11	2264,78	2417,41	243,73	29	2266,55	2415,05	243,54
12	2258,85	2423,84	244,37	30	2257,09	2426,16	244,56
13	2267,41	2414,15	243,45	31	2254,68	2428,84	244,82
14	2256,24	2426,95	244,65	32	2268,91	2412,40	243,29
15	2263,33	2418,83	243,89	33	2257,85	2425,02	244,48
16	2260,16	2422,40	244,23	34	2265,67	2416,24	243,64
17	2265,29	2416,50	243,68	35	2261,80	2420,55	244,05



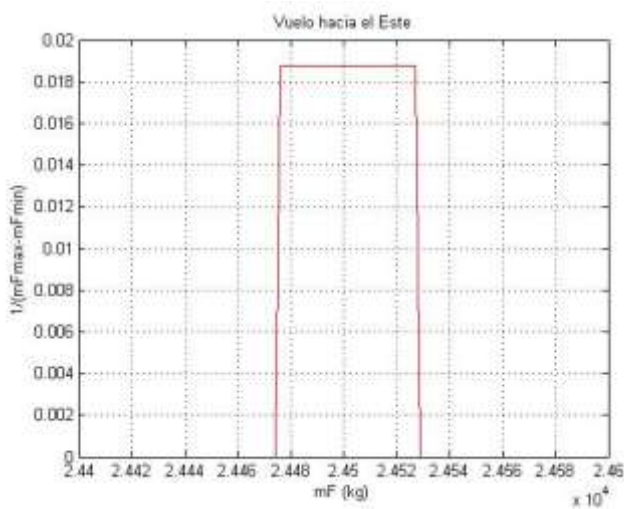
4-23 Curva t-Vg con valores obtenidos para tramo 9

Para ver las gráficas correspondientes al resto de segmentos ir a Anexo E.

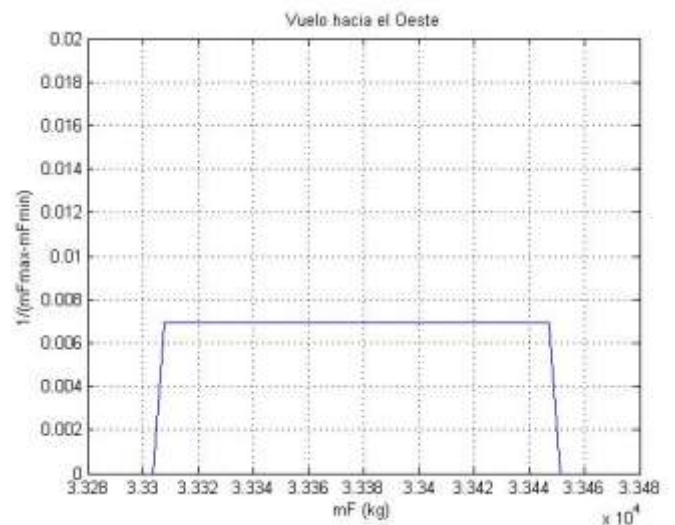
En las gráficas anteriores, se pueden apreciar resultados análogos a los que observamos con el consumo de combustible, aunque el hecho de poder representar en una misma curvar teórica los vientos de cola y de cara, al representar los datos de la ruta hacia el Este y hacia el Oeste, permite ver con más claridad la explicación de la diferencia en la incertidumbre de los datos, en este caso del tiempo.

Finalmente, para terminar con el estudio de la dispersión, a continuación se presentan una serie de gráficas que muestran claramente todos los resultados obtenidos y las conclusiones comentadas anteriormente.

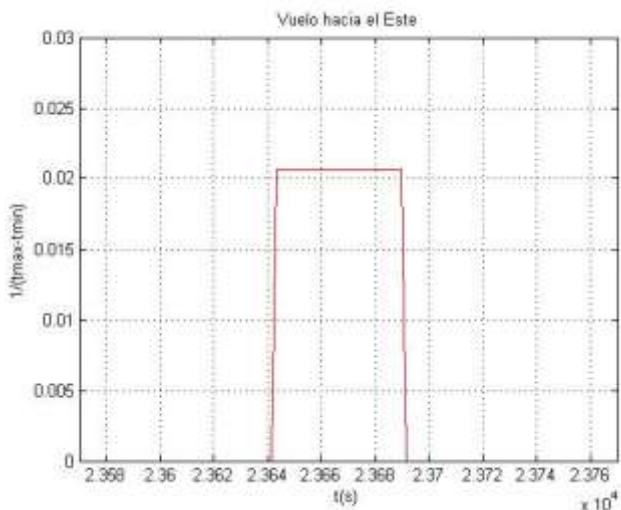
En ellas tanto el consumo de combustible como el tiempo de vuelo se representan suponiendo una distribución uniforme (pdf) [4]



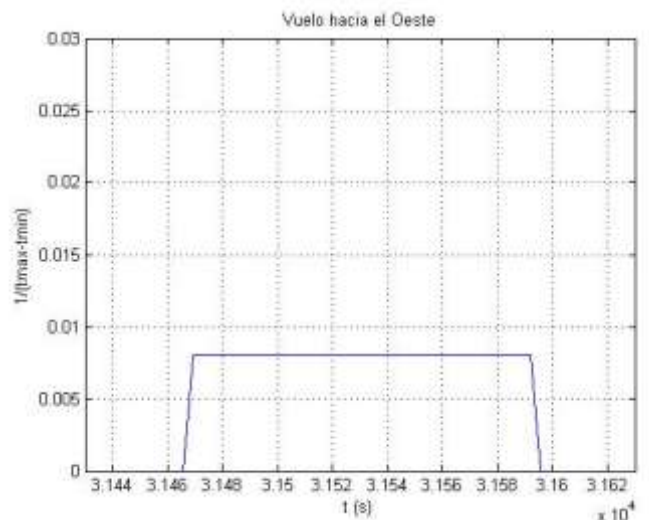
4-24 Dispersión del consumo en ruta hacia el Este



4-25 Dispersión del consumo en ruta hacia el Oeste



4-26 Dispersión del tiempo en ruta hacia el Este



4-27 Dispersión del tiempo en ruta hacia el Oeste

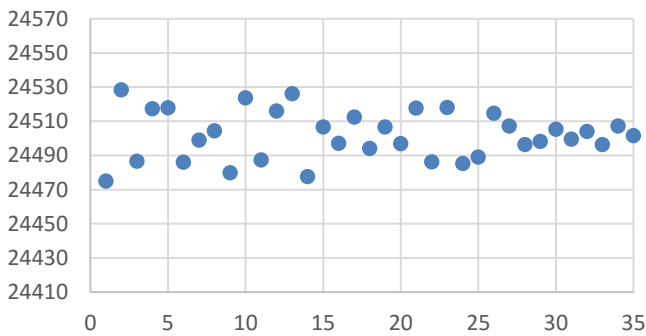
Para representar las gráficas anteriores ha bastado con seleccionar el valor máximo y mínimo del consumo de combustible y el tiempo total de vuelo de todos los miembros.

Es finalmente en estas gráficas donde se puede apreciar con claridad cómo una misma incertidumbre en los valores de las predicciones del viento provocan una incertidumbre mayor en los valores del consumo y del tiempo cuando los vientos vienen de cara.

4.4 Resultados para los 35 miembros tomando valores totales

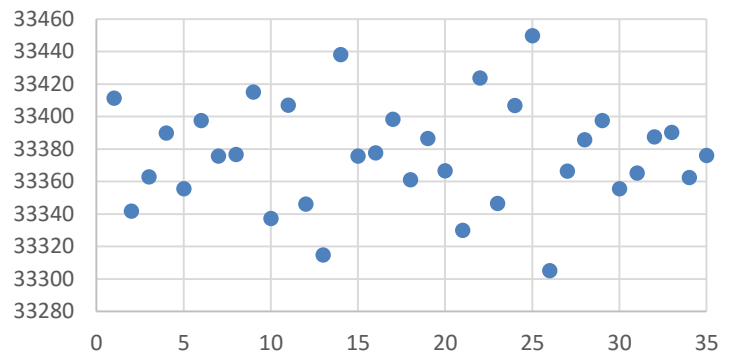
En el siguiente apartado se realiza un estudio dejando de lado los segmentos para observar la dispersión entre los miembros del “ensemble”. Para ello se han tomado los valores del consumo de combustible total y del tiempo total de vuelo y se han representado en una gráfica de puntos para ver la dispersión de los datos.

mF (kg) por cada miembro (Este)



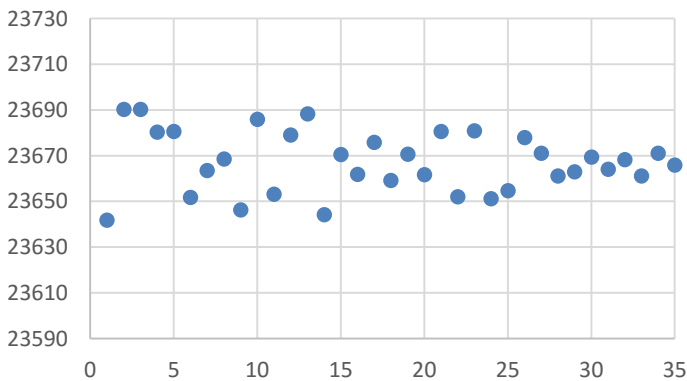
4-28 Dispersión por puntos del consumo - Este

mF (kg) por cada miembro (Oeste)



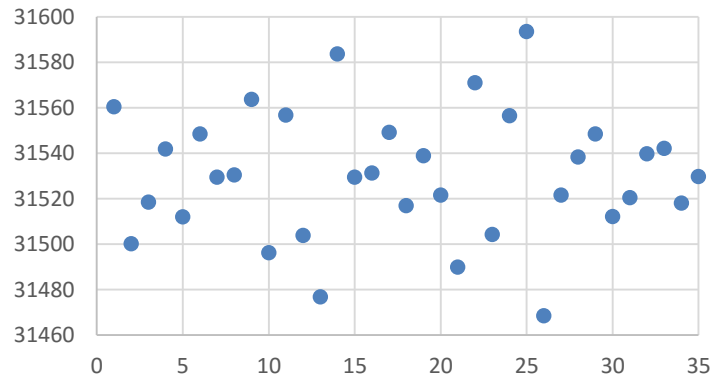
4-29 Dispersión por puntos del consumo - Oeste

t (s) por cada miembro (Este)



4-30 Dispersión por puntos del tiempo de vuelo- Este

t(s) por cada segmento (Oeste)



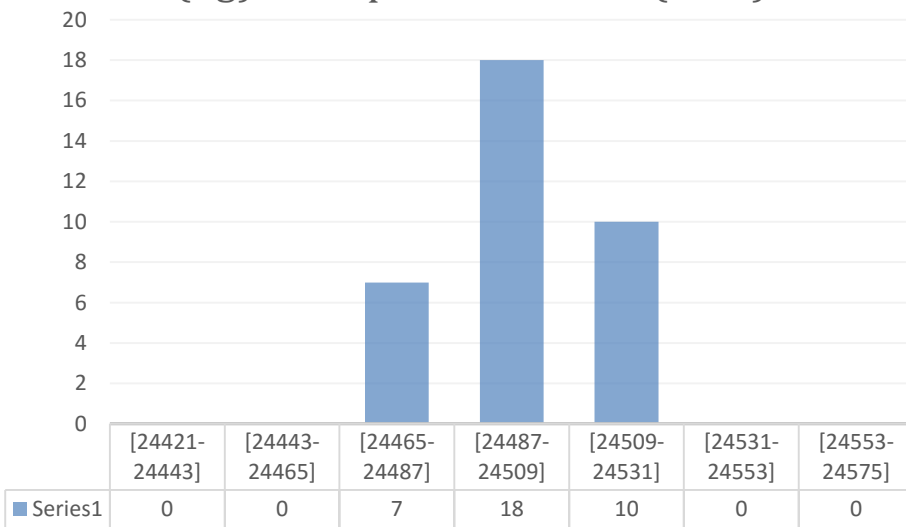
4-31 Dispersión por puntos del tiempo de vuelo- Oeste

En estas gráficas se vuelve a corroborar los resultados obtenidos en el apartado anterior. Como era de esperar, la dispersión de los puntos en las gráficas de la ruta hacia el Oeste es mayor que en las de la ruta hacia el Este como ya se explicó anteriormente.

