

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AERONÁUTICOS



PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS 4D DE  
AERONAVES EN ENTORNOS MULTIOBJETIVO

TESIS DOCTORAL

Esther Calvo Fernández  
Ingeniero Aeronáutico

2017



DEPARTAMENTO DE SISTEMAS AEROESPACIALES, TRANSPORTE AÉREO Y  
AEROPUERTOS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AERONÁUTICOS

Título:

PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS 4D DE AERONAVES EN  
ENTORNOS MULTIOBJETIVO

Autor:

Esther Calvo Fernández

Ingeniero Aeronáutico

Director de Tesis:

Luis Pérez Sanz

Doctor Ingeniero Informático

2017



Tribunal nombrado por el Sr. Rector Magfco. de la Universidad Politécnica de Madrid, el día.....de.....de 20....

Presidente:\_\_\_\_\_

Vocal:\_\_\_\_\_

Vocal:\_\_\_\_\_

Vocal:\_\_\_\_\_

Secretario:\_\_\_\_\_

Suplente:\_\_\_\_\_

Suplente:\_\_\_\_\_

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día.....de.....de 20 ...  
en la E.T.S.I. /Facultad.....

Calificación .....

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO



# Resumen

---

Bajo la perspectiva del futuro sistema de gestión del tránsito aéreo, uno de los factores clave para la mejora de la capacidad del sistema es la adopción de una estrategia eficiente de planificación de vuelos. En un entorno de operaciones basadas en trayectorias (TBO), a este fin es necesario que durante la fase de planificación se consideren los intereses de distintos actores del sistema de gestión del tránsito aéreo. Esta tesis presenta una metodología de planificación óptima global y sin conflictos para un conjunto de vuelos en fase estratégica.

Esta metodología afronta dos problemas. El primero es la búsqueda de la planificación óptima global, para lo que se desarrollan tanto un modelo *data-driven* basado en una gran cantidad de planes de vuelo -que representan la intención de las aerolíneas- como un proceso de optimización multiobjetivo basado en algoritmos evolutivos. El segundo es la resolución de conflictos, para la que se desarrolla una metodología capaz de proporcionar una planificación libre de conflictos basándose en un modelo *data-driven* con un amplio conjunto de datos operacionales de resolución táctica de conflictos, que permite capturar el comportamiento de los controladores en estas situaciones.

En esta tesis se muestran los beneficios de la definición conjunta por parte de los usuarios del espacio aéreo y los proveedores de servicio de las trayectorias de vuelo óptimas desde un punto de vista global, a través de un proceso de colaboración, tanto en términos de consumo de combustible, balance entre capacidad y demanda y resolución de conflictos.





# Abstract

---

In the scope of the future Air Traffic Management system, one of the key aspects to improve the system capacity is the adoption of an efficient flight planning strategy. In a Trajectory Based Operations environment, it is paramount for this goal the consideration in planning phase of the different ATM system actors' interests. This thesis presents a conflict-free, global optimal planning methodology, for a set of flights in strategic phase.

This methodology faces two main challenges. Firstly, the search of the global optimal plan, for which a data-driven model is developed through a vast set of operational flight plans –representing the airlines' interests- as well as a multiobjective optimization process based on evolutionary algorithms. Secondly, the conflicts resolution, for which a methodology able to provide a conflict-free planning has been implemented, based on a data-driven model using a wide set of operational tactical conflict resolution data which captures the controllers conflict-resolution action patterns.

This thesis shows the benefits of airspace users and air navigation service providers joint definition of global optimum flight trajectories through a collaborative process, in terms of fuel consumption, demand and capacity balance, and conflict resolution.



# Contenido

---

<b>Capítulo 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Sistema actual de Gestión del Tránsito Aéreo .....</b>	<b>1</b>
1.1.1 Industria del transporte aéreo .....	1
1.1.2 La Gestión del Tránsito Aéreo .....	2
1.1.3 Actores del sistema ATM .....	5
1.1.4 Debilidades del sistema actual ATM .....	6
<b>1.2 Futuras tendencias del sistema ATM. Motivación .....</b>	<b>7</b>
1.2.1 Gestión de Trayectorias .....	8
1.2.2 Planificación Colaborativa .....	10
1.2.3 Gestión de Información en el Sistema Global .....	10
1.2.4 Automatización Avanzada .....	11
1.2.5 Motivación .....	11
<b>1.3 Objetivos, alcance y aportación de la tesis .....</b>	<b>12</b>
<b>1.4 Estructura de la tesis .....</b>	<b>15</b>
<b>Capítulo 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 Planificación de vuelo .....</b>	<b>16</b>
2.1.1 Problema de control óptimo .....	17
2.1.2 Descomposición del problema de optimización de la trayectoria 4D .....	18
2.1.3 Herramientas comerciales de planificación de vuelos .....	19
<b>2.2 Optimización multiobjetivo .....</b>	<b>20</b>
2.2.1 Técnicas no basadas en Pareto .....	21
2.2.2 Técnicas basadas en Pareto. Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo .....	22
<b>2.3 Resolución de conflictos .....</b>	<b>27</b>
<b>Capítulo 3. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROBLEMA DE PLANIFICACIÓN ÓPTIMA GLOBAL .....</b>	<b>28</b>
<b>3.1 Descripción del problema, esquema y simplificaciones .....</b>	<b>28</b>
<b>3.2 Módulo de generación de planificaciones alternativas basado en preferencias de las aerolíneas .....</b>	<b>31</b>
3.2.1 Fundamentos .....	31
3.2.2 Descripción de los datos utilizados .....	32
3.2.3 Limpieza de datos de entrada para el desarrollo del modelo <i>data-driven</i> .....	36

3.2.4	Desarrollo del modelo <i>data-driven</i> . Búsqueda de trayectorias posibles para cada combinación O-D-A .....	42
3.2.5	Aplicación del modelo. Cálculo de planificaciones alternativas.....	51
<b>3.3</b>	<b>Módulo de búsqueda de la planificación óptima multiobjetivo.....</b>	<b>61</b>
3.3.1	Definición del problema multiobjetivo .....	61
3.3.2	Algoritmos evolutivos multiobjetivo.....	63
3.3.3	Algoritmo NSGA-II ( <i>Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II</i> ).....	64
<b>Capítulo 4.</b>	<b>DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROBLEMA DE RESOLUCIÓN ESTRATÉGICA DE CONFLICTOS .....</b>	<b>75</b>
<b>4.1</b>	<b>Descripción del problema, esquema y simplificaciones.....</b>	<b>75</b>
<b>4.2</b>	<b>Módulo de resolución de conflictos basado en la operativa del controlador de tráfico aéreo.....</b>	<b>78</b>
4.2.1	Concepto operacional de control de tráfico aéreo actual .....	78
4.2.2	Descripción de los datos utilizados. Plan de vuelo y traza radar .....	80
4.2.3	Desarrollo del modelo <i>data-driven</i> .....	82
4.2.4	Aplicación del modelo. Cálculo de resoluciones alternativas .....	97
<b>4.3</b>	<b>Módulo de búsqueda de la resolución óptima.....</b>	<b>106</b>
4.3.1	Solución óptima de Pareto. Método de las restricciones $\varepsilon$ .....	107
4.3.2	Diseño de la toma de decisiones .....	109
<b>Capítulo 5.</b>	<b>VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>112</b>
<b>5.1</b>	<b>Presentación de los escenarios de validación .....</b>	<b>113</b>
<b>5.2</b>	<b>Resultados de la aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas.....</b>	<b>115</b>
5.2.1	Tablas de distribución de frecuencias .....	115
5.2.2	Resultados de la creación del modelo.....	117
5.2.3	Aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas sobre los escenarios de validación.....	119
<b>5.3</b>	<b>Resultados de la aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima .....</b>	<b>122</b>
5.3.1	Restricción en la función objetivo de demora de arribada .....	122
5.3.2	Selección del número de individuos de la población inicial .....	124
5.3.3	Cálculo de la planificación óptima de compromiso del frente de Pareto.....	127
5.3.4	Aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima sobre los escenarios de validación.....	129
5.3.5	Planificación de mínimo consumo de combustible .....	131
5.3.6	Distribución de la demanda .....	132
<b>5.4</b>	<b>Resultados de la aplicación del módulo de resolución de conflictos.....</b>	<b>134</b>
5.4.1	Detección de conflictos a partir de datos históricos de planes de vuelo.....	134
5.4.2	Detección de las maniobras de resolución de conflictos aplicadas.....	134
5.4.3	Resultados de la creación del modelo.....	135
<b>5.5</b>	<b>Resultados de la aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima .....</b>	<b>140</b>
5.5.1	Aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima sobre los escenarios de validación.....	140
<b>Capítulo 6.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>143</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>145</b>

<b>Apéndice A.</b>	<b>RESULTADOS POR ESCENARIO DE VALIDACIÓN.....</b>	<b>156</b>
<b>A.1</b>	<b>Resultados al Escenario 1.....</b>	<b>157</b>
A.1.1	Aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas .....	157
A.1.2	Aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima .....	157
A.1.3	Distribución de la demanda .....	159
A.1.4	Aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima .....	160
<b>A.2</b>	<b>Resultados al Escenario 2.....</b>	<b>161</b>
A.2.1	Aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas .....	161
A.2.2	Aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima .....	161
A.2.3	Distribución de la demanda .....	163
A.2.4	Aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima .....	164
<b>A.3</b>	<b>Resultados al Escenario 3.....</b>	<b>165</b>
A.3.1	Aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas .....	165
A.3.2	Aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima .....	165
A.3.3	Distribución de la demanda .....	167
A.3.4	Aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima .....	168
<b>A.4</b>	<b>Resultados al Escenario 4.....</b>	<b>169</b>
A.4.1	Aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas .....	169
A.4.2	Aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima .....	169
A.4.3	Distribución de la demanda .....	171
A.4.4	Aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima .....	172
<b>A.5</b>	<b>Resultados al Escenario 5.....</b>	<b>173</b>
A.5.1	Aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas .....	173
A.5.2	Aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima .....	173
A.5.3	Distribución de la demanda .....	175
A.5.4	Aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima .....	176
<b>A.6</b>	<b>Resultados al Escenario 6.....</b>	<b>177</b>
A.6.1	Aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas .....	177
A.6.2	Aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima .....	177
A.6.3	Distribución de la demanda .....	179
A.6.4	Aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima .....	180
<b>A.7</b>	<b>Resultados al Escenario 7.....</b>	<b>181</b>
A.7.1	Aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas .....	181
A.7.2	Aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima .....	181
A.7.3	Distribución de la demanda .....	183
A.7.4	Aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima .....	184
<b>A.8</b>	<b>Resultados al Escenario 8.....</b>	<b>185</b>
A.8.1	Aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas .....	185
A.8.2	Aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima .....	185
A.8.3	Distribución de la demanda .....	187
A.8.4	Aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima .....	188
<b>A.9</b>	<b>Resultados al Escenario 9.....</b>	<b>189</b>

A.9.1	Aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas .....	189
A.9.2	Aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima .....	189
A.9.3	Distribución de la demanda .....	191
A.9.4	Aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima .....	192
<b>A.10</b>	<b>Resultados al Escenario 10 .....</b>	<b>193</b>
A.10.1	Aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas .....	193
A.10.2	Aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima .....	193
A.10.3	Distribución de la demanda .....	195
A.10.4	Aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima .....	196
<b>A.11</b>	<b>Resultados al Escenario 11 .....</b>	<b>197</b>
A.11.1	Aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas .....	197
A.11.2	Aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima .....	197
A.11.3	Distribución de la demanda .....	199
A.11.4	Aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima .....	200
<b>A.12</b>	<b>Resultados al Escenario 12 .....</b>	<b>201</b>
A.12.1	Aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas .....	201
A.12.2	Aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima .....	201
A.12.3	Distribución de la demanda .....	203
A.12.4	Aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima .....	204
<b>Apéndice B.</b>	<b>ACRÓNIMOS Y NOMENCLATURA.....</b>	<b>205</b>
<b>B.1</b>	<b>Acrónimos .....</b>	<b>205</b>
<b>B.2</b>	<b>Nomenclatura .....</b>	<b>208</b>

# Lista de figuras

---

Figura 1-1 Organización de la gestión del tráfico aéreo según el horizonte temporal [132] .....	2
Figura 1-2 Red de rutas ATS del Espacio Aéreo Superior en la Península Ibérica (Cortesía de ENAIRE) .....	3
Figura 1-3 Previsión de 2012 de vuelos instrumentales en Europa [55] .....	7
Figura 1-4 Características clave del nuevo concepto operacional .....	8
Figura 1-5 Ciclo de vida de la Trayectoria de Negocio .....	9
Figura 1-6 Arquitectura del prototipo de generación de planificaciones óptimas globales y sin conflictos .....	13
Figura 3-1 FIR España Continental .....	28
Figura 3-2 Arquitectura de la resolución del problema de planificación óptima global .....	29
Figura 3-3 Formulario de plan de vuelo de OACI .....	33
Figura 3-4 Base de datos de planes de vuelo iniciales .....	34
Figura 3-5 Base de datos de configuraciones reales, sectorización y volumetría .....	35
Figura 3-6 Representación de un sector y los volúmenes elementales que lo componen .....	36
Figura 3-7 Esquema de datos de la tabla "Vuelos" tras su limpieza .....	37
Figura 3-8 Esquema de datos de la tabla "Planes de vuelo" tras aplicar distribución de frecuencias .....	40
Figura 3-9 Porcentaje de vuelo en función de las combinaciones O-D-A .....	41
Figura 3-10 Esquema de datos de la tabla "Vuelos" tras la búsqueda de la combinación O-D-A a la que pertenecen .....	42
Figura 3-11 Esquema del modelo de generación de planificaciones alternativas. Tabla de trayectorias posibles para cada combinación O-D-A .....	43
Figura 3-12 Esquema de datos de la tabla "Vuelos" tras la búsqueda de las trayectorias posibles y las propiedades de las mismas .....	50
Figura 3-13 Esquema de datos de los vuelos a optimizar .....	52
Figura 3-14 Uso del modelo data-driven para la obtención de planificaciones alternativas .....	53
Figura 3-15 Recuento de entradas con un paso de 20 minutos y una duración de 1 hora .....	56
Figura 3-16 Esquema de cálculo de la tabla de "Sectores operativos del día a optimizar" con el dato de capacidad de cada sector .....	57
Figura 3-17 Esquema de cálculo de la demanda por sector y periodo, para cada planificación alternativa, del día a optimizar .....	58
Figura 3-18 Las soluciones a-e son óptimos de Pareto del conjunto de soluciones $\Sigma$ .....	62
Figura 3-19 Soluciones dominadas y no dominadas por la solución b .....	62

Figura 3-20 Frente de Pareto .....	63
Figura 3-21 Distancia de apilamiento.....	66
Figura 3-22 Ilustración del operador de cruce.....	69
Figura 3-23 Ilustración del operador de mutación.....	70
Figura 3-24 Recombinación y selección .....	71
Figura 3-25 Diagrama de flujo algoritmo NSGA-II .....	72
Figura 4-1 Arquitectura de la resolución del problema de resolución de conflictos.....	76
Figura 4-2 Caracterización de un conflicto .....	79
Figura 4-3 Base de datos de actualizaciones de planes de vuelo .....	81
Figura 4-4 Base de datos de trazas radar .....	82
Figura 4-5 Esquema del cruce de las fuentes de planes de vuelo y trazas radar .....	83
Figura 4-6 Creación de trayectorias 4d a partir de planes de vuelo .....	87
Figura 4-7 Ilustración del algoritmo de detección de conflictos por parejas.....	88
Figura 4-8 Módulo de detección de conflictos. Esquema de la base de datos de conflictos históricos .....	90
Figura 4-9 Ilustración de la desviación temporal.....	90
Figura 4-10 Ilustración de la desviación vertical .....	91
Figura 4-11 Esquema de la base de datos de resolución de conflictos históricos .....	92
Figura 4-12 Aeronaves con a) misma derrota; b) derrotas que se cruzan ( $45^\circ$ a $90^\circ$ ); c) derrotas que se cruzan ( $90^\circ$ a $135^\circ$ ); d) derrotas opuestas [77].....	94
Figura 4-13 Obtención del modelo de generación de resoluciones alternativas .....	97
Figura 4-14 Esquema de datos de conflictos detectados en las planificaciones óptimas.....	98
Figura 4-15 Ejemplo de la resolución temporal de conflictos .....	98
Figura 4-16 Ejemplo de la resolución vertical de conflictos.....	100
Figura 4-17 Esquema de datos de las resoluciones alternativas a los conflictos detectados la planificación de un día determinado.....	105
Figura 4-18 Posibles resoluciones propuestas para un conflicto individual .....	106
Figura 4-19 Ilustración del método de las restricciones $\epsilon$ .....	108
Figura 4-20 Frente de Pareto de las resoluciones a un conflicto individual. Soluciones intermedias como función de $\tan\alpha$ .....	110
Figura 4-21 Histograma con las pendientes de los frentes de Pareto de todos los conflictos de determinada planificación a optimizar .....	111
Figura 5-1 Esquema del prototipo de generación de planificaciones óptimas globales y sin conflictos .....	112
Figura 5-2 Histograma de altitudes; a) antes de aplicar distribución de frecuencias; b) tras aplicar distribución de frecuencias .....	116
Figura 5-3 Histograma de velocidades horizontales a) antes de aplicar distribución de frecuencias; b) tras aplicar distribución de frecuencias .....	116



Figura 5-4 Histograma de velocidades verticales a) antes de aplicar distribución de frecuencias; b) tras aplicar distribución de frecuencias .....	117
Figura 5-5 Histograma del porcentaje de combinaciones O-D-A en función del número de trayectorias posibles .....	118
Figura 5-6 Representación de las trayectorias posibles para la combinación LEBB-LEVC-CRJ1 .....	118
Figura 5-7 Representación de las trayectorias posibles para la combinación GMMX-LFPO-B738..	119
Figura 5-8 Valor de las funciones objetivos para cada individuo solución de la población inicial y de la planificación real (escenario i).....	120
Figura 5-9 Histograma de la función objetivo consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial y de la planificación real (escenario i) .....	120
Figura 5-10 Histograma de la función objetivo desequilibrios de las planificaciones de la población inicial y de la planificación real .....	121
Figura 5-11 Histograma de la función objetivo demora de las planificaciones de la población inicial y de la planificación real .....	121
Figura 5-12 Valor de las funciones objetivo de cada individuo solución de determinada población <i>Pl</i> . Restricción en la función objetivo demora media de arribada.....	123
Figura 5-13 Consumo de combustible y desequilibrios de cada individuo solución de una determinada población <i>Pl</i> , tras seleccionar los individuos con una demora media inferior a 5 minutos.....	123
Figura 5-14 Porcentaje de mejora de los individuos del frente de Pareto en función de las iteraciones del algoritmo NSGA-II, con una población de 50 individuos; a) mejora en consumo de combustible; b) mejora en el número de desequilibrios.....	125
Figura 5-15 Porcentaje de mejora de los individuos del frente de Pareto en función de las iteraciones del algoritmo NSGA-II, con una población de 100 individuos; a) mejora en consumo de combustible; b) mejora en el número de desequilibrios.....	125
Figura 5-16 Porcentaje de mejora de los individuos del frente de Pareto en función de las iteraciones del algoritmo NSGA-II, con una población de 200 individuos; a) mejora en consumo de combustible; b) mejora en el número de desequilibrios.....	126
Figura 5-17 Frentes de Pareto en función de la iteración del algoritmo NSGA-II (escenario i) .....	127
Figura 5-18 Frente de Pareto de la última iteración. Selección del óptimo de compromiso (escenario i).....	128
Figura 5-19 Histograma de consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario i) .....	129
Figura 5-20 Histograma de demoras de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario i) .....	130
Figura 5-21 Desequilibrios de planificación real (escenario i) .....	133
Figura 5-22 Desequilibrios de planificación óptima (escenario i).....	133
Figura 5-23 Histogramas. a) Desglose de las desviaciones temporales; b) Desglose de las desviaciones verticales.....	135
Figura 5-24 Desglose de las desviaciones temporales según aeronaves con a) misma derrota; b) derrotas que se cruzan (45° a 90°); c) derrotas que se cruzan (90° a 135°); d) derrotas opuestas	136
Figura 5-25. Desglose de las desviaciones verticales según aeronaves con a) misma derrota; b) derrotas que se cruzan (45° a 90°); c) derrotas que se cruzan (90° a 135°); d) derrotas opuestas	138

Figura 5-26 Histograma con las pendientes de los frentes de Pareto de todos los conflictos del escenario i .....	140
Figura 5-27 Combustible adicional del escenario i para cada criterio de resolución de conflictos. ....	141
Figura 5-28 Adherencia al plan óptimo del escenario i para cada criterio de resolución de conflictos .....	141
Figura A- 1 Valor de las funciones objetivos para cada individuo solución de la población inicial (escenario 1) .....	157
Figura A- 2 Frentes de Pareto y planificación óptima (escenario 1) .....	157
Figura A- 3 Histograma de consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 1) .....	158
Figura A- 4 Histograma de desequilibrios de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 1) .....	158
Figura A- 5 Histograma de demoras de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 1) .....	158
Figura A- 6 Desequilibrios de la planificación real (escenario 1) .....	159
Figura A- 7 Desequilibrios de la planificación óptima (escenario 1) .....	159
Figura A- 8 Pendientes de los frentes de Pareto de todos los conflictos (escenario 1) .....	160
Figura A- 9 Combustible adicional para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 1) .....	160
Figura A- 10 Adherencia al plan óptimo para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 1) .....	160
Figura A- 11 Valor de las funciones objetivos para cada individuo solución de la población inicial (escenario 2) .....	161
Figura A- 12 Frentes de Pareto y planificación óptima (escenario 2) .....	161
Figura A- 13 Histograma de consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 2) .....	162
Figura A- 14 Histograma de desequilibrios de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 2) .....	162
Figura A- 15 Histograma de demoras de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 2) .....	162
Figura A- 16 Desequilibrios de la planificación real (escenario 2) .....	163
Figura A- 17 Desequilibrios de la planificación óptima (escenario 2) .....	163
Figura A- 18 Pendientes de los frentes de Pareto de todos los conflictos (escenario 2) .....	164
Figura A- 19 Combustible adicional para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 2) ..	164
Figura A- 20 Adherencia al plan óptimo para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 2) .....	164
Figura A- 21 Valor de las funciones objetivos para cada individuo solución de la población inicial (escenario 3) .....	165
Figura A- 22 Frentes de Pareto y planificación óptima (escenario 3) .....	165
Figura A- 23 Histograma de consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 3) .....	166

Figura A- 24 Histograma de desequilibrios de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 3).....	166
Figura A- 25 Histograma de demoras de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 3).....	166
Figura A- 26 Desequilibrios de la planificación real (escenario 3).....	167
Figura A- 27 Desequilibrios de la planificación óptima (escenario 3).....	167
Figura A- 28 Pendientes de los frentes de Pareto de todos los conflictos (escenario 3) .....	168
Figura A- 29 Combustible adicional para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 3)..	168
Figura A- 30 Adherencia al plan óptimo para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 3) .....	168
Figura A- 31 Valor de las funciones objetivos para cada individuo solución de la población inicial (escenario 4) .....	169
Figura A- 32 Frentes de Pareto y planificación óptima (escenario 4).....	169
Figura A- 33 Histograma de consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 4).....	170
Figura A- 34 Histograma de desequilibrios de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 4).....	170
Figura A- 35 Histograma de demoras de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 4).....	170
Figura A- 36 Desequilibrios de la planificación real (escenario 4).....	171
Figura A- 37 Desequilibrios de la planificación óptima (escenario 4).....	171
Figura A- 38 Pendientes de los frentes de Pareto de todos los conflictos (escenario 4) .....	172
Figura A- 39 Combustible adicional para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 4)..	172
Figura A- 40 Adherencia al plan óptimo para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 4) .....	172
Figura A- 41 Valor de las funciones objetivos para cada individuo solución de la población inicial (escenario 5) .....	173
Figura A- 42 Frentes de Pareto y planificación óptima (escenario 5).....	173
Figura A- 43 Histograma de consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 5).....	174
Figura A- 44 Histograma de desequilibrios de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 5).....	174
Figura A- 45 Histograma de demoras de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 5).....	174
Figura A- 46 Desequilibrios de la planificación real (escenario 5).....	175
Figura A- 47 Desequilibrios de la planificación óptima (escenario 5).....	175
Figura A- 48 Pendientes de los frentes de Pareto de todos los conflictos (escenario 5) .....	176
Figura A- 49 Combustible adicional para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 5)..	176
Figura A- 50 Adherencia al plan óptimo para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 5) .....	176