4.5 Resultados por intervalos.

Finalmente, para acabar con el capítulo de análisis de resultados presentaremos una serie de gráficas en las que se representa el consumo de combustible y el tiempo de vuelo en ambas rutas, hacia el Este y hacia el Oeste, en intervalos de valores de igual amplitud. De forma que se pueda apreciar entre qué valores están comprendidos la mayoría de los miembros y así poder estimar cual va a ser el valor del consumo de combustible total y el tiempo de vuelo.

mF (kg) total por intervalos (Este)



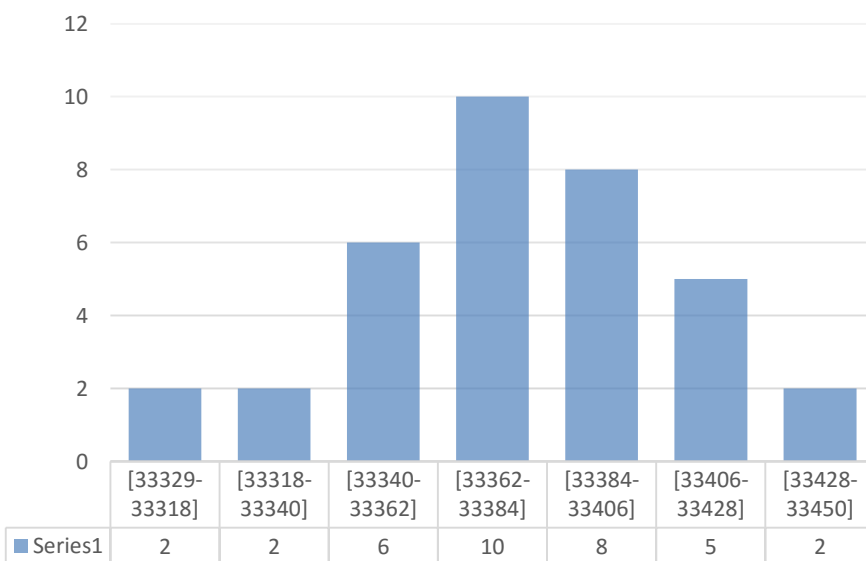
Porcentaje (%) de datos	Intervalo
52%	[24487– 24509]
100%	[24465 – 24531]



Valor Promedio	24501,9 kg
----------------	------------

4-32 Consumo por intervalos- Este

mF (kg) total por intervalos (Oeste)



Porcentaje (%) de datos	Intervalo
29%	[33362 – 33384]
69%	[33340 - 33406]



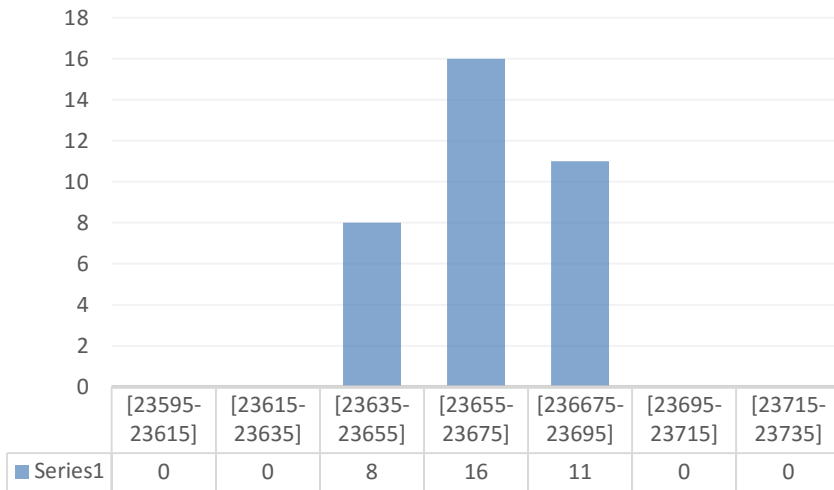
Valor Promedio	33376,7 kg
----------------	------------

4-33 Consumo por intervalos- Oeste

En primer lugar observamos que ambas gráficas presentan una distribución que se asemeja a una campana de Gaus, es decir la mayoría de los miembros del “ensemble” han dado lugar a valores de consumo que se encuentran comprendidos entre los intervalos centrales

A continuación se desarrollará un estudio análogo pero para el caso del tiempo total de vuelo, observándose el mismo comportamiento.

Tiempo total por intervalos (Este)



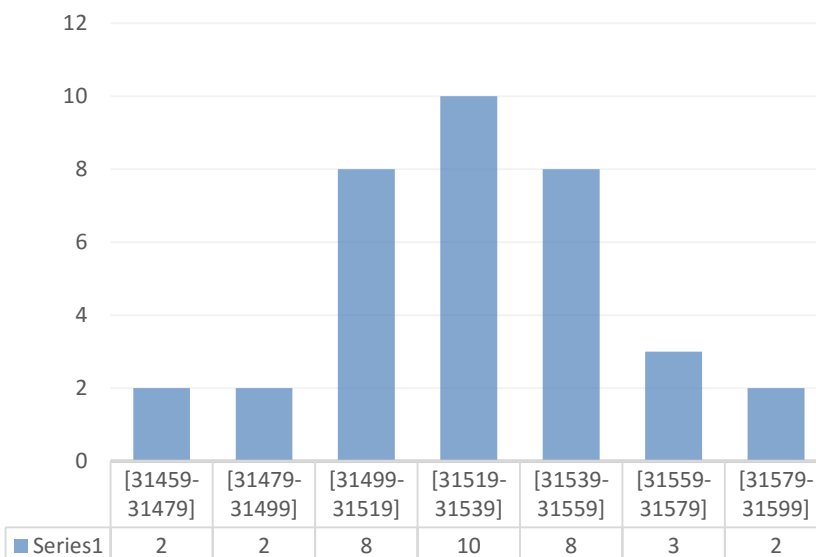
Porcentaje (%) de datos	Intervalo
46%	[23655 - 23675]
100%	[23635 - 23655]

↓

Valor Promedio	23667,3 s
----------------	-----------

4-34 Tiempo de vuelo por intervalos- Este

Tiempo total por intervalos (Oeste)



Porcentaje (%) de datos	Intervalo
29%	[31519 - 31539]
74%	[31499 - 31559]

↓

Valor Promedio	31530,4 s
----------------	-----------

4-35 Tiempo de vuelo por intervalos - Oeste

5 CONCLUSIONES

En el presente apartado se concluye el trabajo con un resumen de los resultados obtenidos y comentados en apartados anteriores, así como de las conclusiones extraídas tras el estudio y los análisis de los datos obtenidos. Además, puesto que como se comentó en la introducción del trabajo, el estudio que se ha llevado a cabo a lo largo de este proyecto no es más que una pequeña contribución a un gran conjunto de estudios que serían necesarios para poder controlar y saber considerar la incertidumbre de los datos meteorológicos en la selección de trayectorias, al final del capítulo se plantean posibles trabajos futuros.

5.1 Resumen y conclusiones

En primer lugar, la realización de este proyecto lleva asociado un primer objetivo que es el de mostrar la necesidad de estudiar y considerar la incertidumbre de las predicciones y su efecto en el cálculo de parámetros de interés en el vuelo. Es por ello que la implementación del método EPS, junto con la programación de la herramienta para el cálculo del consumo de combustible y del tiempo de vuelo han sido, además de un paso necesario para la obtención de datos que posteriormente se han analizado, una forma de plantear el proceso a seguir para la realización de estudios que nos permitan controlar la incertidumbre meteorológica a fin de mejorar la precisión y seguridad de los sistemas actuales de selección de trayectorias usados en la gestión del tráfico aéreo.

Una vez comentado uno de los motivos que hacen de estos estudios algo relevante en la actualidad, a continuación se presentan las conclusiones obtenidas al observar los resultados obtenidos:

- En primer lugar se ha observado que la incertidumbre en los valores del viento medio con el que se cruza un avión a lo largo de su trayectoria tienen un efecto considerable en el consumo de combustible y el tiempo de vuelo, es decir, en ningún caso se trata de un efecto despreciable que no tenga apenas efecto en los parámetros de vuelo. Si bien, el efecto dependerá de cómo sea la incertidumbre de dichos valores de viento.
- Por otro lado, se ha podido extraer una importante conclusión al observar el caso de los vientos de cola o de cara. Se ha visto cómo para una misma incertidumbre en los datos de viento medio, cuando estos vientos son de cola la incertidumbre que se produce en los datos del consumo y el tiempo es menor que cuando los vientos son de cara. Este resultado nos hace plantear una importante cuestión, si bien siempre es importante darle importancia a la incertidumbre de las predicciones, cuando estas predicciones se traten de vientos de cara la necesidad de estudiar bien la dispersión de los datos es mucho mayor ya que la incertidumbre de los datos que obtengamos va a ser elevada. Ésta es probablemente la conclusión más relevante del estudio.
- Finalmente, al presentar los resultados por intervalos hemos observado que aunque los valores obtenidos presenten una cierta dispersión, se distribuyen siguiendo una campana de Gauss, por lo que a la hora de estimar un valor concreto, en muchos casos se podría tomar un valor promedio teniendo un alto porcentaje del total de valores calculados comprendido en un intervalo pequeño.

Para terminar con el resumen y las conclusiones, cabe mencionar que en nuestro caso se ha estudiado una sola ruta recorrida en ambos sentidos lo cual en la práctica no es exactamente lo que se implementa, dado que si una ruta presenta vientos de cara en casi la totalidad de su trayectoria probablemente se optaría por seguir otro camino.

5.2 Trabajo futuro

Partiendo de la base que el campo de estudio en el que se enmarca este proyecto es de gran envergadura y se encuentra actualmente en un proceso de mejora y optimización a fin de incluir estos efectos de incertidumbre en los sistemas del control de tráfico aéreo para mejorar su calidad y precisión, son muchos los caminos a seguir para continuar con el estudio aquí realizado.

En primer lugar, plantear el estudio para otras rutas sería una posible opción, así como la ampliación del mismo considerando parámetros como el alcance o la autonomía. Este complemento de nuevas rutas podría permitir plantear el problema de selección de una ruta óptima donde el efecto de la incertidumbre en las predicciones meteorológicas, el cual asumimos que es inevitable, se minimice.

Otra opción de mejora o complementación de este estudio podría ser el estudiar el mismo problema tomando “ensembles” con más miembros, de manera que se recoja mejor la incertidumbre de estos datos.

Otro posible trabajo para el futuro es la realización de este estudio para distintos aviones (incluidos en BADA), y poder así analizar la influencia del tamaño de la aeronave.

Finalmente, en este proyecto se ha planteado el caso de un vuelo de crucero a altitud constante, es por ello que para estudios posteriores se podría plantear el caso de cruceros a distintas altitudes o incluso considerar otros segmentos de vuelo.

REFERENCIAS

- [1] A.Nilim, L. El Ghaoui, M. Hansesn y V. Duong “Trajectory-based air traffic management (TB-ATM) under weather uncertainty”, Proceedings of the 5th USA-Europe ATM Seminar (ATM2003),2003, pp:1-10.
- [2] J.W. Pepper, K.R. Mills, y L.A Wojcik, “Predictability and uncertainty in air traffic flow management” Proceedings of the 4th USA-Europe ATM Seminar (ATM2001),2001, pp 1-11.
- [3] J. Clarke, S. Solak, Y. Chang, L. Ren, y L. Vela, “Air traffic flow management in the presence of uncertainty,” Proceedings of the 8th USA-Europe ATM Seminar (ATM2009), 2009, pp 1-10.
- [4] D.Rivas, R.Vázquez y A.Franco “Probabilistic Analysis of Aircraft Fuel Consumption Using Ensemble Weather Forecasts”, Proceedings of the 7th ICRAT conference, 2016, pp 1-8
- [5] <http://sesarinnovationdays.eu/files/2013/Posters/SID%202013%20poster%20IMET.pdf>

ANEXOS

Anexo A: Programa

A continuación se presentan las líneas del código utilizado para desarrollar el programa de Matlab que, tomando como datos de entrada la trayectoria y los vientos medios en cada uno de los segmentos que la conforma, obtiene el consumo de combustible así como otros datos de interés que nos han servido para realizar los análisis que se han presentado anteriormente.

Cabe mencionar que el programa consta de un código principal que llama a distintas funciones para realizando los cálculos necesarios.