Figura A- 51 Valor de las funciones objetivos para cada individuo solución de la población inicial (escenario 6) .....	177
Figura A- 52 Frentes de Pareto y planificación óptima (escenario 6) .....	177
Figura A- 53 Histograma de consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 6) .....	178
Figura A- 54 Histograma de desequilibrios de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 6) .....	178
Figura A- 55 Histograma de demoras de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 6) .....	178
Figura A- 56 Desequilibrios de la planificación real (escenario 6) .....	179
Figura A- 57 Desequilibrios de la planificación óptima (escenario 6) .....	179
Figura A- 58 Pendientes de los frentes de Pareto de todos los conflictos (escenario 6) .....	180
Figura A- 59 Combustible adicional para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 6) ..	180
Figura A- 60 Adherencia al plan óptimo para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 6) .....	180
Figura A- 61 Valor de las funciones objetivos para cada individuo solución de la población inicial (escenario 7) .....	181
Figura A- 62 Frentes de Pareto y planificación óptima (escenario 7) .....	181
Figura A- 63 Histograma de consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 7) .....	182
Figura A- 64 Histograma de desequilibrios de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 7) .....	182
Figura A- 65 Histograma de demoras de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 7) .....	182
Figura A- 66 Desequilibrios de la de planificación real (escenario 7) .....	183
Figura A- 67 Desequilibrios de la planificación óptima (escenario 7) .....	183
Figura A- 68 Pendientes de los frentes de Pareto de todos los conflictos (escenario 7) .....	184
Figura A- 69 Combustible adicional para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 7) ..	184
Figura A- 70 Adherencia al plan óptimo para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 7) .....	184
Figura A- 71 Valor de las funciones objetivos para cada individuo solución de la población inicial (escenario 8) .....	185
Figura A- 72 Frentes de Pareto y planificación óptima (escenario 8) .....	185
Figura A- 73 Histograma de consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 8) .....	186
Figura A- 74 Histograma de desequilibrios de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 8) .....	186
Figura A- 75 Histograma de demoras de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 8) .....	186
Figura A- 76 Desequilibrios de la planificación real (escenario 8) .....	187
Figura A- 77 Desequilibrios de la planificación óptima (escenario 8) .....	187

Figura A- 78 Pendientes de los frentes de Pareto de todos los conflictos (escenario 8) .....	188
Figura A- 79 Combustible adicional para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 8) ..	188
Figura A- 80 Adherencia al plan óptimo para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 8) .....	188
Figura A- 81 Valor de las funciones objetivos para cada individuo solución de la población inicial (escenario 9) .....	189
Figura A- 82 Frentes de Pareto y planificación óptima (escenario 9) .....	189
Figura A- 83 Histograma de consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 9) .....	190
Figura A- 84 Histograma de desequilibrios de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 9) .....	190
Figura A- 85 Histograma de demoras de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 9) .....	190
Figura A- 86 Desequilibrios de la planificación real (escenario 9) .....	191
Figura A- 87 Desequilibrios de la planificación óptima (escenario 9) .....	191
Figura A- 88 Pendientes de los frentes de Pareto de todos los conflictos (escenario 9) .....	192
Figura A- 89 Combustible adicional para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 9) ..	192
Figura A- 90 Adherencia al plan óptimo para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 9) .....	192
Figura A- 91 Valor de las funciones objetivos para cada individuo solución de la población inicial (escenario 10) .....	193
Figura A- 92 Frentes de Pareto y planificación óptima (escenario 10) .....	193
Figura A- 93 Histograma de consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 10) .....	194
Figura A- 94 Histograma de desequilibrios de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 10) .....	194
Figura A- 95 Histograma de demoras de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 10) .....	194
Figura A- 96 Desequilibrios de la planificación real (escenario 10) .....	195
Figura A- 97 Desequilibrios de la planificación óptima (escenario 10) .....	195
Figura A- 98 Pendientes de los frentes de Pareto de todos los conflictos (escenario 10) .....	196
Figura A- 99 Combustible adicional para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 10) ..	196
Figura A- 100 Adherencia al plan óptimo para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 10) .....	196
Figura A- 101 Valor de las funciones objetivos para cada individuo solución de la población inicial (escenario 11) .....	197
Figura A- 102 Frentes de Pareto y planificación óptima (escenario 11) .....	197
Figura A- 103 Histograma de consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 11) .....	198
Figura A- 104 Histograma de desequilibrios de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 11) .....	198

Figura A- 105 Histograma de demoras de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 11) .....	198
Figura A- 106 Desequilibrios de la planificación real (escenario 11) .....	199
Figura A- 107 Desequilibrios de la planificación óptima (escenario 11).....	199
Figura A- 108 Pendientes de los frentes de Pareto de todos los conflictos (escenario 11).....	200
Figura A- 109 Combustible adicional para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 11) .....	200
Figura A- 110 Adherencia al plan óptimo para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 11).....	200
Figura A- 111 Valor de las funciones objetivos para cada individuo solución de la población inicial (escenario 12) .....	201
Figura A- 112 Frentes de Pareto y planificación óptima (escenario 12) .....	201
Figura A- 113 Histograma de consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 12) .....	202
Figura A- 114 Histograma de desequilibrios de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 12) .....	202
Figura A- 115 Histograma de demoras de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 12) .....	202
Figura A- 116 Desequilibrios de la planificación real (escenario 12) .....	203
Figura A- 117 Desequilibrios de la planificación óptima (escenario 12).....	203
Figura A- 118 Pendientes de los frentes de Pareto de todos los conflictos (escenario 12).....	204
Figura A- 119 Combustible adicional para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 12) .....	204
Figura A- 120 Adherencia al plan óptimo para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 12).....	204

# Lista de tablas

---

Tabla 3-1 Algoritmo de cálculo de los parámetros para la construcción de las tablas de distribución de frecuencias.....	38
Tabla 3-2 Algoritmo para agrupar los parámetros del plan de vuelo en cada una de las clases.....	39
Tabla 3-3 Algoritmo para calcular las combinaciones O-D-A representativas de la muestra .....	40
Tabla 3-4 Algoritmo de búsqueda de todos los tramos de ruta posibles.....	44
Tabla 3-5 Algoritmo de cálculo de la trayectoria 4D de cada tramo de ruta posible .....	44
Tabla 3-6 Algoritmo de cálculo del tiempo medio y la distancia desde la entrada hasta la salida del FIR de cada trayectoria posible .....	46
Tabla 3-7 Algoritmo de cálculo del tiempo medio y la distancia desde el origen a la entrada en el FIR para cada par origen-trayectoria.....	47
Tabla 3-8 Algoritmo de cálculo del tiempo medio y la distancia desde la salida del FIR hasta el aeropuerto de destino para cada par destino-trayectoria. ....	48
Tabla 3-9 Algoritmo cálculo del consumo de combustible para cada par aeronave-trayectoria.....	49
Tabla 3-10 Algoritmo de búsqueda de las posibles rutas para cada combinación O-D-A.....	50
Tabla 3-11 Algoritmo de búsqueda de los sectores operativos, el día de estudio, y su capacidad .....	57
Tabla 3-12 Algoritmo cálculo de la demanda por sector y periodo, para cada planificación alternativa, del día a optimizar .....	59
Tabla 3-13 Algoritmo de ordenamiento rápido no dominado [39][150]. (Copyright (c) 2009, Aravind Seshadri) .....	64
Tabla 3-14 Algoritmo de cálculo del operador de apilamiento (Copyright (c) 2009, Aravind Seshadri) .....	66
Tabla 3-15 Algoritmo de selección por torneo (Copyright (c) 2009, Aravind Seshadri) .....	68
Tabla 3-16 Algoritmo del operador de cruce .....	69
Tabla 3-17 Algoritmo del operador de mutación .....	71
Tabla 3-18 Algoritmo general NSGA-II (Copyright (c) 2009, Aravind Seshadri) .....	72
Tabla 4-1 Algoritmo de cruce de las fuentes de planes de vuelo y trazas radar .....	84
Tabla 4-2 Algoritmo de creación de escenarios temporales para la detección de conflictos históricos .....	86
Tabla 4-3 Algoritmo de creación de trayectorias 4D de plan de vuelo .....	87
Tabla 4-4 Algoritmo de detección de conflictos por parejas .....	89
Tabla 4-5 Algoritmo de detección de las maniobras de resolución de conflictos .....	91

Tabla 4-6 Algoritmo de cálculo de la derrota de los vuelos en conflicto.....	93
Tabla 4-7 Algoritmo de clasificación de los datos de resoluciones históricas en función de la derrota entre las aeronaves en conflicto.....	94
Tabla 4-8 Algoritmo de aplicación de técnicas de clustering (k-means) sobre los datos históricos de resoluciones de conflictos.....	95
Tabla 4-9 Algoritmo de Sturges para la detección del número de clusters .....	97
Tabla 4-10 Algoritmo de cálculo de trayectoria alternativa al aplicar resolución temporal .....	99
Tabla 4-11 Algoritmo de cálculo de trayectoria alternativa al aplicar resolución vertical .....	101
Tabla 4-12 Algoritmo de cálculo del combustible adicional al aplicar determinada resolución .....	103
Tabla 4-13 Algoritmo de cálculo de posibilidad de aplicar una determinada resolución temporal	103
Tabla 4-14 Algoritmo de cálculo de posibilidad de aplicar una determinada resolución vertical ...	104
Tabla 4-15 Algoritmo de cálculo de conflictos con otros vuelos de una determinada resolución ...	104
Tabla 4-16 Algoritmo de las restricciones $\epsilon$ .....	108
Tabla 5-1 Métricas de las planificaciones reales de cada escenario de validación.....	114
Tabla 5-2 Parámetros de distribución de frecuencias de los parámetros que definen un plan de vuelo .....	115
Tabla 5-3 Métricas de las planificaciones óptimas (con conflictos) de cada uno de los escenarios de validación .....	130
Tabla 5-4 Métricas de las planificaciones de mínimo consumo de combustible de cada uno de los escenarios de validación.....	131
Tabla 5-5 Desglose de conflictos por fase de vuelo .....	134
Tabla 5-6 Desglose de la desviación temporal para resolver los conflictos en función de la derrota entre las aeronaves involucradas .....	137
Tabla 5-7 Desglose de la desviación vertical para resolver los conflictos en función de la derrota entre las aeronaves involucradas .....	139



# Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

---

En este capítulo se presenta en primer lugar una visión general del sistema actual de Gestión del Tránsito Aéreo (ATM, *Air Traffic Management*) identificando sus debilidades. Posteriormente, se discuten las tendencias futuras de dicho sistema ATM así como la motivación que ha impulsado este trabajo. A continuación, se presentan los objetivos, el alcance y las aportaciones de esta tesis. Finalmente, se presenta la estructura que se ha adoptado para su elaboración.

## 1.1 Sistema actual de Gestión del Tránsito Aéreo

### 1.1.1 Industria del transporte aéreo

La industria del transporte aéreo desempeña una función importante en las actividades económicas mundiales y es uno de los sectores de mayor crecimiento. Dado el continuo crecimiento de la aviación civil en muchos lugares la demanda suele exceder a la capacidad disponible del sistema de navegación aérea, con consecuencias muy negativas, no solamente para la industria aeronáutica sino también para otras actividades económicas de carácter general. Una de las claves para mantener la vitalidad de la aviación civil es la disponibilidad de un sistema de navegación aérea operacionalmente seguro, protegido, eficiente y sostenible desde el punto de vista ambiental. Esto implica la necesidad de un sistema de gestión del tránsito aéreo que permita aprovechar al máximo las mejoras de la capacidad que puedan lograrse con los avances técnicos [76].

En la década de los 80, el Consejo de la OACI (Organización de Aviación Civil Internacional) consideró el crecimiento sostenido de la aviación civil internacional, teniendo en cuenta las nuevas tecnologías, y determinó la necesidad de una evaluación y análisis completos de los procedimientos y tecnologías al servicio de la aviación civil. Para ello, estableció un Comité especial encargado de elaborar recomendaciones para el desarrollo futuro de la navegación aérea en la aviación civil. Posteriormente, en 1991, se estableció un segundo Comité encargado de supervisar y coordinar la planificación de la transición hacia el sistema de navegación aérea del futuro, llamado internacionalmente CNS-ATM, siglas correspondientes a la denominación inglesa de Comunicaciones (C, *Communications*), Navegación (N, *Navigation*) y Vigilancia (S, *Surveillance*), y Gestión del Tránsito Aéreo (ATM). Las siglas CNS se refieren al soporte técnico, mientras que las siglas ATM están referidas al ámbito de la organización y de los procedimientos operacionales.

### 1.1.2 La Gestión del Tránsito Aéreo

Las actividades necesarias para la gestión del tránsito aéreo se pueden dividir utilizando como criterio el tiempo disponible desde que se realiza la acción de gestión hasta que ésta afecta a la operación, es decir, hasta que la aeronave comienza su salida en el aeropuerto de origen. Según este criterio, en el sistema ATM existen tres niveles o fases: la Gestión del Espacio Aéreo (ASM, *Air Space Management*), la Gestión de Flujos y Capacidad de Tránsito Aéreo (ATFCM, *Air Traffic Flow & Capacity Management*) y el Control de Tráfico Aéreo (ATC, *Air Traffic Control*).