Programa Principal

```
%% PROGRAMA PRINCIPAL EN LOS DOS SENTIDOS CON UN EWF %%

close all, clear all, clc

%DATOS DE ENTRADA
%WAYPOINTS (ordenados de EEUU a Francia)
lons=[-73.779,-70,-60,-50,-40,-30,-20,-10,0,6.164]; % Grados
lats=[40.64,42,46,48,49,49,49,48,46,43.6250]; % Grados

% DATOS DE VIENTO
nmiembros=35; % Numero de miembros de la EWF
xlswrite('Datos',nmiembros,'Datos_consumo','C1')% Escritura en excel

% Creación de una matriz para rellenar con los datos de viento
wlmprom=zeros(nmiembros,9);
wtmprom=zeros(nmiembros,9);

% Lectura de datos de viento de la hoja de Excel
[wlmprom]=xlsread('Datos','Datos_viento','B4:J38');
[wtmprom]=xlsread('Datos','Datos_viento','L4:T38');

% DATOS COMUNES EN TODAS LAS FUNCIONES
global g M h S
p=20000; % Pa Presión a la que se han calculado los valores del viento
[h]=calcular_altura(p); % ft Calcula la altura a la que se da dicha presión
con el modelo atm ISA
M=0.8;
MTOW=186880; % kg
S=283.3; % m^2
g=9.80665; % m/s^2

% CREACIÓN DE MATRICES DE RESULTADOS
rumbov=zeros(9,1); % En todas las iteraciones la trayectoria es la misma,
mismo rumbo
```

```

dv=zeros(9,1); % En todas las iteraciones la distancia entre los segmentos es
la misma

WFwv=zeros(9,2*nmiembros); % Por cada miembro del EWF dos rutas (Este, Oeste)
Vgv=zeros(9,2*nmiembros);

% ITERACIONES

for k=1:nmiembros

for j=1:2 % Integración según el sentido, una hacia el Este y otra hacia el
Oeste
    % Definición de las condiciones iniciales en cada iteración
    Wf=g*110000; % Peso del avión con el que tiene que llegar al final del
trayecto
for i=1:9 % Integración en cada tramo

    % Definición del tramo
    long1=lons(11-i-1);
    long2=lons(11-i);
    lati1=lats(11-i-1);
    lati2=lats(11-i);

    % Cálculo de la distancia y el rumbo
    [d,rumbo]=calcula_distancia_rumbo(long1,long2,lati1,lati2);

    % Cálculo el consumo con viento
    xf=d;
    w=wlmprom(k,10-i);
    wc=wtmprom(k,10-i);

    [WFw,Vg]=consumo_viento(Wf,xf,wc,w);
    Wf=Wf+WFw; % Calculo del peso inicial para el siguiente tramo

    % Se van rellenando las matrices de resultados
% Bucle if para que los vectores de las iteraciones de la ruta en ambos
% sentidos esten ordenados igual y se puedan representar de manera conjunta
    if j==1
        rumbov(10-i,2*k-1+(j-1))=rumbo;
        dv(10-i,2*k-1+(j-1))=d;
        WFwv(10-i,2*k-1+(j-1))=WFw;
        Vgv(10-i,2*k-1+(j-1))=Vg;
    else
        rumbov(i,2*k-1+(j-1))=rumbo;
        dv(i,2*k-1+(j-1))=d;
        WFwv(i,2*k-1+(j-1))=WFw;
        Vgv(i,2*k-1+(j-1))=Vg;
    end

end

% CALCULO DE VALORES TOTALES
WFwvtotal(1,2*k-1+(j-1))=sum(WFwv(:,2*k-1+(j-1)));
mFwvtotal=WFwvtotal./g;

% INVERSIÓN DE VECTORES PARA RUTA HACIA EL OESTE
% Para el caso de la ruta hacia el oeste invertimos los vectores de datos de

```

```

% entrada para que nos sirva el mismo programa con los mismos indices y
% cambiamos el signo de los vientos debido al cambio de sentido
    wlmprom=fliplr(wlmprom);
    wlmprom=-wlmprom;
    wtmprom=fliplr(wtmprom);
    wtmprom=-wtmprom;
    lons=fliplr(lons);
    lats=fliplr(lats);
end
end

% PRESENTACIÓN DE RESULTADOS
    dv; % m
    xlswrite('Datos',dv(:,1),'Datos_trayectoria','C4');% Escritura de datos
de distancias en excel
    rumbov; % grados
    xlswrite('Datos',rumbov(:,1),'Datos_trayectoria','D4');% Escritura de
datos de rumbo en excel
    Vgv; % m/s
    xlswrite('Datos',Vgv(:,1:2:2*nmiembros),' Datos_velocidadytiempo','C4');%
Escritura de datos de velocidad respecto a tierra en excel
    xlswrite('Datos',Vgv(:,2:2:2*nmiembros),' Datos_velocidadytiempo','C18');
    WFwv; % N
    xlswrite('Datos',WFwv(:,1:2:2*nmiembros),'Datos_consumo','C4') %
Escritura de datos de peso en excel
    xlswrite('Datos',WFwv(:,2:2:2*nmiembros),'Datos_consumo','C18')
    mFwv=WFwv./g; % kg
    xlswrite('Datos',mFwv(:,1:2:2*nmiembros),'Datos_consumo','C32')%
Escritura de datos de masa de combustible en excel
    xlswrite('Datos',mFwv(:,2:2:2*nmiembros),'Datos_consumo','C46')
    WFwvtotal; % N
    mFwvtotal; % kg
    dtotal=sum(dv(:,1)) % m

% GRAFICAS

%Gráfica de la masa de combustible en cada segmento
figure(1)
mFwv(:,1:2:nmiembros*2)
plot(mFwv(:,1:2:nmiembros*2), 1:9, 'bo')
grid
title('Consumo de combustible por segmento en ruta hacia el Este')
xlabel('Segmento')
ylabel('Masa de combustible consumido')
figure (2)
mFwv(:,2:2:nmiembros*2)
plot(mFwv(:,2:2:nmiembros*2),1:9, 'ko')
hold on

grid
title('Consumo de combustible por segmento en ruta hacia el Oeste')
xlabel('Segmento')
ylabel('Masa de combustible consumido')

% Gráfica de velocidad respecto a tierra por tramo
figure (3)

    Vgv(:,1:2:nmiembros*2)
    plot(Vgv(:,1:2:nmiembros*2),1:9, 'bo')
    hold on

```



```

        grid
        title('Velocidad respecto a tierra por segmento en ruta hacia el Este')
        xlabel('Segmento')
        ylabel('Velocidad respecto a tierra')

        figure(4)
Vgv(:,1:2:nmiembros*2)
        plot(Vgv(:,2:2:nmiembros*2), 1:9, 'ko')
        hold on

        grid
        title('Velocidad respecto a tierra por segmento en ruta hacia el Oeste')
        xlabel('Segmento')
        ylabel('Velocidad respecto a tierra')

% Gráfica de distancia por tramo
figure(5)
        for k=1:nmiembros
            plot(1:9, dv(:,k), 'ko')
        end
        axis([1 9 2.5e5 10e5])
        grid
        title('Distancia recorrida por segmento')
        xlabel('Segmento')
        ylabel('Distancia recorrida')

% Dibujo la trayectoria
figure (6)
[OK]=dibujar(lons,lats);
OK;

```

Subprograma para calcular la altitud a partir de la presión

```

function [h]=calcular_altitud(p)
alfat=6.5e-3; %K/m Ra=287.05; %J/(kgK) g=9.80665; % m/s^2 gammag=1.4;
global T0 p0 rho0 a0
T0=288.15; p0=1.01325e5; rho0=1.225; a0=sqrt(gammag*Ra*T0); bien =0;
h=fzero(@(x) p0*(1-(alfat*x)/T0)^(g/(Ra*alfat))-p,1000);
if h<=11000
    bien=1;
else
    T11=216.65; %K p11=0.22632e5; %Pa rho11=0.3639; %kg/m^3
    h=fzero(@(x) p11*exp(-(g*(x-11000)/(Ra*T11)))-p,11000);
    if h>11000
        bien=1;
    end
end
if bien==0
    disp ('error, altitud negativa')
end
end

```

Subprograma para calcular la distancia y el rumbo

```

%% DISTANCIA Y RUMBO %%

% DESCRIPCION
% La siguiente funcion nos permite obtener la distancia a la que se
% encuentran dos waypoints asi como el rumbo

% PARAMETROS DE ENTRADA
% long1,long2,lati1,lati2      Datos en grados

% PARAMETROS DE SALIDA
% d,rumbo                    Datos en m y en grados

function [d,rumbo]=calcula_distancia_rumbo (long1,long2,lati1,lati2)
long1=long1*pi/180;      %paso los angulos a radianes (MATLAB TRABAJA EN
RADIANTES)
long2=long2*pi/180;
lati1=lati1*pi/180;
lati2=lati2*pi/180;

Re= 6356766; %m

    if lati1==lati2
        % se mueve en un paralelo
        rumbo=90;
        d=(long1-long2)*Re*cos (lati1);

    elseif long1==long2
        % se mueve en un meridiano
        rumbo=0;
        d=abs (lati1-lati2)*Re;

    else
        rumbo= atan((long2-long1)/(log (tan (pi/4+lati2/2))-
log (tan (pi/4+lati1/2)))));

        if rumbo<0
            rumbo=rumbo+pi;
        end

        d=(Re*(lati2-lati1)/cos (rumbo));
        rumbo=rumbo*180/pi;% lo paso a grados
    end
d=abs (d);
end

```

Subprograma para calcular el consumo de combustible

```

%% CONSUMO DE COMBUSTIBLE TENIENDO EN CUENTA EL VIENTO %%

% DESCRIPCION
% La siguiente funcion nos permite obtener el peso del combustible
% consumido por la aeronave teniendo en cuenta la presencia de viento,
% entre dos waypoints de los que se sabe el peso del combustible sin
% considerar el viento.

% PARAMETROS DE ENTRADA
% Wf,M,h,wc,w,xf          Datos en kg,-,m,m/s,m/s,m

% PARAMETROS DE SALIDA
% Wfw                    Dado en kg

function [Wfw,Vg]=consumo_viento(Wf,xf,wc,w)
global g S M h rho0

%%DATOS ATMOSFERA%%
[Theta,Delta,Rho,a]=atmISA(h);

rho=rho0*Rho;

%%DATOS AVIÓN%%
V=a*M;

%%DATOS BADA%%
%CONSUMO
c1=1.1139e-5; %kg/sN
c2=0.28911;
cE=c1*(1+(c2*sqrt(Theta)*M));

%RESISTENCIA
CD0=0.021112;
CD2=0.042118;

%%CALCULO DE COEFICIENTES%%
A=cE*rho*V^2*S*CD0/2;
B=2*cE*CD2*g^2/rho/V^2/S;

Vg=sqrt(V^2-wc^2)+w;
mf=Wf/g;

C=sqrt(A*B)*xf/Vg;

mFw=((mf^2+(A/B))*tan(C))/(sqrt(A/B)-mf*tan(C));
Wfw=mFw*g;

```

Subprograma para dibujar la ruta

```
function [OK]=dibujar(lons,lats)
plot(lons(1),lats(1),'*r')
axis ([-180 180 -90 90])
hold on
for i=2:10
plot(lons(i), lats(i),'*r')
grid
    title('Trayectoria seguida por el avión')
    xlabel('longitud')
    ylabel('latitud')
end
OK=1;
end
```

Subprograma para obtener valores con el modelo de atmosfera ISA

```
%% ATMOSFERA ISA %%

% DESCRIPCION
% La siguiente funcion nos permite obtener los valores de los parámetros
% característicos de la atmósfera ISA conocida la altura de vuelo

% PARAMETROS DE ENTRADA
% h                                Dado en m

% PARAMETROS DE SALIDA
% Theta,Delta,Rho,a                Adimensionales excepto a (m/s^2)

function [Theta,Delta,Rho,a]=atmISA(h)
%unidades: k, N/m^2, kg/m^3

alfat=6.5e-3; %K/m Ra=287.05; %J/(kgK) g=9.80665; % m/s^2 gammag=1.4;
global T0 p0 rho0 a0
T0=288.15; p0=1.01325e5; rho0=1.225; a0=sqrt(gammag*Ra*T0);
if h<0
    disp ('error, altitud negativa');
elseif h<=11000

    T=T0-alfat*h;
    p=p0*(1-(alfat*h)/T0)^(g/(Ra*alfat));
    rho=rho0*(1-(alfat*h)/T0)^(g/(Ra*alfat)-1);

else
    T11=216.65; %K
    p11=0.22632e5; %Pa
    rho11=0.3639; %kg/m^3

    T=T11;
    p=p11*exp(-(g*(h-11000)/(Ra*T11)));
    rho=rho11*exp(-(g*(h-11000)/(Ra*T11)));
end
Theta=T/T0;
a=sqrt(gammag*Ra*T);
Delta=p/p0;
Rho=rho/rho0;
end
```

Subprograma para representar la dispersión del consumo

```

%% Representación de la dispersión en el consumo de combustible %%

%Vuelo hacia el este
x2=linspace(24465 ,24538.38,40);

for i=1:40

if 24475<= x2(i) && x2(i) <= 24528.38

    y2(i)=0.018733622;

else
    y2(i)=0;
end
end
figure(1)
plot (x2,y2,'r')
axis([2.44e4 2.46e4 0 0.02])
grid
title('Vuelo hacia el Este')
xlabel('mF (kg)')
ylabel('1/(mFmax-mFmin)')

%Vuelo hacia el Oeste
z2=linspace(33295.11,33459.69,40);

for i=1:40

if 33305.11<= z2(i) && z2(i) <= 33449.69

    w2(i)=0.006916413;

else
    w2(i)=0;
end
end
figure (2)
plot (z2,w2,'b')
axis([3.328e4 3.348e4 0 0.02])
grid
title('Vuelo hacia el Oeste')
xlabel('mF (kg)')
ylabel('1/(mFmax-mFmin)')

```

Subprograma para representar la dispersión del tiempo

```

%% Representación de la dispersión en el tiempo %%

%Vuelo hacia el este
x3=linspace(23631,23700.3,40);

for i=1:40

if 23641.83<= x3(i) && x3(i) <= 23690.24

    y3(i)=0.020657201;

else
    y3(i)=0;
end
end
figure(1)
plot (x3,y3,'r')
axis([2.357e4 2.377e4 0 0.03])
grid
title('Vuelo hacia el Este')
xlabel('t(s)')
ylabel('1/(tmax-tmin)')

%Vuelo hacia el Oeste
z3=linspace(31458,31603,40);

for i=1:40

if 31468.42<= z3(i) && z3(i) <= 31593.57

    w3(i)=0.007990632;

else
    w3(i)=0;
end
end
figure (2)
plot (z3,w3,'b')
axis([3.143e4 3.163e4 0 0.03])
grid
title('Vuelo hacia el Oeste')
xlabel('t (s)')
ylabel('1/(tmax-tmin)')

```

Subprograma para representar las curvas mF- Vg

```
%% Representacion del consumo frente a la velocidad respecto a tierra ultimo
segmento%%
```

```
clear all; close all; clc
%DATOS COMUNES%
```

```
%%DATOS ATMOSFERA%%
```

```
alfat=6.5e-3; %K/m
Ra=287.05; %J/(kgK)
g=9.80665; % m/s^2
gammag=1.4;
M=0.8;
S=283.3; % m^2
g=9.80665; % m/s^2
```

```
T0=288.15;
p0=1.01325e5;
rho0=1.225;
a0=sqrt(gammag*Ra*T0);
```

```
%%DATOS DE VUELO%%
```

```
p=20000; % Pa Presión a la que se han caculado los valores del viento
[h]=calcular_altura(p); % ft Calcula la altura a la que se da dicha presion
con el modelo atm ISA
[Theta,Delta,Rho,a]=atmISA(h);
rho=rho0*Rho;
V=M*a;
```

```
%%DATOS BADA%%
```

```
%CONSUMO
c1=1.1139e-5; %kg/sN
c2=0.28911;
cE=c1*(1+(c2*sqrt(Theta)*M));
```

```
%RESISTENCIA
```

```
CD0=0.021112;
CD2=0.042118;
```

```
%%CALCULO DE COEFICIENTES%%
```

```
A=cE*rho*V^2*S*CD0/2;
B=2*cE*CD2*g^2/rho/V^2/S;
```

```
%ULTIMO TRAMO, VUELO HACIA EL ESTE
```

```
xf=551999.43;
mf=110000;
for i=1:110
Vg(i)=50+3*i;
C(i)=sqrt(A*B)*xf/Vg(i);
mFwe(i)=(mf^2+(A/B))*tan(C(i))/(sqrt(A/B)-mf*tan(C(i)));
end
```

```
%ULTIMO TRAMO VUELO HACIA EL OESTE
```

```
mf=110000;
xfo=349151.44;
for i=1:110
Vgo(i)=50+3*i;
Co(i)=sqrt(A*B)*xfo/Vgo(i);
```

```

mFwo(i)=(mf^2+(A/B))*tan(Co(i))/(sqrt(A/B)-mf*tan(Co(i)));
end

%OBTENCIÓN DE DATOS DE EXCEL
[Vgex1e]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C12:AK12');
[mFwex1e]=xlsread('Datos','Datos_consumo','C40:AK40');
[Vgex1o]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C18:AK18');
[mFwex1o]=xlsread('Datos','Datos_consumo','C46:AK46');

%REPRESENTACIÓN EN UNA MISMA GRÁFICA
figure(1)
plot(Vg,mFwe,'k') %Curva teórica,E
hold on
plot(Vgex1e,mFwex1e,'ro') %Datos de excel,E
axis([50 400 0 1.8e4])
grid
title('Curva teórica mF-Vg último segmento')
xlabel('Vg (m/s)')
ylabel('mF (kg)')
legend('Curva Este','Valores obtenidos')

figure(2)
plot(Vgo,mFwo,'b') %Curva teórica,O
hold on
plot(Vgex1o,mFwex1o,'ro') %Datos de excel,O

%Presentación de la gráfica
axis([50 400 0 1.8e4])
grid
title('Curva teórica mF-Vg último segmento')
xlabel('Vg (m/s)')
ylabel('mF (kg)')
legend('Curva Oeste','Valores obtenidos')

figure(3)
plot(Vg,mFwe,'k') %Curva teórica,E
hold on
plot(Vgex1e,mFwex1e,'ro') %Datos de excel,E
hold on
plot(Vgo,mFwo,'b') %Curva teórica,O
hold on
plot(Vgex1o,mFwex1o,'ro') %Datos de excel,O

%Presentación de la gráfica
axis([50 400 0 1.8e4])
grid
title('Curva teórica mF-Vg último segmento')
xlabel('Vg (m/s)')
ylabel('mF (kg)')
legend('Curva Este','Valores obtenidos','Curva Oeste','Valores
obtenidos')

```


Subprograma para representar las curvas teóricas t- Vg

```

%% Representación del tiempo frente a la velocidad para cada segmento

% DESCRIPCION
% La siguiente función nos permite obtener la gráfica teórica del consumo
% de combustible frente a la velocidad respecto a tierra para los distintos
% segmentos

close all, clear all, clc

% Cálculo de las curvas teóricas para cada segmento
for i=1:110
    Vg(i)=50+3*i; % valores de Vg (m/s)
    t1(i)=349151.44/Vg(i); % s
    t2(i)=912765.03/Vg(i); % s
    t3(i)=788396.38/Vg(i); % s
    t4(i)=743445.60/Vg(i); % s
    t5(i)=727874.51/Vg(i); % s
    t6(i)=727874.51/Vg(i); % s
    t7(i)=743445.60/Vg(i); % s
    t8(i)=788396.38/Vg(i); % s
    t9(i)=551999.43/Vg(i); % s
end

% Tomamos los datos calculados por nuestro programa
[Vgex1e]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C4:AK4');
[te1e]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C33:AK33');
[Vgex1o]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C18:AK18');
[te1o]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C48:AK48');

[Vgex2e]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C5:AK5');
[te2e]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C34:AK34');
[Vgex2o]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C19:AK19');
[te2o]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C49:AK49');

[Vgex3e]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C6:AK6');
[te3e]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C35:AK35');
[Vgex3o]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C20:AK20');
[te3o]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C50:AK50');

[Vgex4e]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C7:AK7');
[te4e]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C36:AK36');
[Vgex4o]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C21:AK21');
[te4o]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C51:AK51');

[Vgex5e]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C8:AK8');
[te5e]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C37:AK37');
[Vgex5o]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C22:AK22');
[te5o]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C52:AK52');

[Vgex6e]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C9:AK9');
[te6e]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C38:AK38');
[Vgex6o]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C23:AK23');
[te6o]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C53:AK53');

[Vgex7e]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C10:AK10');

```

```

[te7e]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C39:AK39');
[Vgex7o]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C24:AK24');
[te7o]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C54:AK54');

[Vgex8e]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C11:AK11');
[te8e]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C40:AK40');
[Vgex8o]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C25:AK25');
[te8o]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C55:AK55');

[Vgex9e]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C12:AK12');
[te9e]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C41:AK41');
[Vgex9o]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C26:AK26');
[te9o]=xlsread('Datos',' Datos_velocidadytiempo','C56:AK56');

%Representación de la curva teórica y nuestros puntos
figure(1)
plot(Vg,t1,'k')
hold on
plot(Vgex1e,te1e,'bo')
hold on
plot(Vgex1o,te1o,'ro')
axis([50 400 0 10000])

    title('Curva t-Vg tramo 1')
    xlabel('Vg (m/s)')
    ylabel('t(s)')
    grid
    legend('Curva t-Vg', 'Valores obtenidos Este','Valores obtenidos Oeste')

figure(2)
plot(Vg,t2,'k')
hold on
plot(Vgex2e,te2e,'bo')
hold on
plot(Vgex2o,te2o,'ro')
axis([50 400 0 10000])
    title('Curva t-Vg tramo 2')
    xlabel('Vg (m/s)')
    ylabel('t(s)')
    grid
    legend('Curva t-Vg', 'Valores obtenidos Este','Valores obtenidos Oeste')

figure(3)
plot(Vg,t3,'k')
hold on
plot(Vgex3e,te3e,'bo')
hold on
plot(Vgex3o,te3o,'ro')
axis([50 400 0 10000])
    title('Curva t-Vg tramo 3')
    xlabel('Vg (m/s)')
    ylabel('t(s)')
    grid
    legend('Curva t-Vg', 'Valores obtenidos Este','Valores obtenidos Oeste')

figure(4)
plot(Vg,t4,'k')
hold on
plot(Vgex4e,te4e,'bo')
hold on
plot(Vgex4o,te4o,'ro')

```

```
axis([50 400 0 10000])
    title('Curva t-Vg tramo 4')
    xlabel('Vg (m/s)')
    ylabel('t(s)')
    grid
    legend('Curva t-Vg ', 'Valores obtenidos Este', 'Valores obtenidos Oeste')

figure(5)
plot(Vg,t5,'k')
hold on
plot(Vgex5e,tex5e,'bo')
hold on
plot(Vgex5o,tex5o,'ro')
axis([50 400 0 10000])
    title('Curva teórica t-Vg tramo 5')
    xlabel('Vg (m/s)')
    ylabel('t(s)')
    grid
    legend('Curva t-Vg', 'Valores obtenidos Este', 'Valores obtenidos Oeste')

figure(6)
plot(Vg,t6,'k')
hold on
plot(Vgex6e,tex6e,'bo')
hold on
plot(Vgex6o,tex6o,'ro')
axis([50 400 0 10000])
    title('Curva t-Vg tramo 6')
    xlabel('Vg (m/s)')
    ylabel('t(s)')
    grid
    legend('Curva t-Vg', 'Valores obtenidos Este', 'Valores obtenidos Oeste')

figure(7)
plot(Vg,t7,'k')
hold on
plot(Vgex7e,tex7e,'bo')
hold on
plot(Vgex7o,tex7o,'ro')
axis([50 400 0 10000])
    title('Curva t-Vg tramo 7')
    xlabel('Vg (m/s)')
    ylabel('t(s)')
    grid
    legend('Curva t-Vg', 'Valores obtenidos Este', 'Valores obtenidos Oeste')

figure(8)
plot(Vg,t8,'k')
hold on
plot(Vgex8e,tex8e,'bo')
hold on
plot(Vgex8o,tex8o,'ro')
    title('Curva t-Vg tramo 8')
    xlabel('Vg (m/s)')
    ylabel('t(s)')
    grid
    legend('Curva t-Vg', 'Valores obtenidos Este', 'Valores obtenidos Oeste')

figure(9)
plot(Vg,t9,'k')
hold on
```

```

plot(Vgex9e,tex9e,'bo')
hold on
plot(Vgex9o,tex9o,'ro')
axis([50 400 0 10000])

    title('Curva t-Vg tramo 9')
    xlabel('Vg (m/s)')
    ylabel('t(s)')
    grid
    legend('Curva t-Vg', 'Valores obtenidos Este', 'Valores obtenidos Oeste')
%Representación de las curvas teoricas de todos los segmentos para
%comparar
figure(10)
plot(Vg,t1,'Color',[0.07,0.21,0.14])
hold on
plot(Vg,t2,'Color',[0.04,0.52,0.78])
hold on
plot(Vg,t3,'k')
hold on
plot(Vg,t4,'b')
hold on
plot(Vg,t5,'g')
hold on
plot(Vg,t6,'r')
hold on
plot(Vg,t7,'y')
hold on
plot(Vg,t8,'c')
hold on
plot(Vg,t9,'m')
axis([50 400 0 10000])
    grid
    title('Curvas t-Vg')
    xlabel('Vg (m/s)')
    ylabel('t(s)')
    legend('segmento 1','segmento 2','segmento 3','segmento 4','segmento
5','segmento 6','segmento 7','segmento 8','segmento 9')

```

Anexo B: Datos de viento y velocidad respecto a tierra

En el presente anexo se presentan los datos de los vientos medios para cada uno de los segmentos de los distintos miembros que forman el “ensemble”, así como de la velocidad respecto a tierra calculada a partir de estos vientos según la expresión (2.18). En concreto, a continuación se presentan los datos de los miembros 2 al 35 dado que el primero se presentó como ejemplo en el apartado 3 de la presente memoria.

Cabe mencionar que los datos presentados a continuación son los del caso de recorrer la ruta hacia el Este.