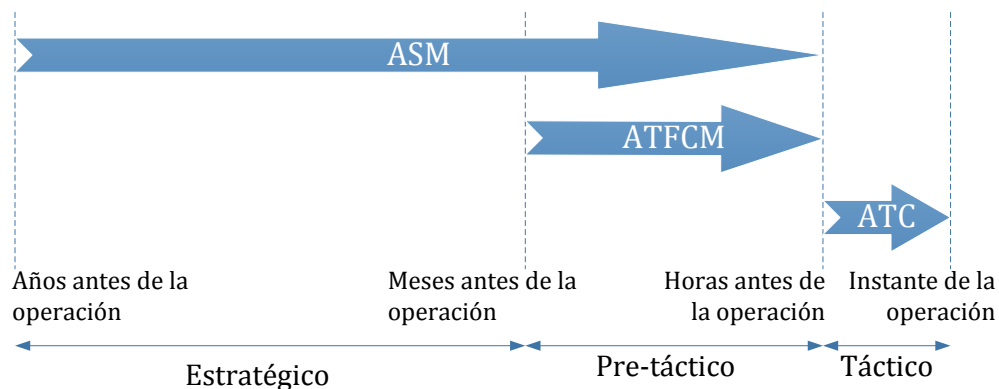


Figura 1-1 Organización de la gestión del tráfico aéreo según el horizonte temporal [132]

#### Gestión del espacio aéreo, ASM (Nivel estratégico)

La gestión del espacio aéreo [56] se lleva a cabo a nivel estratégico antes de la salida del vuelo, meses e incluso años antes de la operación, y se trata de una actividad que incluye el modelado y el diseño del espacio aéreo que permite el desarrollo eficiente y seguro de las operaciones de las aeronaves. Engloba la definición de la red de rutas ATS (*Air Traffic Service*), la organización del espacio aéreo en regiones y sectores de control, y el diseño de procedimientos (de aproximación, salida, etc).

Una vez delimitado el espacio aéreo de responsabilidad de un Estado, éste ha de organizarlo para permitir la seguridad de las operaciones aéreas. Para este fin se ha establecido una red de rutas aéreas que las aeronaves, dotadas de sistemas de ayuda a la navegación, puedan seguir. Desde esta perspectiva, el espacio aéreo puede verse como un conjunto de vías que conectan los diferentes aeropuertos y que se publican en las denominadas cartas aeronáuticas, como si se tratase de un mapa de carreteras [132].

Las características de las rutas aéreas dependen principalmente de la fase del vuelo. Por un lado, las aeronaves en los procesos de despegue y de aproximación a la pista de aterrizaje deben realizar virajes pronunciados. Para estos fines, existen unas trayectorias determinadas que pueden tener tramos curvos y perfiles descendientes y ascendentes. Estas se denominan normalmente rutas de llegada normalizadas (STAR, *Standard Terminal Arrival Route*); y rutas normalizadas de despegue (SID, *Standard Instrument Departure*).

Por otro lado, la fase del vuelo en la que la aeronave alcanza un punto o nivel deseado que resulta idóneo para completar la mayor parte del vuelo se denomina crucero o vuelo en-ruta, y las rutas que sigue la aeronave en esta fase se denominan rutas ATS o aerovías.

Tanto las SID y STAR, como las aerovías que las unen se las denomina genéricamente rutas ATS (Figura 1-2). Estas rutas están constituidas por líneas en el espacio aéreo que tienen asociadas unas dimensiones físicas determinadas para que las aeronaves vuelen por ellas libres de obstáculos y para que no interfieran con aquellas que vuelen siguiendo otras rutas diferentes [132].

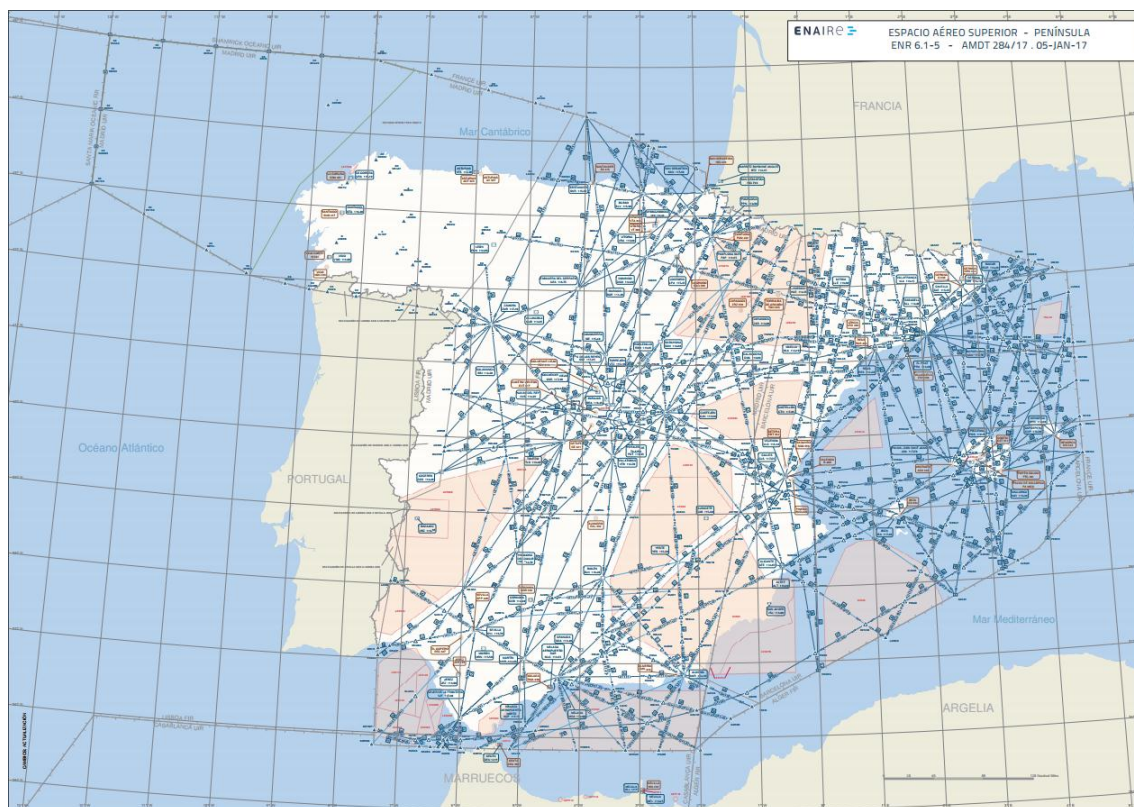


Figura 1-2 Red de rutas ATS del Espacio Aéreo Superior en la Península Ibérica (Cortesía de ENAIRE<sup>1</sup>)

La gestión eficiente de las aeronaves en el espacio aéreo requiere que éste se reparta según una serie de criterios lógicos. El espacio aéreo se divide en regiones con dimensiones adecuadas para que su gestión pueda ser atendida desde una única dependencia. En consecuencia, se particiona en las denominadas Regiones de Información de Vuelo (FIR, *Flight Information Region*; y UIR, *Upper Information Region*).

Los problemas de vigilancia y control no son iguales en las diferentes fases de vuelo. Por ello, dentro de cada región de información de vuelo, FIR/UIR, se definen diferentes zonas. La vigilancia y control de las aeronaves en cada zona es sustancialmente diferente,

<sup>1</sup> <http://www.enaire.es/csee/Satellite/navegacion-aerea/es/Page/1078418725153/?other=1083158950573#ancla7>

lo que lleva a distintos tipos de control de tráfico aéreo llevados a cabo desde unas instalaciones, denominadas dependencias ATS [132], que son:

- Las torres de control, desde las que normalmente se ejerce el control de aeródromo.
- Las oficinas de aproximación, desde las que se realiza habitualmente el control de aproximación.
- Los centros de control de área (ACC, *Air Control Center*).

#### *Gestión de Flujos y Capacidad de Tránsito Aéreo, ATFCM (Nivel pre-táctico)*

La gestión de flujos y capacidad de tránsito aéreo se lleva a cabo a nivel pre-táctico antes de la salida del vuelo, desde semanas hasta tres horas antes de la operación. Su deber es asegurar que el flujo de aeronaves en cada sector del espacio aéreo o aeropuerto sea igual o inferior a su capacidad límite en todo momento. Por ello, la gestión de flujos de tránsito aéreo se basa en conocer con antelación los vuelos previstos para un determinado momento y lugar, lo cual es posible gracias a la programación o planificación de dichos vuelos mucho antes de tener lugar.

La planificación de un vuelo es el proceso de producir su plan. Un plan de vuelo se define por OACI como “la información especificada que, respecto a un vuelo proyectado o a parte de él, se somete a las dependencias de los servicios de tránsito aéreo” [78]. El plan de vuelo es el conjunto de información relevante acerca de cada vuelo, tal como el aeropuerto de origen y de destino, la ruta planificada, el tipo de aeronave, el equipamiento de comunicaciones y navegación con que cuenta ésta, etc.

Una vez que la compañía ha determinado el plan de vuelo de acuerdo a sus preferencias individuales y cumpliendo el diseño y organización del espacio aéreo, el siguiente paso en cuanto a ATFCM es analizarlo en conjunto con el resto de vuelos que operan en la misma ventana horaria y en la misma área, con el fin de comprobar si la demanda excede la capacidad disponible. Este es un paso fundamental, ya que cada controlador de tráfico aéreo sólo puede manejar determinado número de vuelos de forma segura en los volúmenes de espacio aéreo designados bajo su responsabilidad.

Todos los planes de vuelo que pasen por una determinada región, como por ejemplo Europa, deben ser sometidos a una unidad de gestión del flujo de tránsito aéreo y de capacidad (NMOC, *Network Manager Operations Center*). Para averiguar si “cabe” una determinada demanda de aeronaves, obtenida básicamente a partir de los planes de vuelo, se comparan las capacidades establecidas y esta demanda esperada sector a sector en cada instante. Si al hacer esta comparación aparece algún caso para el que se prevea un número de aeronaves por unidad de tiempo superior al establecido en su capacidad es necesario poner en práctica una regulación [133].

La regulación consiste en la no aceptación de sus planes de vuelo, de forma que las aeronaves afectadas deben solicitar su reformulación, disponiendo como alternativas retrasar su vuelo o proponer una ruta alternativa.

### Control de tráfico aéreo, ATC (Nivel táctico)

El control de tráfico aéreo se realiza a nivel táctico, durante la operación de la aeronave o momentos antes de la salida. A pesar de la aprobación de un plan de vuelo (como parte del proceso ATFCM) hay muchos elementos que introducen incertidumbre en el sistema, por lo que el plan de vuelo rara vez se cumple plenamente. Este servicio ATC permite garantizar la seguridad del vuelo, detectando y evitando cualquier peligro potencial mediante la modificación de las rutas. Esta tarea la realizan controladores aéreos, a partir de su asignación a los sectores operacionales en que se divide el espacio aéreo de responsabilidad.

La ruta a seguir por una aeronave fue planificada por la compañía aérea antes de su salida en base al diseño del espacio aéreo resultante del servicio ASM. Cuando no hay una aerovía adecuada entre dos puntos de ruta, el ATC puede permitir un enrutamiento directo entre los fijos sin utilizar una aerovía, siempre a nivel táctico.

El plan de vuelo además de ser un elemento básico para la navegación, es esencial para conocer el posicionamiento previsto e intenciones de las diferentes aeronaves, utilizándose como referencia en el servicio ATC para gestionar la seguridad y fluidez de los vuelos, a través de la vigilancia y el control de la separación de las aeronaves dentro del espacio aéreo bajo su responsabilidad [133].

#### 1.1.3 Actores del sistema ATM

En el desarrollo de un vuelo se ven involucrados diferentes actores, con interconexiones entre ellos y diferentes funciones [134]. A continuación se resume la responsabilidad de los principales actores del sistema actual ATM (algunos de ellos referidos en las secciones precedentes).

- Pilotos: su responsabilidad es realizar el vuelo de forma segura, eficiente y de acuerdo con el plan de vuelo presentado, ajustándose a los cambios que se le asignen. Cuando se le solicite, proporcionará información relativa al vuelo y a las condiciones meteorológicas.
- Aerolíneas: serán responsables de presentar los planes de vuelo con la información de la operación actualizada y garantizar los recursos para su desarrollo.
- Operadores aeroportuarios: su principal responsabilidad será la gestión de los movimientos en superficie y la asignación de posiciones de estacionamiento.
- Control de tráfico aéreo: sus responsabilidades serán mantener la separación entre aeronaves para evitar conflictos<sup>2</sup>, mantener el flujo ordenado de aeronaves y gestionar la transferencia de estas hacia o desde sectores adyacentes.

---

<sup>2</sup> Un conflicto es una situación donde dos aeronaves pierden simultáneamente la separación mínima horizontal y vertical. Esta definición, de gran importancia es este estudio, se dará con mayor precisión en la sección 4.2.1.