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	49,24	56,51	45,78	47,61	41,93	25,45	15,59	4,29	8,22
Viento cruzado (m/s)	-20,51	0,25	5,38	19,37	15,98	10,29	-15,85	-14,92	1,62
Vg (m/s)	284,40	284,40	284,40	284,40	284,40	284,40	284,40	284,40	284,40

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	49,27	54,82	45,57	47,03	42,31	26,60	16,88	5,59	9,79
Viento cruzado (m/s)	-21,16	0,69	5,28	18,75	15,94	9,90	-16,88	-14,18	1,17
Vg (m/s)	284,37	284,37	284,37	284,37	284,37	284,37	284,37	284,37	284,37

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	50,66	56,49	46,95	47,54	43,06	25,85	15,49	4,19	6,22
Viento cruzado (m/s)	-19,57	-0,85	5,87	18,42	16,11	10,34	-16,42	-15,67	1,64
Vg (m/s)	285,90	285,90	285,90	285,90	285,90	285,90	285,90	285,90	285,90

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	48,71	55,99	47,04	46,86	41,97	26,33	15,04	5,30	7,88
Viento cruzado (m/s)	-20,40	-1,04	6,51	18,60	15,65	10,03	-18,01	-15,69	1,73
Vg (m/s)	283,88	283,88	283,88	283,88	283,88	283,88	283,88	283,88	283,88

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	51,22	55,32	45,47	47,71	43,41	26,12	17,33	4,49	8,12
Viento cruzado (m/s)	-20,32	0,88	4,64	18,58	16,39	10,21	-15,29	-14,16	1,09
Vg (m/s)	286,40	286,40	286,40	286,40	286,40	286,40	286,40	286,40	286,40

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	49,64	55,86	46,57	47,36	42,42	26,10	15,91	4,95	8,27
Viento cruzado (m/s)	-18,59	-1,06	5,44	17,84	16,34	10,33	-16,26	-14,33	1,36
Vg (m/s)	284,96	284,96	284,96	284,96	284,96	284,96	284,96	284,96	284,96

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	50,29	55,45	45,95	47,21	42,96	26,35	16,46	4,82	7,75
Viento cruzado (m/s)	-22,13	0,89	5,72	19,32	15,72	9,91	-17,04	-15,52	1,47
Vg (m/s)	285,31	285,31	285,31	285,31	285,31	285,31	285,31	285,31	285,31

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	48,79	56,48	45,99	47,19	43,50	26,46	16,57	4,75	8,67
Viento cruzado (m/s)	-20,77	-0,32	5,10	18,14	16,13	9,95	-16,38	-15,05	1,45
Vg (m/s)	283,92	283,92	283,92	283,92	283,92	283,92	283,92	283,92	283,92

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	51,15	54,83	46,52	47,37	41,87	25,99	15,79	5,02	7,35
Viento cruzado (m/s)	-19,94	0,17	6,06	19,05	15,93	10,29	-16,93	-14,80	1,37
Vg (m/s)	286,37	286,37	286,37	286,37	286,37	286,37	286,37	286,37	286,37

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	50,64	55,08	47,42	47,91	42,18	26,63	16,52	4,79	7,69
Viento cruzado (m/s)	-19,42	0,07	4,96	19,46	15,37	9,62	-17,08	-15,26	2,84
Vg (m/s)	285,89	285,89	285,89	285,89	285,89	285,89	285,89	285,89	285,89

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	49,29	56,23	45,09	46,66	43,20	25,83	15,84	4,99	8,32
Viento cruzado (m/s)	-21,29	-0,23	6,19	17,71	16,69	10,61	-16,22	-14,60	0,00
Vg (m/s)	284,38	284,38	284,38	284,38	284,38	284,38	284,38	284,38	284,38

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	50,09	55,62	44,85	46,47	42,23	25,80	16,97	5,21	7,40
Viento cruzado (m/s)	-20,23	-0,44	6,83	17,91	16,56	9,55	-15,92	-15,71	1,40
Vg (m/s)	285,28	285,28	285,28	285,28	285,28	285,28	285,28	285,28	285,28

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	49,84	55,69	47,66	48,10	43,15	26,65	15,40	4,57	8,60
Viento cruzado (m/s)	-20,48	0,28	4,33	19,27	15,50	10,69	-17,37	-14,15	1,42
Vg (m/s)	285,00	285,00	285,00	285,00	285,00	285,00	285,00	285,00	285,00

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	49,89	54,57	46,01	48,08	43,83	25,70	15,94	5,28	7,84
Viento cruzado (m/s)	-20,66	0,42	5,24	19,34	16,94	9,82	-17,80	-16,53	1,65
Vg (m/s)	285,04	285,04	285,04	285,04	285,04	285,04	285,04	285,04	285,04

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	50,05	56,74	46,50	46,48	41,54	26,76	16,42	4,50	8,18
Viento cruzado (m/s)	-20,06	-0,57	5,91	17,82	15,11	10,42	-15,49	-13,32	1,17
Vg (m/s)	285,25	285,25	285,25	285,25	285,25	285,25	285,25	285,25	285,25

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	51,15	56,73	45,77	48,10	42,96	25,36	16,01	3,76	7,62
Viento cruzado (m/s)	-20,05	0,74	6,50	19,15	17,07	10,17	-16,27	-15,44	0,72
Vg (m/s)	286,36	286,36	286,36	286,36	286,36	286,36	286,36	286,36	286,36

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	48,78	54,58	46,74	46,47	42,41	27,09	16,36	6,03	8,40
Viento cruzado (m/s)	-20,05	0,74	6,50	19,15	17,07	10,17	-16,27	-15,44	0,72
Vg (m/s)	283,99	283,99	283,99	283,99	283,99	283,99	283,99	283,99	283,99

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	50,05	56,68	46,20	47,88	42,49	25,27	15,03	4,94	8,45
Viento cruzado (m/s)	-20,38	-0,87	5,64	17,95	16,06	9,75	-16,29	-16,19	0,81
Vg (m/s)	285,22	285,22	285,22	285,22	285,22	285,22	285,22	285,22	285,22

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	49,89	54,62	46,31	46,68	42,89	27,18	17,33	4,84	7,57
Viento cruzado (m/s)	-20,33	0,70	5,52	19,22	16,00	10,48	-17,01	-13,66	2,01
Vg (m/s)	285,07	285,07	285,07	285,07	285,07	285,07	285,07	285,07	285,07

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	49,11	53,87	45,95	47,48	43,53	27,38	15,73	4,33	8,18
Viento cruzado (m/s)	-19,04	0,40	5,41	18,58	16,05	10,35	-16,60	-14,34	3,02
Vg (m/s)	284,40	284,40	284,40	284,40	284,40	284,40	284,40	284,40	284,40

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	50,83	57,43	46,56	47,08	41,85	25,07	16,63	5,46	7,82
Viento cruzado (m/s)	-21,68	-0,56	5,76	18,59	16,01	9,89	-16,69	-15,51	-0,20
Vg (m/s)	285,88	285,88	285,88	285,88	285,88	285,88	285,88	285,88	285,88

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	51,51	55,75	45,54	46,50	42,45	26,22	16,29	4,65	7,55
Viento cruzado (m/s)	-20,72	-0,21	4,02	18,32	15,93	10,49	-16,74	-14,83	0,41
Vg (m/s)	286,66	286,66	286,66	286,66	286,66	286,66	286,66	286,66	286,66

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	48,43	55,56	46,97	48,07	42,94	26,23	16,08	5,13	8,45
Viento cruzado (m/s)	-19,99	0,05	7,13	18,85	16,12	9,75	-16,57	-15,03	2,42
Vg (m/s)	283,64	283,64	283,64	283,64	283,64	283,64	283,64	283,64	283,64

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	51,35	56,48	48,44	47,35	43,00	26,03	15,75	4,34	6,66
Viento cruzado (m/s)	-22,06	-0,84	4,43	18,98	15,97	11,05	-16,79	-14,94	1,72
Vg (m/s)	286,37	286,37	286,37	286,37	286,37	286,37	286,37	286,37	286,37

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	48,58	54,84	44,06	47,21	42,37	26,43	16,62	5,45	9,35
Viento cruzado (m/s)	-18,68	0,68	6,74	18,21	16,09	9,19	-16,52	-14,91	1,11
Vg (m/s)	283,89	283,89	283,89	283,89	283,89	283,89	283,89	283,89	283,89

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	49,24	55,76	45,85	47,10	43,46	26,50	16,05	4,71	7,58
Viento cruzado (m/s)	-18,56	0,44	5,99	18,69	15,70	9,99	-16,98	-14,80	0,92
Vg (m/s)	284,56	284,56	284,56	284,56	284,56	284,56	284,56	284,56	284,56

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	50,71	55,54	46,66	47,47	41,91	25,96	16,32	5,07	8,44
Viento cruzado (m/s)	-22,17	-0,61	5,17	18,50	16,35	10,25	-16,32	-15,06	1,91
Vg (m/s)	285,72	285,72	285,72	285,72	285,72	285,72	285,72	285,72	285,72

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	51,40	56,08	47,00	47,27	42,03	26,62	16,07	4,31	7,49
Viento cruzado (m/s)	-19,01	0,84	6,24	18,56	15,66	10,63	-16,33	-14,22	0,28
Vg (m/s)	286,69	286,69	286,69	286,69	286,69	286,69	286,69	286,69	286,69

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	48,53	55,24	45,52	47,29	43,34	25,83	16,30	5,47	8,52
Viento cruzado (m/s)	-21,70	-1,00	4,92	18,61	16,39	9,61	-16,98	-15,64	2,54
Vg (m/s)	283,59	283,59	283,59	283,59	283,59	283,59	283,59	283,59	283,59

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	50,15	56,17	45,92	46,42	41,86	26,06	16,01	5,73	8,78
Viento cruzado (m/s)	-20,39	-1,02	6,14	18,76	16,64	10,30	-15,92	-14,57	1,95
Vg (m/s)	285,32	285,32	285,32	285,32	285,32	285,32	285,32	285,32	285,32

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	49,77	55,14	46,60	48,14	43,51	26,40	16,36	4,05	7,24
Viento cruzado (m/s)	-20,34	0,85	5,02	18,41	15,42	9,93	-17,38	-15,28	0,87
Vg (m/s)	284,95	284,95	284,95	284,95	284,95	284,95	284,95	284,95	284,95

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	49,25	56,90	45,65	47,32	42,38	26,19	16,18	4,85	8,43
Viento cruzado (m/s)	-20,82	-0,68	5,95	18,67	16,42	9,67	-15,68	-15,02	0,70
Vg (m/s)	284,38	284,38	284,38	284,38	284,38	284,38	284,38	284,38	284,38

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	50,68	54,40	46,87	47,25	43,00	26,27	16,19	4,92	7,59
Viento cruzado (m/s)	-19,91	0,52	5,21	18,51	15,64	10,56	-17,63	-14,84	2,12
Vg (m/s)	285,89	285,89	285,89	285,89	285,89	285,89	285,89	285,89	285,89

Segmento	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Viento longitudinal (m/s)	49,97	55,66	46,25	47,28	42,69	26,23	16,18	4,89	8,00
Viento cruzado (m/s)	-20,37	-0,08	5,58	18,59	16,03	10,12	-16,65	-14,92	1,41
Vg (m/s)	285,14	285,14	285,14	285,14	285,14	285,14	285,14	285,14	285,14

Anexo C: Datos del consumo de combustible.

A continuación se presentan los datos del consumo de combustible obtenidos tras ejecutar el programa, tanto en la ruta hacia el Este como hacia el Oeste.

mF (kg)								
SEGMENTOS	ESTE1	ESTE2	ESTE3	ESTE4	ESTE5	ESTE6	ESTE7	ESTE8
1	1341,82	1349,19	1349,03	1342,03	1351,55	1339,50	1346,33	1344,74
2	3405,67	3386,84	3405,62	3387,01	3392,57	3399,95	3393,85	3398,73
3	2977,05	2987,90	2989,18	2975,75	2974,72	2990,31	2979,17	2985,74
4	2770,24	2765,69	2770,00	2765,82	2772,38	2763,45	2766,68	2769,14
5	2707,19	2722,61	2717,98	2711,85	2721,90	2707,94	2717,79	2712,03
6	2833,28	2850,88	2837,42	2846,85	2841,04	2843,16	2843,58	2840,63
7	2973,00	2986,04	2971,02	2988,10	2994,43	2964,97	2982,42	2976,66
8	3248,12	3264,45	3245,83	3266,77	3251,41	3261,03	3254,86	3257,71
9	2218,63	2214,78	2200,46	2233,17	2217,82	2215,65	2214,28	2219,06
TOTAL	24475,00	24528,38	24486,54	24517,36	24517,82	24485,96	24498,95	24504,43

SEGMENTOS	ESTE9	ESTE10	ESTE11	ESTE12	ESTE13	ESTE14	ESTE15	ESTE16
1	1351,09	1339,92	1341,87	1349,20	1345,03	1345,99	1346,03	1344,96
2	3386,25	3406,29	3402,71	3389,81	3397,07	3395,46	3408,88	3383,67
3	2984,84	2980,14	2969,93	2995,19	2997,97	2967,24	2984,85	2980,12
4	2768,16	2767,72	2762,42	2773,37	2775,48	2760,37	2760,62	2775,30
5	2706,86	2723,04	2719,43	2710,36	2719,71	2710,11	2704,45	2725,48
6	2839,36	2844,84	2837,50	2846,61	2846,35	2837,85	2847,77	2836,44
7	2974,62	2984,57	2975,96	2983,20	2969,64	2989,50	2983,40	2975,81
8	3258,10	3254,43	3257,99	3254,55	3252,73	3259,85	3252,47	3260,21
9	2210,61	2222,73	2219,65	2213,81	2222,24	2211,23	2218,22	2215,09
TOTAL	24479,90	24523,68	24487,44	24516,11	24526,21	24477,61	24506,69	24497,10

SEGMENTOS	ESTE17	ESTE18	ESTE19	ESTE20	ESTE21	ESTE22	ESTE23	ESTE24
1	1339,88	1350,90	1345,17	1345,82	1349,11	1341,92	1338,52	1352,50
2	3384,17	3408,50	3384,52	3408,09	3417,22	3375,62	3395,49	3396,88
3	2988,28	2977,24	2983,29	2981,65	2985,53	2979,47	2990,02	2975,13
4	2760,77	2776,02	2761,82	2774,10	2765,79	2770,07	2775,60	2760,23
5	2713,36	2717,95	2717,17	2712,59	2706,63	2723,21	2717,31	2712,44
6	2851,91	2832,38	2852,50	2831,73	2829,85	2854,48	2842,40	2841,80
7	2981,64	2976,84	2992,99	2966,30	2985,00	2974,16	2978,44	2980,63
8	3272,30	3241,19	3256,60	3255,96	3263,40	3249,05	3259,45	3253,05
9	2220,15	2213,07	2212,65	2220,70	2215,21	2218,32	2220,79	2212,68
TOTAL	24512,46	24494,10	24506,72	24496,92	24517,73	24486,30	24518,02	24485,34

SEGMENTOS	ESTE25	ESTE26	ESTE27	ESTE28	ESTE29	ESTE30	ESTE31	ESTE32
1	1339,65	1351,49	1348,25	1342,76	1338,25	1352,87	1344,63	1346,42
2	3386,59	3405,78	3395,07	3397,48	3391,39	3401,03	3390,29	3402,24
3	2959,50	3005,93	2986,90	2978,11	2975,05	2989,95	2986,26	2978,71
4	2767,90	2767,98	2769,80	2766,08	2768,20	2767,60	2776,46	2759,49
5	2712,19	2717,62	2707,17	2722,73	2721,25	2708,60	2723,21	2706,62
6	2845,11	2839,15	2839,21	2844,93	2838,23	2845,97	2843,79	2840,38
7	2985,13	2973,99	2981,57	2977,62	2980,84	2978,32	2980,75	2978,43
8	3263,95	3248,40	3258,61	3253,82	3263,65	3248,93	3244,43	3268,12
9	2229,08	2204,47	2220,60	2212,74	2221,39	2212,07	2209,69	2223,72
TOTAL	24489,11	24514,81	24507,19	24496,27	24498,26	24505,34	24499,50	24504,13

SEGMENTOS	ESTE33	ESTE34	ESTE35
1	1349,03	1342,02	1345,48
2	3381,81	3410,90	3396,22
3	2989,06	2975,85	2982,49
4	2767,64	2768,17	2767,91
5	2718,13	2711,67	2714,90
6	2842,21	2841,93	2842,05
7	2978,78	2980,38	2979,58
8	3256,80	3255,81	3256,25
9	2212,82	2220,53	2216,71
TOTAL	24496,28	24507,26	24501,59

mF (kg)								
SEGMENTOS	OESTE1	OESTE2	OESTE3	OESTE4	OESTE5	OESTE6	OESTE7	OESTE8
1	1853,19	1838,78	1839,65	1852,24	1833,51	1858,55	1841,21	1850,82
2	5014,36	5062,10	5014,38	5061,92	5047,35	5029,01	5043,80	5032,35
3	4244,01	4223,11	4217,32	4249,94	4251,77	4215,51	4240,48	4226,66
4	4104,41	4122,22	4107,14	4119,62	4104,29	4122,51	4113,84	4112,96
5	4025,00	3993,64	4000,15	4018,28	3993,73	4024,85	4004,14	4014,32
6	3776,67	3748,59	3767,89	3757,03	3764,19	3760,81	3760,41	3764,57
7	3757,50	3734,36	3757,03	3734,59	3727,64	3764,10	3740,62	3750,96
8	3862,21	3840,85	3861,67	3841,48	3858,69	3844,58	3851,88	3851,15
9	2773,95	2778,09	2797,61	2754,79	2774,28	2777,67	2779,21	2772,92
TOTAL	33411,31	33341,75	33362,84	33389,89	33355,45	33397,59	33375,59	33376,71

SEGMENTOS	OESTE9	OESTE10	OESTE11	OESTE12	OESTE13	OESTE14	OESTE15	OESTE16
1	1834,56	1857,55	1851,92	1839,97	1847,09	1844,75	1845,41	1846,50
2	5061,28	5015,10	5022,01	5054,22	5037,16	5038,92	5007,59	5069,05
3	4227,62	4239,42	4259,37	4207,89	4202,86	4264,69	4227,15	4239,91
4	4110,71	4115,93	4129,22	4097,87	4093,59	4133,43	4131,62	4095,21
5	4026,52	3991,95	3998,30	4020,35	3999,37	4019,17	4034,30	3984,50
6	3766,97	3758,03	3769,82	3755,41	3753,24	3771,87	3752,81	3772,27
7	3752,64	3738,79	3752,67	3738,83	3757,11	3734,58	3742,98	3748,57
8	3850,03	3852,98	3850,88	3852,18	3856,52	3846,57	3859,73	3843,52
9	2784,70	2767,51	2772,88	2779,31	2767,83	2784,20	2774,04	2778,13
TOTAL	33415,04	33337,27	33407,07	33346,03	33314,77	33438,18	33375,63	33377,67

SEGMENTOS	OESTE17	OESTE18	OESTE19	OESTE20	OESTE21	OESTE22	OESTE23	OESTE24
1	1857,65	1833,92	1846,75	1845,14	1836,35	1855,78	1861,90	1830,37
2	5069,01	5007,53	5067,41	5009,14	4987,80	5089,18	5041,30	5035,13
3	4223,97	4244,14	4233,01	4234,04	4225,23	4241,78	4217,16	4250,11
4	4133,14	4095,73	4126,23	4100,47	4116,38	4110,30	4095,65	4131,28
5	4017,64	4003,86	4005,92	4012,64	4025,69	3992,94	4003,70	4014,90
6	3748,11	3777,22	3745,80	3779,43	3782,69	3742,50	3762,31	3762,71
7	3743,14	3747,55	3725,99	3765,64	3737,34	3754,14	3747,32	3744,27
8	3833,96	3870,56	3853,88	3849,33	3840,72	3862,56	3847,06	3856,05
9	2771,71	2780,54	2781,47	2770,71	2777,68	2774,47	2770,10	2782,00
TOTAL	33398,32	33361,06	33386,46	33366,54	33329,88	33423,66	33346,49	33406,81

SEGMENTOS	OESTE25	OESTE26	OESTE27	OESTE28	OESTE29	OESTE30	OESTE31	OESTE32
1	1861,47	1830,77	1837,23	1855,03	1859,25	1832,89	1847,83	1843,98
2	5062,08	5014,85	5040,85	5035,20	5050,58	5026,02	5052,84	5023,55
3	4283,71	4184,49	4224,47	4242,51	4251,16	4216,06	4226,52	4240,57
4	4117,46	4109,22	4109,07	4117,55	4114,02	4112,76	4094,92	4131,80
5	4017,65	4000,85	4024,70	3993,75	3995,86	4022,66	3992,71	4026,00
6	3761,63	3763,45	3767,22	3757,89	3770,67	3754,43	3759,06	3765,98
7	3740,47	3751,10	3743,79	3747,58	3744,13	3747,33	3741,31	3750,18
8	3844,29	3859,08	3848,39	3854,76	3841,81	3861,33	3864,66	3838,55
9	2760,93	2791,30	2770,68	2781,50	2770,05	2782,09	2785,28	2766,89
TOTAL	33449,69	33305,11	33366,40	33385,77	33397,53	33355,57	33365,13	33387,49

SEGMENTOS	OESTE33	OESTE34	OESTE35
1	1839,20	1852,70	1845,99
2	5073,34	5003,14	5038,12
3	4220,63	4246,66	4233,47
4	4114,55	4112,21	4113,36
5	4003,69	4014,83	4009,22
6	3761,75	3763,37	3762,57
7	3744,69	3746,87	3745,70
8	3851,15	3851,78	3851,52
9	2781,29	2770,89	2776,00
TOTAL	33390,27	33362,45	33375,96

Anexo D: Datos del tiempo de vuelo

A continuación se presentan los datos del tiempo de vuelo obtenidos tras ejecutar el programa, tanto en la ruta hacia el Este como hacia el Oeste.

t (s)								
SEGMENTOS	ESTE1	ESTE2	ESTE3	ESTE4	ESTE5	ESTE6	ESTE7	ESTE8
1	1221,30	1227,69	1227,69	1221,22	1229,91	1219,11	1225,26	1223,77
2	3138,17	3119,92	3119,92	3120,14	3125,45	3132,63	3126,86	3131,29
3	2788,65	2797,95	2797,95	2786,56	2785,79	2800,89	2790,20	2796,37
4	2633,29	2628,20	2628,20	2628,22	2634,68	2626,71	2629,49	2631,90
5	2609,30	2623,49	2623,49	2612,95	2622,96	2609,87	2619,15	2613,65
6	2769,09	2785,81	2785,81	2781,59	2776,29	2778,65	2778,92	2776,03
7	2947,91	2960,57	2960,57	2962,29	2968,97	2939,86	2957,15	2951,37
8	3270,39	3286,77	3286,77	3288,79	3273,69	3283,33	3277,19	3279,96
9	2263,74	2259,84	2259,84	2278,50	2262,93	2260,73	2259,33	2264,18
TOTAL (min)	394,03	394,84	394,84	394,67	394,68	394,20	394,39	394,48

SEGMENTOS	ESTE9	ESTE10	ESTE11	ESTE12	ESTE13	ESTE14	ESTE15	ESTE16
1	1229,73	1219,25	1221,26	1227,77	1223,90	1225,09	1224,94	1224,03
2	3120,19	3137,92	3135,21	3122,88	3129,39	3128,70	3140,70	3117,41
3	2795,79	2790,85	2781,70	2805,06	2807,58	2779,27	2795,66	2790,96
4	2631,20	2630,25	2625,50	2635,86	2637,82	2623,59	2623,86	2637,62
5	2608,86	2624,03	2620,78	2612,00	2621,05	2611,76	2606,30	2626,62
6	2774,94	2780,00	2773,00	2781,86	2781,71	2773,24	2782,95	2772,00
7	2949,48	2959,15	2950,67	2957,93	2944,48	2964,09	2958,09	2950,56
8	3280,49	3276,63	3280,23	3276,90	3274,94	3282,22	3274,74	3282,53
9	2255,60	2267,90	2264,78	2258,85	2267,41	2256,24	2263,33	2260,16
TOTAL (min)	394,10	394,77	394,22	394,65	394,80	394,07	394,51	394,36

SEGMENTOS	ESTE17	ESTE18	ESTE19	ESTE20	ESTE21	ESTE22	ESTE23	ESTE24
1	1219,29	1229,47	1224,15	1224,81	1227,69	1221,31	1218,01	1230,99
2	3117,54	3140,64	3118,04	3140,12	3148,32	3110,06	3127,96	3130,00
3	2798,38	2788,73	2793,83	2792,77	2796,30	2790,34	2800,08	2786,72
4	2623,55	2638,73	2624,65	2636,83	2628,82	2632,60	2637,83	2623,56
5	2614,51	2619,73	2618,31	2614,44	2608,50	2624,33	2618,61	2614,13
6	2786,69	2768,34	2787,43	2767,54	2765,43	2789,64	2777,68	2777,26
7	2956,05	2951,88	2967,56	2941,17	2959,55	2949,05	2953,07	2955,44
8	3294,52	3263,56	3278,96	3278,19	3285,71	3271,32	3281,67	3275,41
9	2265,29	2258,10	2257,68	2265,84	2260,28	2263,43	2265,94	2257,71
TOTAL (min)	394,60	394,32	394,51	394,36	394,68	394,20	394,68	394,19

SEGMENTOS	ESTE25	ESTE26	ESTE27	ESTE28	ESTE29	ESTE30	ESTE31	ESTE32
1	1219,22	1229,88	1226,97	1222,02	1217,89	1231,19	1223,71	1225,32
2	3120,17	3137,78	3127,90	3130,22	3124,46	3133,54	3123,51	3134,58
3	2771,58	2815,48	2797,43	2789,24	2786,18	2800,48	2796,81	2789,81
4	2630,33	2631,11	2632,51	2628,93	2630,76	2630,61	2638,86	2622,64
5	2613,43	2619,38	2608,92	2623,97	2622,35	2610,48	2624,56	2608,26
6	2780,03	2774,96	2774,55	2780,33	2773,53	2781,41	2779,36	2775,56
7	2959,47	2949,09	2956,16	2952,46	2955,36	2953,23	2955,72	2952,89
8	3286,04	3270,90	3280,84	3276,18	3285,85	3271,31	3266,84	3290,28
9	2274,36	2249,38	2265,74	2257,77	2266,55	2257,09	2254,68	2268,91
TOTAL (min)	394,24	394,63	394,52	394,35	394,38	394,49	394,40	394,47