- Gestor de flujos de tráfico: responsable de gestionar el uso y la distribución de la capacidad del sistema en fase pre-táctica. Tendrá en cuenta la asignación del uso del espacio aéreo para determinar los encaminamientos del tráfico.
- Proveedor de información meteorológica: tendrá como principal función la previsión, observación, suministro y recogida de la información meteorológica, tanto en el aeropuerto como en espacio aéreo de ruta.

#### 1.1.4 Debilidades del sistema actual ATM

Una de las principales debilidades es la limitada interconectividad entre los sistemas de los proveedores de servicios de navegación aérea (ANSP, *Air Navigation Services Providers*) y el limitado intercambio de datos. Esto provoca que no puedan realizarse planificaciones colaborativas, evitando que se maximice la capacidad del espacio aéreo y que no se vuelen perfiles óptimos. Consecuentemente, no se consiguen los potenciales ahorros asociados en consumo de combustible y los beneficios para el medio ambiente.

Otro de los problemas es la incapacidad de planificación estratégica de vuelos. Tanto la resolución de conflictos, la evasión de regiones con meteorología adversa o zonas restringidas del espacio aéreo, suceden a nivel táctico. Estas tareas son en su mayoría gestionadas por los controladores de tráfico aéreo. Aunque existen medidas para la gestión estratégica del tráfico aéreo, se utilizan principalmente para garantizar que no se sobrepasen las capacidades de los aeropuertos y sectores del espacio aéreo.

La capacidad del espacio aéreo dependerá de la carga de trabajo del controlador, que es función del número de aeronaves y la complejidad del espacio y del tráfico aéreo. La forma de proceder, en general, para no disminuir el número de aeronaves es hacer que la carga de trabajo de los controladores se reduzca mediante la división del espacio aéreo en sectores más pequeños con menos aviones en ellos. Sin embargo, con cada división el esfuerzo necesario para coordinar el tráfico con otros sectores aumenta hasta que una nueva división del espacio aéreo se vuelva contraproducente. Por lo tanto, la única solución válida que se vislumbra para aumentar la capacidad del espacio aéreo no es reducir la carga de trabajo de los controladores mediante la utilización de sectores más pequeños, sino delegando algunas de las tareas a otros servicios o sistemas automatizados.

Si los conflictos entre trayectorias de aeronaves pudieran resolverse automáticamente en la etapa de planificación, los controladores pasarían menos tiempo en la detección y resolución táctica de conflictos. Esto los liberará para supervisar la adherencia al plan, a priori permitiéndoles hacer frente a situaciones de tráfico más complejas [81].

Además, actualmente durante la resolución táctica de conflictos, el controlador aéreo no tiene suficiente tiempo e información para decidir cuál es la maniobra de resolución de conflictos que tendrá el menor impacto en la eficiencia de vuelo. En otras palabras, si los problemas se resuelven localmente, no se puede garantizar que las soluciones sean óptimas nivel global.



## 1.2 Futuras tendencias del sistema ATM. Motivación

El transporte aéreo es un sector clave de la economía, ya que permite mantener o estimular el crecimiento económico y prestar asistencia en el suministro de servicios a las distintas comunidades. Según el “escenario más probable” el pronóstico es que en 2035 habrá 14,4 millones de vuelos en Europa, 1,5 veces el nivel de 2012 [55].

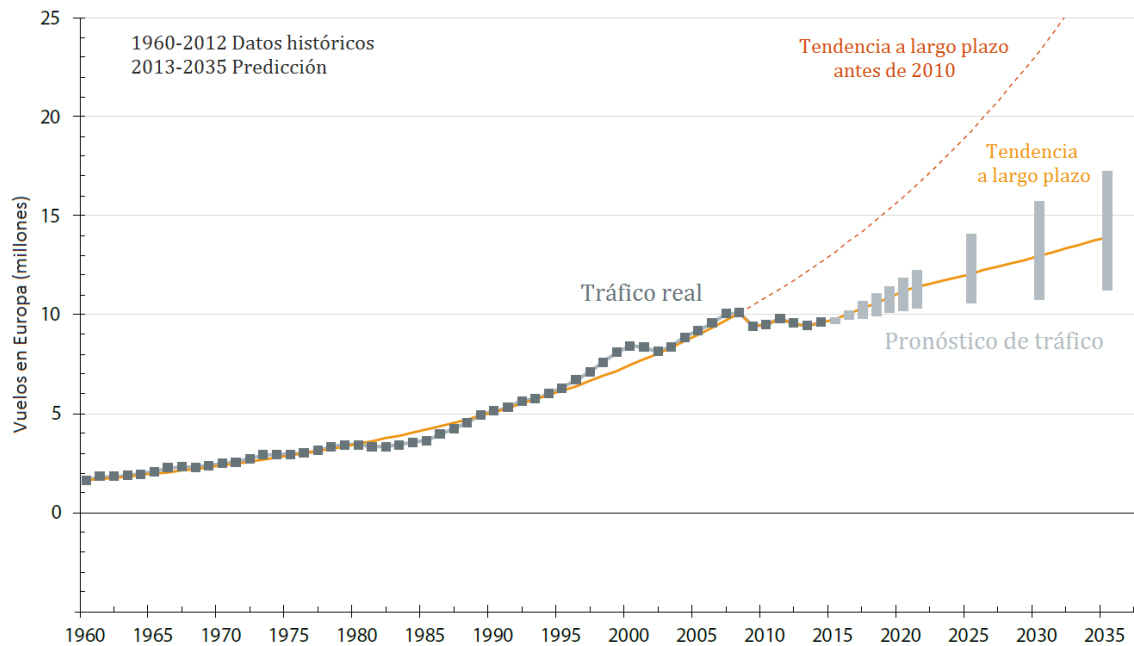


Figura 1-3 Previsión de 2012 de vuelos instrumentales en Europa [55]

En el futuro, el sistema ATM tendrá que incrementar sus niveles de automatización para poder manejar mayores niveles de complejidad y tráfico. El sistema ATM en Europa está evolucionando en torno al concepto de Operaciones Basadas en la Trayectoria (TBO, *Trajectory Based Operations*) [142], el cual se apoya en trayectorias 4D individuales que faciliten nuevos niveles de planificación, permitiendo hacer frente a situaciones más complejas. Bajo este principio, los usuarios del espacio aéreo podrán seleccionar sus trayectorias preferentes cumpliendo así con sus objetivos de coste. Dado que el concepto TBO hace que el tráfico aéreo sea mucho más predecible y flexible, permitirá mejorar la gestión de flujos, pasando de la intervención táctica a, en última instancia, la descongestión en fase estratégica.

Con este nuevo concepto los usuarios del espacio aéreo y los proveedores de servicio definirán conjuntamente, a través de un proceso de colaboración, la trayectoria de vuelo óptima [54]. Este concepto de operaciones depende de cinco características clave, recogidas en la Figura 1-4, y se apoya en la automatización avanzada.



Figura 1-4 Características clave del nuevo concepto operacional

El aumento de la previsibilidad en torno a la trayectoria, junto con el suministro de herramientas de apoyo en la toma de decisiones, que ayuden a manejar un número mucho mayor de trayectorias, permitirá aumentar la capacidad del espacio aéreo. La visión actual centrada en vuelos individuales y las acciones para separarlos tácticamente se espera que sea reemplazada progresivamente por una visión más estratégica centrada en las trayectorias, manejándolas mediante una planificación precisa y reduciendo la intervención táctica a determinadas excepciones. Esto no significa necesariamente un espacio aéreo sin restricciones y sin intervención del ATC, ya que a pesar de los esfuerzos orientados a mejorar la previsibilidad del sistema en un futuro, el comportamiento del mismo todavía estará sujeto a cierto grado de incertidumbre, por ejemplo, debido a la atmósfera, averías, o eventos inusuales.

A continuación se detallan aquellas características que tienen más relación con este estudio (las mostradas en **negrita** en la Figura 1-4).

### 1.2.1 Gestión de Trayectorias

Bajo el concepto TBO, la trayectoria planificada de los aviones se denomina trayectoria de negocio (BT, *Business Trajectory*) [54] debido a su naturaleza en forma de contrato entre el usuario del espacio aéreo y el proveedor de servicios. En el caso de los vuelos militares se llama trayectoria de misión (MT, *Mission Trajectory*).

El proceso de planificación de la trayectoria de negocio comienza cuando el usuario del espacio aéreo genera el plan de vuelo deseado y termina cuando el vuelo llega al aeropuerto de destino. Suponiendo que el usuario del espacio aéreo será la única fuente de la intención de vuelo esto garantiza el uso de trayectorias de vuelo más eficientes.

Una vez que se recogen todas las trayectorias para un día determinado, el proceso ATFCM hará ajustes en esas trayectorias con el fin de evitar que la demanda exceda la



capacidad disponible y considerar las posibles condiciones meteorológicas adversas. Para que este procedimiento funcione, las trayectorias tendrán que ser definidas con mucha exactitud en las cuatro dimensiones (3 dimensiones espaciales más tiempo) y ejecutadas con precisión. El propósito del futuro sistema ATM es permitir este proceso con un mínimo de restricciones. La herramienta principal para el desarrollo de las trayectorias de negocio será el proceso de toma de decisiones colaborativas (CDM, *Collaborative Decision Making*).

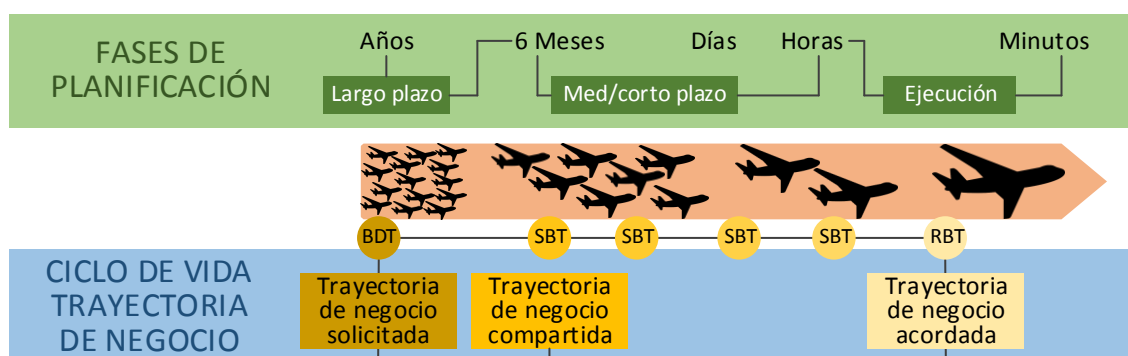


Figura 1-5 Ciclo de vida de la trayectoria de negocio

Tal y como puede observarse en la Figura 1-5, dentro de su ciclo de vida la trayectoria de negocio pasa por tres fases [139]:

- Trayectoria de negocio solicitada (BDT, *Business Development Trajectory*) es la trayectoria real solicitada por el usuario del espacio aéreo antes de obtener la trayectoria acordada. Dependiendo de la naturaleza de las operaciones de vuelo previstas, el usuario del espacio aéreo puede iniciar el proceso de planificación meses o incluso años antes de la fecha de operación, haciendo que la BDT realice una serie de iteraciones, actualizándola con respecto a las infraestructuras u otras limitaciones, pero sin el requisito de informar a otras partes interesadas. La duración de esta fase depende de las necesidades del usuario del espacio aéreo y en algunos casos, como los vuelos chárter, puede ser prácticamente inexistente.
- Trayectoria de negocio compartida (SBT, *Shared Business Trajectory*), es la trayectoria publicada para propósitos de planificación colaborativa. Cuando el usuario haya estabilizado lo suficiente la BDT, estará disponible como SBT para el sistema ATM con fines de planificación. Con información progresivamente más estable, el proveedor de servicios planificará la gestión del espacio aéreo en términos de los servicios requeridos teniendo en cuenta la complejidad y densidad del tráfico. Durante esta fase, las posibles discrepancias entre la SBT y las restricciones de red ya podrían ser detectadas y los usuarios del espacio aéreo serán notificados con una solicitud para ajustar su trayectoria de negocio. Este proceso es iterativo hasta que el resultado óptimo para los usuarios se logre teniendo debidamente en cuenta la necesidad de asegurar un rendimiento global óptimo para la red.

- Trayectoria de negocio acordada (RBT, *Reference Business Trajectory*). El proceso iterativo de las SBT conduce a esta trayectoria justo antes de la operación del vuelo, que el usuario del espacio aéreo acuerda volar y el proveedor de servicios acuerda facilitar. La RBT es el objetivo a alcanzar y será iterativamente autorizada. La mayoría de los hitos horarios que se indican en la RBT son estimaciones, sin embargo, algunos pueden ser tiempos objetivo para facilitar la planificación y algunos de ellos pueden ser limitaciones para ayudar en la gestión de colas.

El concepto TBO ofrece nuevas posibilidades en cuanto a planificación en la fase estratégica. Esto puede cubrir períodos que van desde unas pocas horas hasta unos pocos días antes de la operación.