SEGMENTOS	ESTE33	ESTE34	ESTE35
1	1227,75	1221,28	1224,47
2	3115,76	3142,51	3129,01
3	2799,44	2787,13	2793,32
4	2630,44	2630,93	2630,69
5	2619,54	2613,25	2616,39
6	2777,64	2777,25	2777,43
7	2953,57	2955,04	2954,30
8	3279,16	3278,04	3278,54
9	2257,85	2265,67	2261,80
TOTAL(min)	394,35	394,52	394,43

t (s)								
SEGMENTOS	OESTE1	OESTE2	OESTE3	OESTE4	OESTE5	OESTE6	OESTE7	OESTE8
1	1892,55	1877,90	1878,78	1891,59	1872,54	1898,00	1880,37	1890,14
2	5035,98	5083,69	5036,33	5083,18	5069,19	5050,38	5065,48	5053,88
3	4165,86	4144,87	4140,22	4170,65	4173,12	4137,76	4162,07	4148,69
4	3945,30	3962,00	3948,70	3958,71	3944,76	3962,68	3954,00	3953,46
5	3789,85	3760,04	3767,41	3782,28	3760,30	3789,52	3769,96	3779,77
6	3485,45	3459,80	3478,55	3466,40	3474,22	3470,78	3470,54	3474,45
7	3400,64	3380,41	3401,48	3379,37	3374,28	3406,67	3385,76	3395,06
8	3426,43	3408,61	3427,24	3407,89	3424,29	3410,94	3417,90	3417,12
9	2418,30	2422,82	2439,70	2401,74	2419,31	2421,74	2423,37	2417,84
TOTAL (min)	526,01	525,00	525,31	525,70	525,20	525,81	525,49	525,51

SEGMENTOS	OESTE9	OESTE10	OESTE11	OESTE12	OESTE13	OESTE14	OESTE15	OESTE16
1	1873,61	1896,99	1891,26	1879,11	1886,35	1883,97	1884,64	1885,75
2	5082,98	5036,60	5043,59	5075,84	5058,74	5060,54	5029,46	5090,39
3	4149,36	4161,30	4180,65	4130,23	4125,55	4185,61	4149,78	4160,88
4	3951,06	3956,25	3968,47	3939,26	3935,49	3972,17	3971,81	3935,68
5	3790,91	3758,81	3764,07	3785,83	3766,64	3783,14	3798,60	3751,44
6	3476,23	3468,79	3478,83	3466,38	3465,12	3479,98	3463,55	3481,53
7	3396,11	3384,57	3396,08	3384,64	3401,78	3379,13	3387,96	3392,82
8	3415,64	3419,37	3416,33	3418,71	3422,95	3412,12	3424,84	3410,35
9	2427,69	2413,59	2417,41	2423,84	2414,15	2426,95	2418,83	2422,40
TOTAL (min)	526,06	524,94	525,94	525,06	524,61	526,39	525,49	525,52

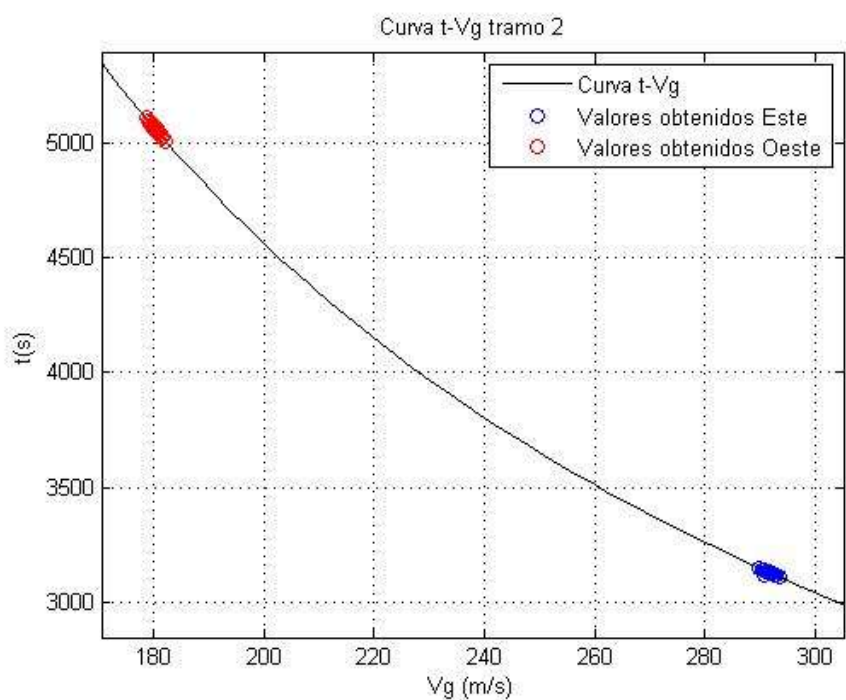
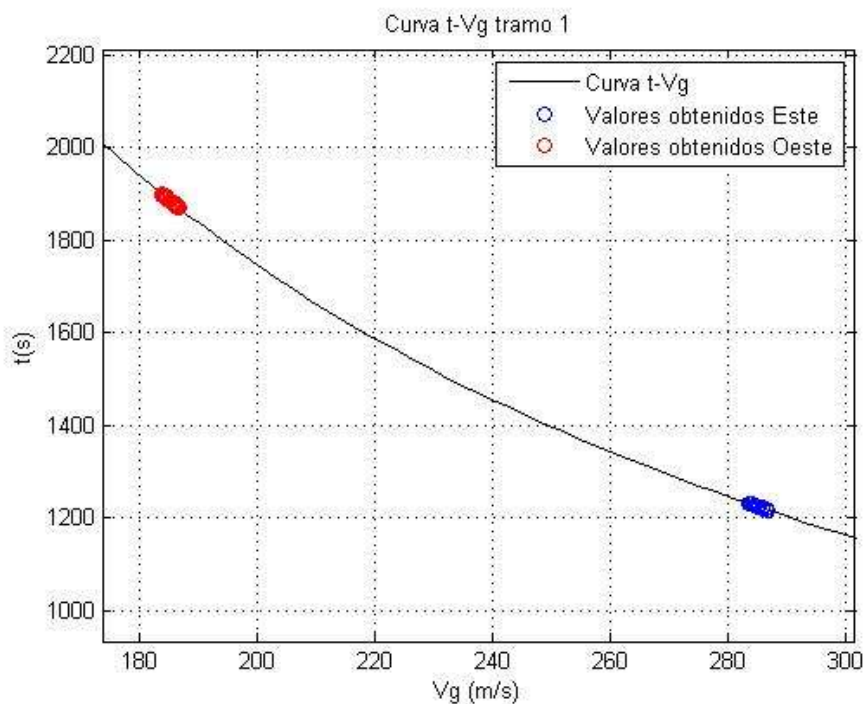
SEGMENTOS	OESTE17	OESTE18	OESTE19	OESTE20	OESTE21	OESTE22	OESTE23	OESTE24
1	1897,08	1872,96	1886,00	1884,36	1875,43	1895,18	1901,40	1869,35
2	5090,07	5029,68	5088,75	5030,99	5010,04	5110,12	5062,48	5057,14
3	4145,17	4166,53	4154,21	4156,45	4148,52	4162,09	4139,04	4171,83
4	3971,84	3937,56	3965,34	3942,02	3957,93	3949,40	3936,79	3970,78
5	3781,68	3770,82	3770,96	3778,86	3791,47	3758,42	3770,00	3779,84
6	3458,26	3486,96	3456,55	3488,68	3491,84	3453,34	3472,71	3472,31
7	3387,20	3392,69	3372,26	3408,59	3383,33	3397,37	3392,14	3388,66
8	3401,31	3434,94	3419,54	3415,63	3408,70	3426,53	3413,95	3421,13
9	2416,50	2424,73	2425,22	2416,03	2422,62	2418,60	2415,75	2425,43
TOTAL (min)	525,82	525,28	525,65	525,36	524,83	526,18	525,07	525,94

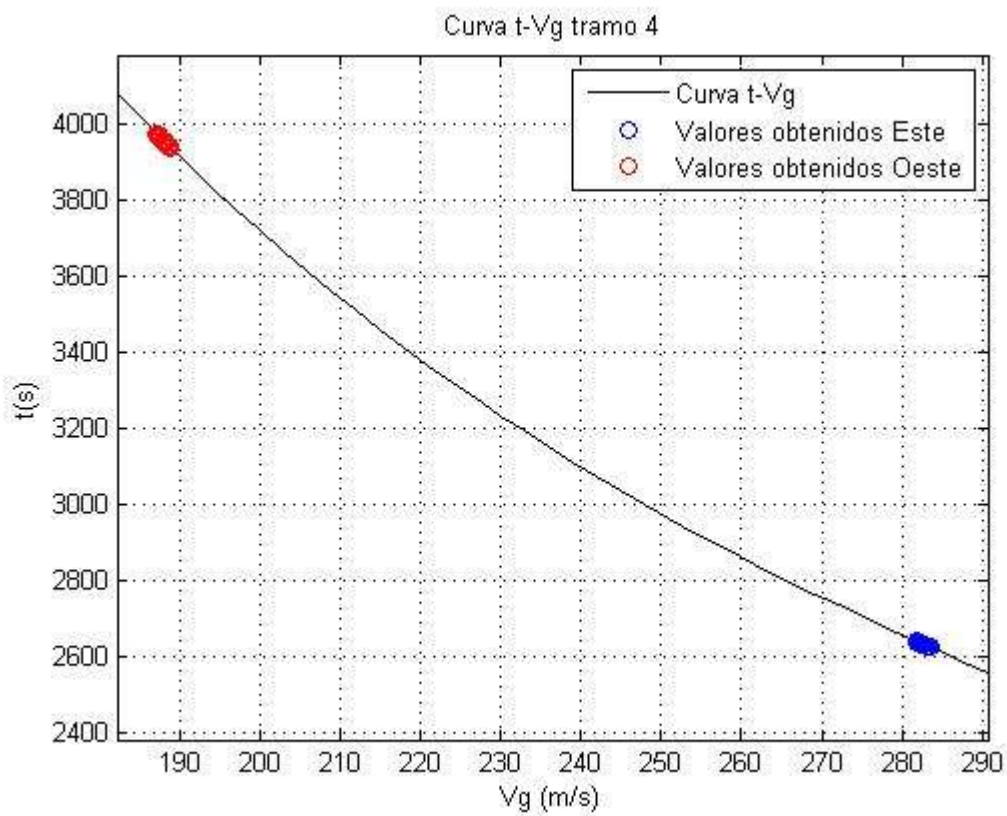
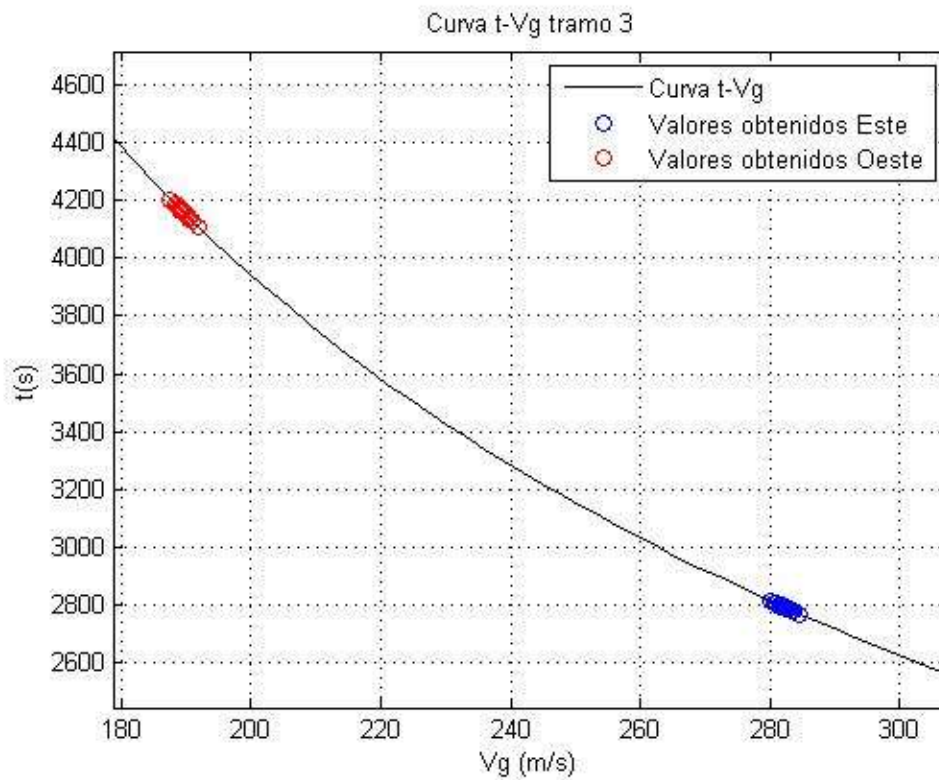
SEGMENTOS	OESTE25	OESTE26	OESTE27	OESTE28	OESTE29	OESTE30	OESTE31	OESTE32
1	1900,97	1869,75	1876,32	1894,42	1898,71	1871,91	1887,09	1883,18
2	5083,10	5037,02	5062,65	5056,60	5071,75	5048,04	5074,28	5045,32
3	4203,24	4108,50	4146,67	4163,93	4171,92	4138,89	4148,19	4162,52
4	3955,80	3951,50	3949,91	3957,37	3953,46	3953,97	3935,96	3971,42
5	3780,90	3768,82	3789,65	3760,07	3761,55	3788,22	3759,63	3790,31
6	3469,88	3475,17	3476,89	3468,23	3479,42	3465,66	3469,82	3475,23
7	3383,85	3396,92	3388,60	3392,03	3388,24	3392,46	3386,91	3393,83
8	3409,45	3425,84	3414,79	3420,34	3408,32	3426,79	3429,66	3405,53
9	2406,37	2434,91	2416,00	2425,25	2415,05	2426,16	2428,84	2412,40
TOTAL (min)	526,56	524,47	525,36	525,64	525,81	525,20	525,34	525,66