Hoy en día hay mucha incertidumbre al ejecutar el plan. La información en la fase estratégica no será fiable para realizar una planificación precisa, independientemente de la eficacia de los modelos de planificación. Se espera que el concepto TBO proporcione el avance necesario en términos predictibilidad. En [143] se establece que la transición a TBO mejorará progresivamente la precisión y la disponibilidad de la información, tanto para la planificación como para la ejecución. Esto se logrará utilizando horas objetivo de paso (TTO, *Target Time Over*) y horas objetivo de arribada (TTA, *Target Time of Arrival*) como los principales impulsores para mejorar la previsibilidad y, en consecuencia, las áreas claves de rendimiento (KPA, *Key Performance Areas*) de eficiencia y capacidad.

### 1.2.2 Planificación Colaborativa

La planificación colaborativa se llevará a cabo a través de procesos CDM que permitirán alcanzar una solución que satisfaga a todas las partes interesadas. Para asegurar que el proceso CDM funciona como se pretende, todos los interesados deberán tener acceso a la información relevante. Para este propósito, entre otros, se define una red de Gestión de Información en el Sistema Global (SWIM, *System Wide Information Management*) [141].

La planificación colaborativa es útil para llegar a una solución aceptable para todos los interesados. Sin embargo, la solución tendrá que satisfacer un objetivo global. En este caso, la solución puede ser diferente a la que algunos usuarios del espacio aéreo deseen, por lo que deberá existir un mecanismo para buscar y evitar penalizar al mismo usuario en situaciones rutinarias y repetitivas.

### 1.2.3 Gestión de Información en el Sistema Global

El intercambio de información en el futuro sistema ATM se basará en la red SWIM integrada. De acuerdo con los planes actuales, el sistema de información futuro debe cumplir los siguientes requisitos [141]:

- Formato estandarizado para almacenar datos del mismo tipo.
- Los datos deben estar disponibles para los usuarios en el momento apropiado para los procesos de toma de decisiones.
- Los datos deben ser de alta calidad.

Los participantes en el intercambio de información serán aeronaves, centros de control, centros de operaciones aeroportuarias, centros de operaciones aéreas, servicios meteorológicos, militares, oficinas de alerta, unidades de búsqueda y salvamento, entre otros.

#### 1.2.4 Automatización Avanzada

Es un resultado demostrado y normalmente asumido que la capacidad del espacio aéreo en ruta está limitada por la carga de trabajo de los controladores [101], la cual depende principalmente del número de aeronaves, la complejidad de sus interacciones y las características del espacio aéreo.

Se necesitan pues nuevas formas de reducir la carga de trabajo del controlador si se desea aumentar la capacidad. Con el nuevo concepto operacional se espera la introducción de herramientas automáticas adicionales que se harán cargo de algunas de las tareas actuales del controlador, ayudándoles en el proceso de toma de decisiones y liberándoles de algunas acciones [139].

#### 1.2.5 Motivación

El concepto de operaciones TBO descrito proporciona un marco de oportunidad para llevar a cabo avances en el sistema ATM que actualmente no son posibles. En particular, todo lo relacionado con una mejora en la precisión de la información y disponibilidad de la misma en fase de planificación supone un cambio absoluto respecto al escenario actual, abriendo un abanico de posibilidades.

En este sentido, esta tesis considera la disponibilidad de información fiable en fase estratégica (SBT) como base para su aplicación. El concepto BT no especifica, sin embargo, el momento en que una SBT pasa a ser RBT, ni el evento o criterio que debe cumplirse para dar este paso. El presente estudio, en cuanto a su aplicación, se enmarca en la fase de transición entre la SBT y la RBT, utilizando las primeras como entradas en forma de trayectorias 4D individuales y fiables, y considerando las segundas como el resultado de un proceso de optimización multiobjetivo (considerando intereses de aerolíneas y proveedores de servicio) y de resolución de conflictos, como se detallará a continuación.

Si bien la RBT no se define necesariamente como una trayectoria libre de conflictos, este estudio incluye esta característica al ser factible y suponer un avance mayor en los beneficios esperables de una metodología semejante. La resolución de conflictos en fase estratégica actualmente no se lleva a cabo por los citados problemas en la fiabilidad de la información de plan de vuelo, pero en un escenario TBO como el que este estudio considera dicho obstáculo queda salvado (como hipótesis de partida) y se ha considerado con el fin de acercar la metodología propuesta lo más posible a un eventual escenario operacional, maximizando sus beneficios y suponiendo una nueva aproximación a la materia respecto al estado del arte.

## 1.3 Objetivos, alcance y aportación de la tesis

Bajo la perspectiva del futuro sistema ATM, uno de los factores claves para la mejora de la capacidad del sistema, de forma segura y económica, es seguir una estrategia eficiente de planificación de vuelos. Hoy día, esta es una de las principales líneas de investigación, siendo además la estrategia de negocio de las aerolíneas. Algunas aerolíneas comerciales tienen su propio sistema interno de planificación de vuelos, mientras que otros emplean servicios de planificación externos. Sin embargo, hasta el momento, estas herramientas solo cuentan con información de los propios vuelos de la compañía, sin tener en cuenta la planificación del resto de aeronaves que van a pasar por el mismo espacio aéreo en un intervalo temporal próximo. Es decir, no tienen en cuenta los posibles excesos de demanda frente a la capacidad disponible, dejando dicha tarea a la gestión de flujos de tránsito aéreo en fase pre-táctica.

El objetivo del método propuesto en este estudio es la generación en fase estratégica de las trayectorias planificadas, libres de conflictos, de un conjunto de vuelos (en un área y periodo determinado) que supongan la mejor solución global posible en base a criterios que consideren los intereses contrapuestos de distintos actores del sistema ATM.

Es importante aclarar que este estudio utiliza un conjunto masivo de datos históricos de planes de vuelo como punto de partida para la generación de planificaciones alternativas, aunque finalmente la planificación resultante estará dada por cada una de las trayectorias 4D<sup>3</sup> del conjunto de vuelos. Los datos operacionales actuales corresponden a planes de vuelo, lo que no es óbice para su uso en una metodología enmarcada dentro del concepto TBO, y la generación de una planificación conformada por trayectorias 4D.

Asumiendo como interés común garantizar la seguridad del vuelo, el propósito de cada actor del sistema ATM es distinto en la planificación de éste. Por un lado, la aerolínea apunta a reducir el coste de cada operación (reduciendo la duración del vuelo y/o el consumo de combustible) y la adherencia a las horas de escala programadas. Por otro lado, el principal objetivo del proveedor de servicios es garantizar el cumplimiento del plan de forma segura (libre de conflictos) con unos niveles asumibles de carga de trabajo de los controladores (reduciendo los desequilibrios entre capacidad y demanda), de manera eficiente (evitando excesos de capacidad disponible). La metodología propuesta combina estos intereses en forma de criterios de un problema de optimización multiobjetivo.

---

<sup>3</sup> La trayectoria 4D se genera a partir de la información de los puntos fijos, altitudes y velocidad horizontal y vertical entre cada par de fijos del plan de vuelo. En cada segmento del plan de vuelo, definido por los pares de fijos consecutivos, se extrapola un punto cada  $x$  segundos. La latitud y longitud de cada punto de la trayectoria 4D se calcula considerando velocidad constante en cada segmento del plan de vuelo. La altitud de cada punto de la trayectoria 4D se calcula extrapolando linealmente la altitud de cada par de fijos del plan de vuelo. Dado que, como se verá más adelante, este estudio es una prueba de concepto centrada en fase de crucero, se considera que esta simplificación es válida para la obtención de trayectorias 4D a partir de los planes de vuelo.

La investigación aquí presentada es una prueba de concepto sobre la planificación óptima global y sin conflictos de trayectorias de un conjunto de vuelos, en fase estratégica en un entorno TBO. El desarrollo ha sido prototipado con MATLAB (*matrix laboratory*), dividiendo el problema en cuatro módulos principales (Figura 3-2):

- Módulo 1: Generación de planificaciones alternativas a la real
- Módulo 2: Búsqueda de la planificación óptima
- Módulo 3: Resolución de conflictos
- Módulo 4: Búsqueda de la resolución óptima.

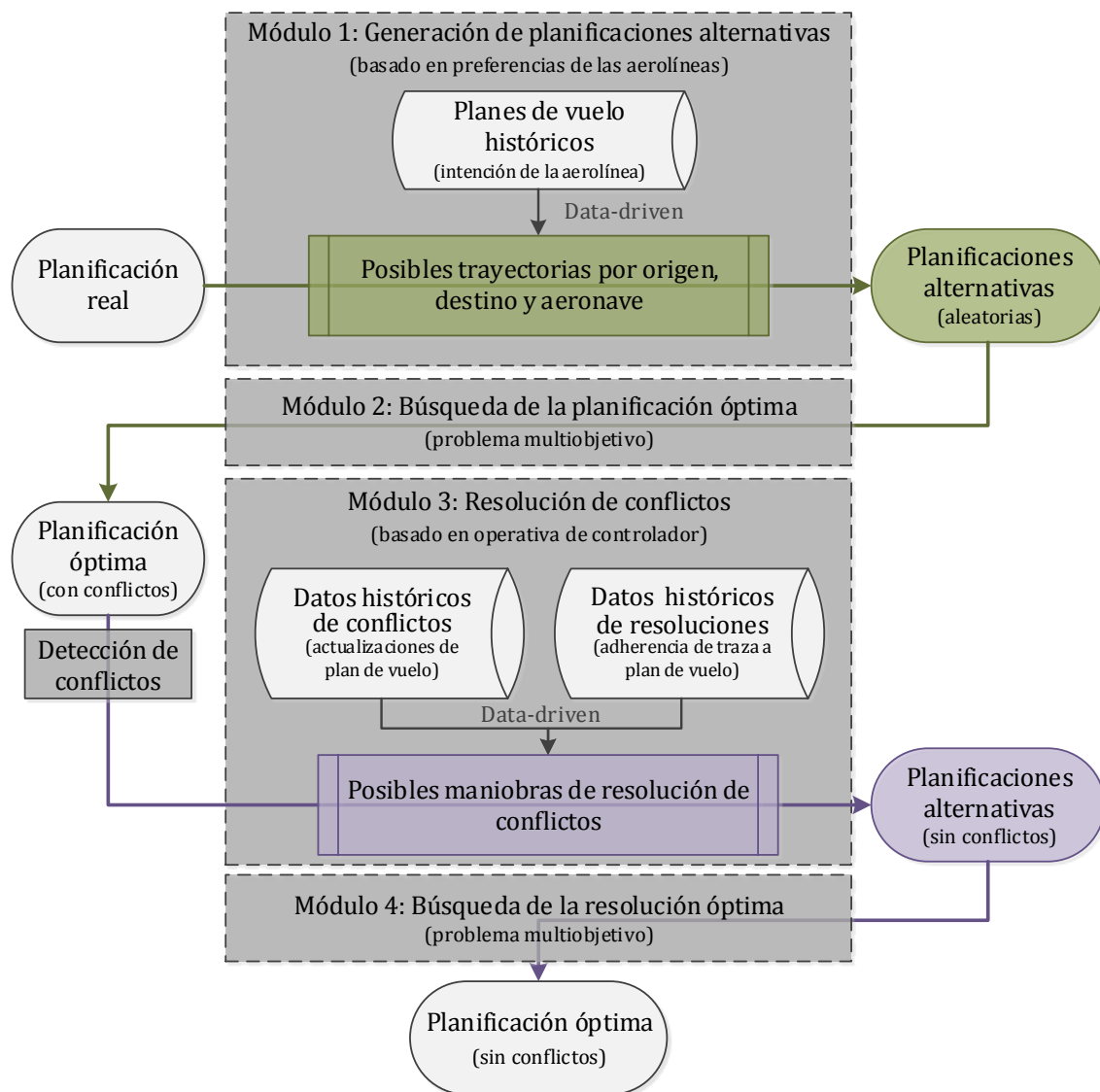


Figura 1-6 Arquitectura del prototipo de generación de planificaciones óptimas globales y sin conflictos

Partiendo de una planificación real, el módulo 1 se encargará de generar las planificaciones aleatorias, que alimentarán al módulo 2, de búsqueda de la planificación óptima en fase estratégica. Para ello, se basará en las preferencias de las aerolíneas

(obtenidas con una aproximación *data-driven*<sup>4</sup> que analiza los planes de vuelo emitidos por las aerolíneas para más de cuatro millones y medio de vuelos). La descripción detallada del desarrollo de este primer módulo se recoge en la sección 3.2. El módulo 2, de búsqueda de la planificación óptima, recurre a un proceso iterativo, basado en algoritmos evolutivos, que permite obtener una planificación óptima considerando un problema multiobjetivo, cuyo detalle se recoge en la sección 3.3. La aplicación de estos dos primeros módulos generará una planificación óptima global, pero aún con conflictos, los cuales serán resueltos tras la aplicación del módulo 3 y el módulo 4.

Tras la detección de los potenciales conflictos de la planificación óptima anterior, resultante de aplicar los módulos 1 y 2, se aplicará el módulo 3, para la resolución de dichos conflictos. La resolución de conflictos aquí aplicada se basará en las acciones reales realizadas por los controladores de tráfico aéreo en la fase táctica, obtenidas en un proceso *data-driven* que analizan alrededor de 18.000 conflictos reales, cuyo desarrollo se recoge en la sección 4.2. Finalmente el módulo 4, de búsqueda de la resolución óptima, examina las posibles maniobras de resolución de cada conflicto para identificar cual es la resolución óptima. La descripción detallada del desarrollo de este último módulo se recoge en la sección 4.3.

En esta tesis, se contribuye al área de gestión de tránsito aéreo en el marco del futuro paradigma ATM. Más precisamente, se introduce una metodológica de planificación de un conjunto de vuelos, libres de conflictos, teniendo en cuenta los intereses contrapuestos de distintos actores del sistema ATM. El uso de una metodología común de generación de planificaciones que tenga en cuenta no sólo los factores que afectan al coste de cada vuelo individual sino el tráfico real (y por tanto la influencia de unas trayectorias en otras) se considera, como hipótesis de partida, beneficiaria al sistema ATM al tratar a este desde un punto de vista holístico.

Se considera que la metodología propuesta es de interés para el personal operacional a cargo de la planificación estratégica (servicio ATFCM), siendo de aplicación desde días a horas antes de la operación. Por ello, la metodología no está concebida para su uso táctico por parte de controladores. Esta metodología es asimismo compatible con el esquema de planificación continua por capas definida en plan maestro de SESAR<sup>5</sup> (ATM *Master Plan* [142]), al ser de aplicación en entornos tanto locales, como subregionales o de red.

---

<sup>4</sup> Término inglés que se refiere al modelado basado en los datos.

<sup>5</sup> <http://www.sesarju.eu/>

## 1.4 Estructura de la tesis

En la presente tesis se afrontan dos problemas. El primero, la búsqueda de una planificación óptima (de un conjunto de vuelos) considerando tanto los requisitos de las compañías aéreas, minimizando el consumo de combustible, como del proveedor de servicios, cuya necesidad es cumplir el plan con unos niveles asumibles de carga de trabajo de los controladores (minimizando los desequilibrios entre capacidad y demanda).

El segundo problema es la resolución de conflictos. A la planificación óptima anterior (basada en términos de consumo de combustible, adherencia a horas programadas y capacidad) se le añade este nuevo objetivo. Para ello se desarrollará una metodología capaz de proporcionar una planificación libre de conflictos, basándose en un modelo *data-driven* usando un vasto conjunto de datos operacionales de resolución de conflictos ATC, capturando así el comportamiento de los controladores en situaciones de conflicto.

Las partes restantes de esta tesis se organizan de la siguiente manera. En el Capítulo 2 se analizan trabajos previos relacionados con la planificación de vuelos, la optimización en entornos multiobjetivo y la resolución de conflictos de aeronaves. En el Capítulo 3 se establece el marco matemático utilizado para resolver el problema de planificación óptima de trayectorias en fase estratégica. Para hacer frente al problema, se utiliza en primer lugar una metodología *data-driven* con una gran cantidad de planes de vuelos que representan la intención de las compañías aéreas. En segundo lugar, se ha desarrollado un proceso de optimización multiobjetivo que tiene en consideración los requisitos de los distintos actores del sistema ATM. En el Capítulo 4 se presenta el marco matemático utilizado para resolver el problema de resolución de conflictos en fase de planificación, considerando el conjunto de planes de vuelo optimizados en la fase anterior. El objetivo final es obtener una planificación óptima sin conflictos que integre el conocimiento del controlador de tráfico aéreo. En el Capítulo 5 se presenta la validación de la metodología desarrollada, a través de su aplicación a distintos escenarios con datos reales, así como la presentación de los resultados de dicha aplicación. Finalmente, se presentan las conclusiones en el Capítulo 6.

## Capítulo 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

---

En la presente tesis, para obtener una planificación estratégica primero se desarrolla un generador de planificaciones alternativas basándose en las preferencias de las aerolíneas. Para ello se utiliza un proceso *data-driven* que analiza los planes de vuelo emitidos por las aerolíneas para más de cuatro millones de vuelos (tres años de datos). Por esta razón, en la sección 2.1 se hace una revisión de los trabajos previos que constituyen el estado del arte de optimización de trayectorias individuales de aeronaves, así como un resumen de las herramientas comerciales utilizadas por las aerolíneas para planificar sus vuelos.

En segundo lugar, la búsqueda de la planificación óptima tiene en cuenta la influencia de unas trayectorias en otras y los intereses contrapuestos de distintos actores del sistema ATM. Por esto, en la sección 2.2 se hace una revisión de las técnicas de resolución de problemas de optimización multiobjetivo.

Por último, en la sección 2.3, se revisan las distintas estrategias consideradas para la resolución de conflictos. Se prestará especial atención a las maniobras de resolución consideradas y a los métodos utilizados para generar trayectorias libres de conflictos.

### 2.1 Planificación de vuelo

El proceso de producir el plan de vuelo que describe la trayectoria de una aeronave determinada se llama planificación de vuelo. Si bien los cálculos del plan de vuelo son necesarios para la seguridad y el cumplimiento normativo, también proporcionan a las aerolíneas una oportunidad de minimizar los costes.

Producir un plan de vuelo seguro y económico requiere millones de cálculos, para lo cual algunas aerolíneas comerciales tienen su propio sistema interno de planificación de vuelo, mientras que otras emplean los servicios de planificadores externos.

El desarrollo de métodos numéricos para la optimización de trayectorias comenzó en los años 1950 con el desarrollo de la computación digital, al proporcionar herramientas capaces de resolver este problema. A medida que la capacidad computacional iba ampliándose, la complejidad de los modelos considerados fue aumentando.



### 2.1.1 Problema de control óptimo

La estrategia más completa para abordar el problema de planificación de vuelos es resolver un ejercicio de optimización de la trayectoria 4D. Esta cuestión ha sido ampliamente estudiada como un problema de control óptimo de un sistema dinámico.

El problema de navegación de Zermelo [166], 1931, fue el primer ejercicio de control óptimo planteado, con el fin de encontrar el mejor camino de un barco en presencia de fuertes corrientes. Bryson y Ho [21] desarrollaron una solución llamada NOC (*Neighbouring Optimal Control*) para llegar a una solución del problema de Zermelo. Jardin y Bryson [84] ampliaron la técnica NOC para calcular recorridos de tiempo mínimo modelando vientos a lo largo de una trayectoria nominalmente lineal como estados adicionales del sistema, avance al que denominaron NOWR (*Neighboring Optimal Wind Routing*). En 2010, de nuevo Jardin y Bryson [83] describieron dos métodos para resolver una trayectoria de tiempo mínima de vuelo a gran altitud en presencia de fuertes vientos horizontales. Otros trabajos de investigación sobre optimización de trayectorias de aeronaves utilizando control óptimo fueron realizados por Pargett y Ardema [117], Betts y Cramer [19] y Wu y Zhao [161]. Los problemas en los que la secuencia de las fases es conocida han sido resueltos con frecuencia en ingeniería aeroespacial como problemas de múltiples fases [74][85][127][129].

La optimización de la fase de crucero del vuelo ha sido extensamente tratada en la literatura, con algunos de los trabajos considerando incluso una velocidad constante durante todo el vuelo. Algunos de estos estudios fueron los realizados por Irons et al. [80], Schultz y Zagalsky [137], Speyer [148][149] y Schultz [138]. También ha habido una mención constante en la literatura acerca de la eficiencia del consumo de combustible para vuelos periódicos [27][65][131]. En el estudio de Menon [104] se permitía que tanto la velocidad como la altura variaran; Miele [106] y Torenbeek analizaron el problema a altitud constante teniendo en cuenta el caso de velocidad casi fija. En [118] se considera un modelo simple de aeronave definido por una polar parabólica de coeficientes constantes y un solo valor de altitud. Rivas y Valenzuela [124] generalizan este análisis considerando una polar genérica, para tener en cuenta los efectos de compresibilidad.

Las fases de ascenso y descenso también han sido ampliamente estudiadas y se han propuesto estrategias de optimización de las mismas. Neuman [109] presentó el cálculo de trayectorias de mínimo consumo para varios tipos de aviones comerciales cerca del área terminal. Por su parte, Erzberger y Lee [52] estudiaron las características de las trayectorias óptimas de rango fijo cuya estructura está restringida a segmentos de ascenso, crucero constante y descenso, utilizando la teoría de control óptimo. En 2002, Clarke et al. [29] diseñan y testean un procedimiento de aproximación de descenso continuo (CDA, *Continuous Descent Approach*). Desde 2002, se han realizado investigaciones relevantes para estudiar las implementaciones prácticas de CDA, sus variaciones y comparaciones con los procedimientos actuales y su eficiencia [50][70][126][144][158][159].

Teniendo en cuenta la trayectoria global, el problema de minimización de los costes directos de operación (DOC, *Direct Operating Cost*, una suma de los costes del combustible y del tiempo) ha sido estudiado por Barman y Erzberger [10], Erzberger y Lee [51], Sorensen y Waters [147], y Burrows [23]; los cuales consideran crucero y la masa del avión constantes. En [22] Burrows no considera la masa constante pero asume que el segmento de crucero se da en la estratosfera.

Actualmente la trayectoria óptima 4D no es factible en la práctica, debido a las restricciones de control de tráfico aéreo y de diseño del espacio aéreo: por ejemplo, sólo se permite un conjunto discreto de altitudes de vuelo y el avión sólo puede cambiar la altitud, dirección y velocidad en ciertos fijos validados. Se han realizado igualmente trabajos que han tomado en consideración las reglas ATC, tales como los descritos a continuación. Betts y Cramer [18] aplicaron la técnica de transcripción directa, que combina optimización no lineal y discretización de la dinámica de la trayectoria, con el diseño óptimo de trayectorias sujeto a restricciones realistas que representan las fases de la trayectoria de un perfil de vuelo. Soler et al. [145] relajaron algunas de las limitaciones impuestas en los trabajos de Betts y Cramer para dar planificaciones más eficientes, formulando un ejercicio de control óptimo resuelto como un problema de optimización no lineal. Wu y Zhao [160] realizaron una optimización de los procedimientos actuales de un vuelo, formulando un problema de optimización paramétrica para minimizar el tiempo de vuelo y el consumo de combustible, cuantificando las desviaciones con las trayectorias reales debidas a errores de modelado o de las condiciones del vuelo.

### 2.1.2 Descomposición del problema de optimización de la trayectoria 4D

Debido a la complejidad computacional del problema de optimización 4D, es común en la práctica [7][66][110][165] dividirlo en dos sub-problemas. La primera fase es la planificación horizontal, en la que se busca una trayectoria en la superficie terrestre que conecte el origen y el destino. La segunda fase es de planificación vertical, en la que se le asigna a cada segmento que compone la trayectoria horizontal un nivel de vuelo y una velocidad, de manera que se minimice el consumo de combustible y se cumplan las limitaciones temporales.

Los enfoques para resolver el problema de optimización de la trayectoria horizontal incluyen la optimización de la red basado en algoritmos de Dijkstra [42], enfoques de optimización lineal entera mixta [12][13], o algoritmos evolutivos [58][69][163].

Para mejorar el perfil vertical Liden [95] estudió la variación de la altitud óptima a medida que se quema el combustible durante el vuelo. Lovegren [98] analizó cómo la combustión de combustible podría reducirse durante la fase de crucero al elegir las altitudes y velocidades de crucero apropiadas y realizar subidas escalonadas. Murrieta [108] presentó un algoritmo que optimiza las trayectorias verticales y horizontales teniendo en cuenta el viento, así como la variación del índice de coste. Gagné [62] realizó una exhaustiva investigación de todas las velocidades y altitudes posibles para obtener la trayectoria óptima y reducir el consumo de combustible. Kent y Richards [87] utilizaron

dos métodos diferentes: una ampliación del problema de Fermat-Torricelli que permitía encontrar formas óptimas para muchas rutas y un método geométrico para obtener la influencia del viento. Turgut y Rosen [154] aplicaron algoritmos genéticos para obtener el descenso óptimo en términos de los valores de consumo de combustible y altitudes para reducir el coste global de descenso. Kanury y Song [86] emplearon algoritmos genéticos para buscar la trayectoria óptima bajo la presencia de obstáculos desconocidos, obteniendo resultados satisfactorios en un tiempo de cálculo reducido. Kouba [91] estudió los algoritmos genéticos como un medio para incorporar varias restricciones en un problema de optimización de la trayectoria, donde el objetivo era encontrar la ruta más corta considerando diferentes restricciones.