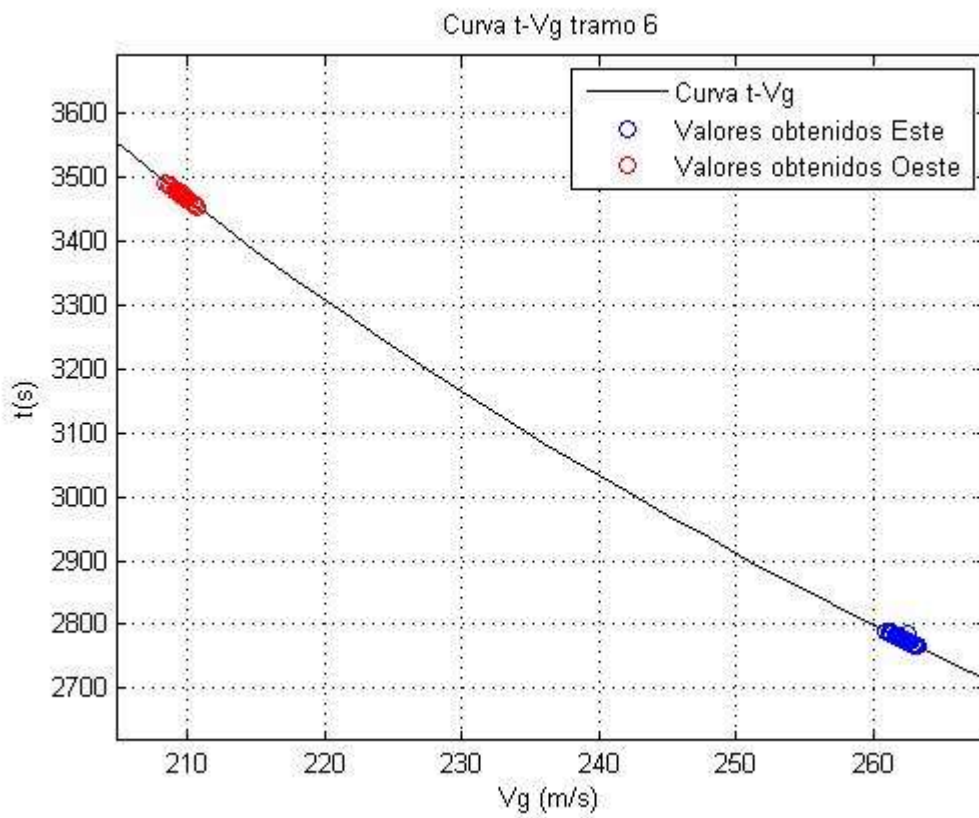
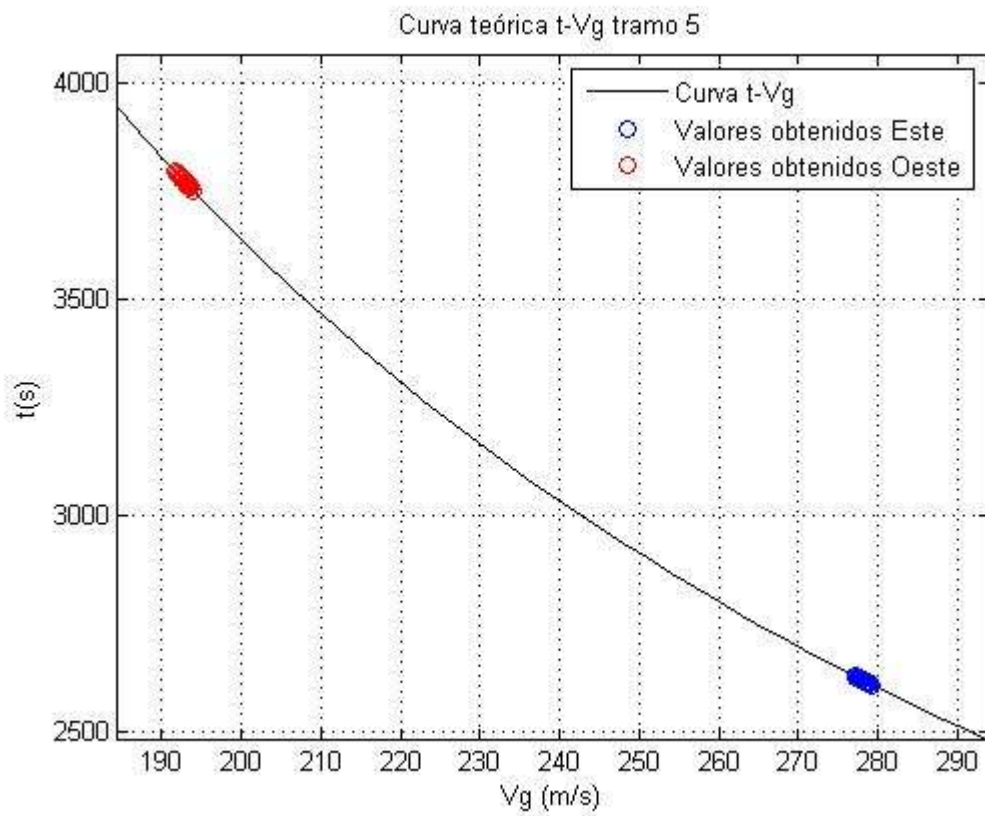
SEGMENTOS	OESTE33	OESTE34	OESTE35
1	1878,32	1892,05	1885,23
2	5094,82	5024,86	5059,72
3	4142,22	4168,68	4155,28
4	3954,51	3952,90	3953,70
5	3769,38	3780,39	3774,86
6	3471,62	3473,50	3472,57
7	3389,24	3391,55	3390,33
8	3417,02	3417,90	3417,52
9	2425,02	2416,24	2420,55
TOTAL (min)	33390,27	33362,45	33375,96

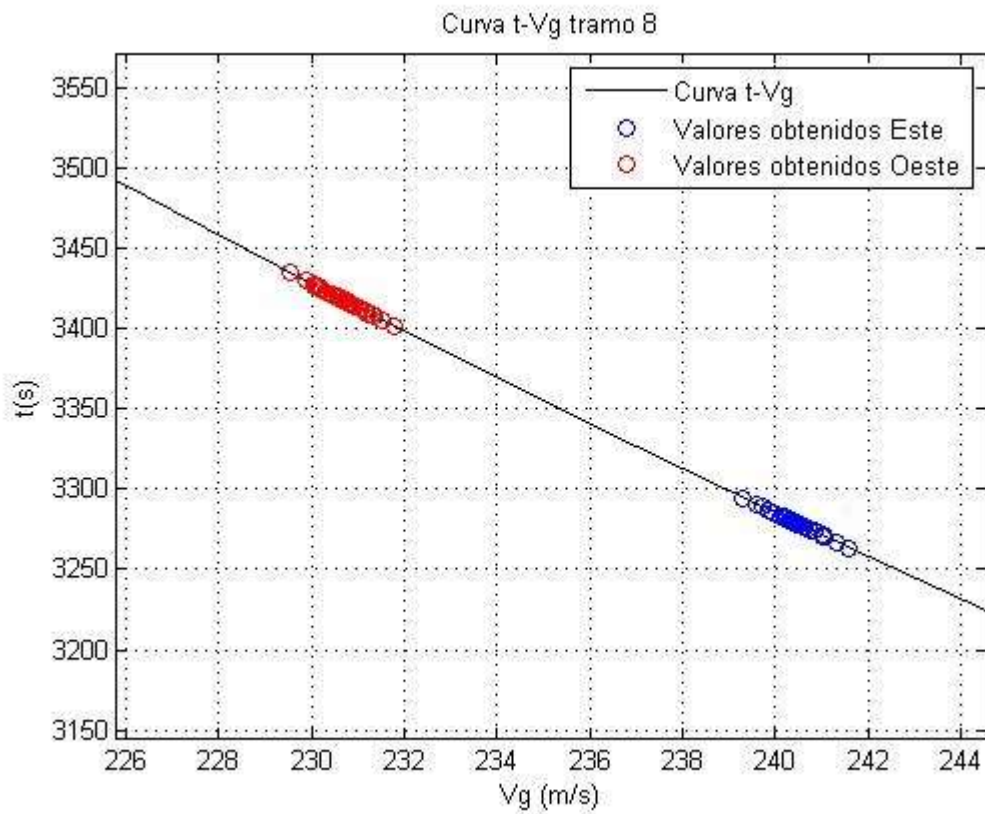
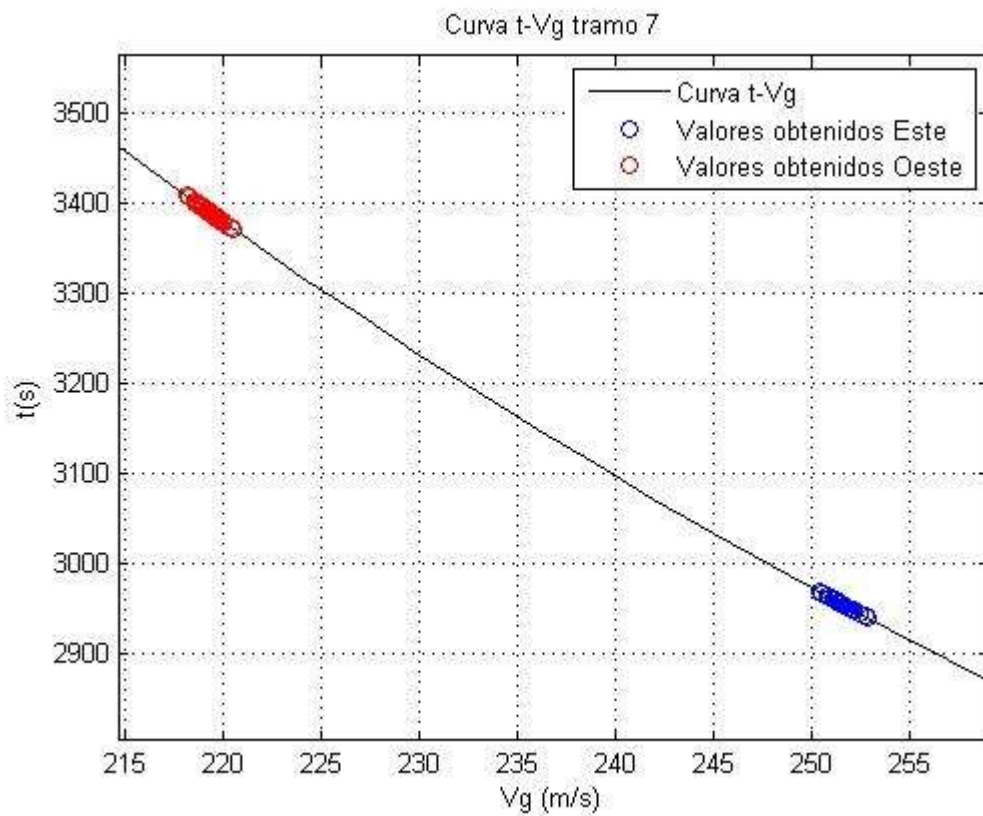
Anexo E: Curvas teóricas t-Vg con valores obtenidos en el programa.

En el presente anexo se muestran las gráficas con las curvas t-Vg y los valores obtenidos tras la ejecución del programa para los casos de los segmentos 1 al 8, dado que el último segmento es el que se desarrolla en el apartado correspondiente de la memoria.









GLOSARIO

DST: Decision Support Tools

ATC: Air Traffic Control

pTP: probabilistic Trajectory Predictor

ATM: Air Traffic Management

IMET: Investigating the optimal approach for future trajectory prediction (TP) systems to use

METeorological uncertainty information

TBO: Trajectory-Based Operations

TP: Trajectory Prediction

EWf: Ensemble of Weather Forecasting

PEARP: Prévission d'Ensemble ARPEGE

MOGREPS: Met Office Global and Regional Ensemble Prediction System

ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecast

pdf: Probability density function