### 2.1.3 Herramientas comerciales de planificación de vuelos

En 1951, Dixon Speas fundó la empresa homónima que se convertiría en la firma de consultoría de aviación más exitosa del mundo, creando una organización capaz de responder a las necesidades crecientes y diversas de esta industria internacional. Su firma prestó servicios a la mayoría de las principales aerolíneas y compañías aéreas regionales de Estados Unidos. A mediados de la década de 1960, su organización desarrolló la primera herramienta computerizada de planificación de vuelos intercontinentales, la cual no sólo redujo el tiempo necesario para planificar el vuelo, sino que consiguió tiempos de vuelo más cortos con una reducción significativa en los costes. Otro de sus servicios planificaba rutas para vuelos sobre el océano Atlántico que minimizaban el tiempo, para lo cual se usaba programación dinámica discreta dividiendo la trayectoria en distintas regiones.

En la década de 1970, Lou Reinkins lanzó un servicio de planificación de vuelos para aerolíneas y aviones privados en Estados Unidos. A partir de la década de 1980, Jeppesen JetPlan hizo lo mismo para las compañías aéreas y pilotos privados incluyendo vuelos internacionales.

En la planificación de vuelo de aviones comerciales, el enfoque más comúnmente utilizado se basa en la descomposición del problema en optimización de ruta 2D y optimización de perfil y velocidad, aproximación en la que las aerolíneas confían para calcular sus planes de vuelo a diario. Algunos proveedores comerciales actuales son Jeppesen JetPlanner<sup>6</sup> y los servicios de planificación de vuelos LIDO<sup>7</sup> de Lufthansa para aerolíneas.

---

<sup>6</sup> <http://ww1.jeppesen.com/industry-solutions/aviation/business/jetplanner.jsp>

<sup>7</sup> <https://www.lhsystems.com/>

## 2.2 Optimización multiobjetivo

La implementación de trayectorias óptimas individuales, en términos de ahorro de combustible, debe ser probada y comparada con otros indicadores de rendimiento clave del sistema ATM, como la seguridad y la capacidad. Esta tesis se centra en la búsqueda de una planificación óptima, sin considerar la trayectoria de cada vuelo de forma aislada, sino tratando todos los vuelos en una región específica de forma conjunta.

El uso de una metodología de planificación que considere los vuelos como un conjunto permite tener en cuenta los intereses contrapuestos de distintos actores del sistema ATM, reduciendo los costes globales de operación, aumentando la adherencia a los tiempos de escala programados, minimizando los desequilibrios entre capacidad y demanda y eliminando (o al menos reduciendo) los conflictos. Para abordar esta cuestión es necesario resolver problemas de optimización multiobjetivo.

Un problema de optimización multiobjetivo (MOP, *Multiobjective Optimization Problem*) es un ejercicio que tiene dos o más criterios que se deben optimizar simultáneamente. Es importante mencionar que puede haber restricciones impuestas a los objetivos. También es importante destacar que frecuentemente los objetivos del MOP están en conflicto entre sí. Si no fuera así, existiría una única solución para el MOP, porque los objetivos se podrían optimizar uno por uno, en orden secuencial para encontrar esta única solución, en cuyo caso no se requeriría de diferentes herramientas matemáticas y algorítmicas para resolverlo.

La noción de "optimalidad" cambia cuando se trata de problemas de optimización multiobjetivo. Esta nueva noción de optimalidad fue originalmente introducida por Francis Ysidro Edgeworth en 1881 [49] y posteriormente generalizada por Vilfredo Pareto en 1896 [116], y se denomina Edgeworth-Pareto óptimo o simplemente "Pareto óptimo". Esta definición dice que una solución a un MOP es Pareto óptima si no existe otra solución factible que disminuya algún criterio sin causar un aumento simultáneo en al menos otro criterio. El uso de este concepto casi siempre resulta en un conjunto de soluciones en lugar de una única solución óptima, que se denomina el "frente de Pareto" [32].

En la bibliografía se pueden encontrar diferentes técnicas de resolución de los problemas multiobjetivo. En [33] Coello las dividió en dos grupos: i) técnicas no basadas en Pareto; y ii) técnicas basadas en Pareto.

La principal ventaja de las técnicas no basadas en Pareto es la sencillez a la hora de aplicarlas, al tratarse de técnicas simplistas de abordar los problemas multiobjetivo. Por ello se introdujo el enfoque basándose en la dominancia de Pareto, el cual permite realizar la optimización de una manera integral, teniendo en cuenta todos los objetivos al mismo tiempo, e incluyéndolos en heurísticas que permiten realizar una optimización eficiente del problema.

En esta tesis se abordarán dos problemas multiobjetivo. El primero, consiste en obtener una planificación óptima global considerando los objetivos de los distintos actores del sistema ATM, problema en el que debido a su complejidad es necesario el empleo de técnicas basadas en la dominancia de Pareto. El segundo consiste en encontrar la solución óptima a determinados conflictos sobre los que se propone una serie de posibles maniobras de resolución, para el cual se utilizará una técnica no basada en Pareto.

### 2.2.1 Técnicas no basadas en Pareto

A esta categoría pertenecen aquellas técnicas que no tienen su fundamento en el concepto de Pareto óptimo. En estas técnicas se realiza o bien una agregación de los diferentes objetivos, conformando una única función objetivo que es la que se optimiza, o bien se aborda el problema optimizando los objetivos uno a uno teniendo en cuenta el resto de objetivos como restricciones.

Algunos de las técnicas más populares en esta categoría se detallan a continuación:

#### Agregación de objetivos

Este método consiste en agregar todas las funciones objetivo (de diversas formas) en una sola función, que posteriormente es minimizada o maximizada según el problema abordado. Esto implica que el problema con objetivos múltiples se transforma en un problema de optimización monobjetivo.

Es una aproximación muy simple y sencilla de implementar, que sin embargo no genera soluciones óptimas de Pareto en presencia de espacios de búsqueda no convexos [88].

#### Método de programación por metas

La programación por metas, empleada como técnica de decisión multicriterio fue introducida en 1961 por Charnes y Cooper [25] e Ijiri [79] en 1965, para modelos lineales, jugando un papel clave en la aplicación a problemas industriales. En este método se deben asignar los objetivos o metas que se deseen alcanzar para cada una de las funciones objetivo, los cuales se incorporan en la formulación del problema como restricciones adicionales. La técnica tratará entonces de minimizar las desviaciones absolutas de cada función objetivo con respecto a lo deseado.

La principal ventaja de estas técnicas es su simplicidad y su eficiencia computacional, ya que no se requiere realizar una jerarquización de Pareto. Sin embargo para problemas con objetivos no lineales será más eficiente el uso de otras técnicas.

#### Método de las restricciones $\varepsilon$

Este método se basa en la minimización de una función objetivo, considerando los demás objetivos como restricciones acotadas por ciertos niveles permisibles  $\varepsilon_i$ . Esta aproximación fue sugerida por Ritzel y Wayland [123] como una forma sencilla de resolver problemas multiobjetivo.

### VEGA (Vector Evaluated Genetic Algorithm)

La primera implementación de lo que se conoce actualmente como algoritmos evolutivos multiobjetivo (MOEAs, *Multiobjective Evolutionary Algorithms*) fue VEGA (*Vector Evaluation Genetic Algorithm*), introducida por Schaffer [136] a mediados de 1980, siendo su principal aportación la resolución de problemas de inteligencia artificial. VEGA consiste en un algoritmo genético con una modificación en el mecanismo de selección, donde en cada iteración se genera un número de subpoblaciones de acuerdo a una selección proporcional a cada una de las funciones objetivo. Sin embargo, la aproximación que se hace no tiene en cuenta el concepto de óptimo de Pareto.

La ventaja de esta técnica es su facilidad de implementación y su eficiencia, y su principal desventaja es que si se usa una selección proporcional es equivalente a una combinación lineal de pesos. Además no incorpora el concepto de dominancia de Pareto.

### Ordenamiento Lexicográfico

En este método, los objetivos a optimizar deben ser jerarquizados. La solución óptima se obtiene minimizando (o maximizando) las funciones objetivo por separado, empezando con la más importante y procediendo de acuerdo con el orden de importancia asignado a cada uno de los objetivos.

Su principal debilidad radica en que tiende a favorecer unos objetivos determinados, haciendo que la población converja a una parte particular del frente de Pareto en lugar de delinearla completamente [34].

### Algoritmos Minimax

La idea de indicar el óptimo de Minimax y aplicarlo a MOP parte de la teoría de juegos, que trata de resolver situaciones conflictivas. El enfoque de Minimax a un modelo lineal fue propuesto por Jutler y Solich en 1967, y fue desarrollado más adelante por Osyczka [113], Rao [122] y Tseng y Lu [153].

La técnica del óptimo Minimax compara las desviaciones relativas de los mínimos deseados por separado. Uno de los problemas de aplicar esta técnica es que todas las funciones objetivo tienen el mismo peso, por tanto no se puede establecer una prioridad en el cumplimiento de los mismos.

## 2.2.2 Técnicas basadas en Pareto. Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo.

El enfoque basándose en dominancia de Pareto permite realizar la optimización de una manera integral. El número de técnicas es muy variado, pudiéndose realizar una primera agrupación en función de la metaheurística mediante la cual se realiza la optimización. El primer grupo está basado en algoritmos bioinspirados, todos ellos poblacionales, entre los que destacan los algoritmos genéticos multiobjetivo MOEAs; y un segundo grupo basado en técnicas de recocido simulado (*Simulated Annealing*).

La introducción directa del concepto de optimalidad de Pareto en un algoritmo evolutivo fue sugerida por David E. Goldberg en su libro sobre algoritmos genéticos [63]. Para resolver algunos de los problemas derivados del uso de VEGA, Goldberg sugirió el uso de una clasificación y selección no dominadas para mover a una población hacia el frente de Pareto en un problema de optimización multiobjetivo. La idea básica es encontrar el conjunto de soluciones en la población que son no dominadas por el resto de la población, asignándoles la jerarquía más alta y eliminándolas de la población. Se procede de la misma forma con el resto de cadenas, hasta que todos los elementos de la población quedan jerarquizados.

Goldberg [63] no proporcionó una implementación real de su procedimiento, pero prácticamente todos los MOEAs desarrollados después de la publicación de su libro fueron influenciados por sus ideas. Desde la segunda mitad de los años 80 se han venido desarrollando multitud de MOEAs, pero no fue hasta la década de los 90 cuando comenzó a tratarse el problema con la óptica de Pareto. En los últimos años se ha publicado un número muy elevado de referencias (tanto artículos, capítulos de libros, conferencias...) empleando algoritmos evolutivos en problemas multiobjetivo.

A continuación se describen, cronológicamente, los algoritmos más destacados en el campo de los MOEAs. Coello en una de sus revisiones [32] establece una diferencia entre las tres primeras técnicas (MOGA, NSGA y NPGA) a las que llama técnicas de primera generación y las restantes, llamadas de segunda generación. La segunda generación de MOEAs comenzó cuando el elitismo se convirtió en un mecanismo estándar, en búsqueda de una mayor eficiencia de las técnicas, reduciendo tiempos de computación y mejorando la forma del frente de Pareto. Se ha podido demostrar que el uso de elitismo es necesario para garantizar la convergencia de un algoritmo evolutivo multiobjetivo al verdadero frente de Pareto [130].

#### MOGA (Multiobjective Genetic Algorithm)

En 1993 Fonseca y Fleming [60] propusieron la primera técnica evolutiva tras la jerarquización de Pareto propuesta por Goldberg, en la cual el rango de un individuo determinado corresponde al número de cromosomas en la población actual por la cual es dominado. MOGA es una buena técnica, eficiente y relativamente fácil de implementar, aunque, al igual que todas las demás técnicas de jerarquización de Pareto, su desempeño depende en gran medida de una selección adecuada del factor de reparto de aptitud.

Tras su aparición, se realizaron algunos esfuerzos para utilizar MOGA hibridado con redes neuronales [45] y agregando elitismo [46], aunque es una técnica que ha sido claramente desplazada por la segunda generación de MOEAs.

#### NSGA (Nondominated Sorting Genetic Algorithm)

Esta técnica fue propuesta por Srinivas y Deb en 1994 [150], y se basa en el uso de varias capas de clasificación de los individuos.



Antes de realizar la selección, la población se categoriza con un valor de aptitud simulado, que es proporcional al tamaño de la población. Para mantener la diversidad de la población, estos individuos clasificados se comparten con sus valores de aptitud ficticia. Después, este grupo de individuos es ignorado y se considera otra capa de individuos no dominados. El proceso continúa hasta que todos los individuos en la población se clasifican. Puesto que los individuos en el primer frente tienen el valor máximo de la aptitud, consiguen siempre más peso que el resto de la población.

#### *NPGA (Niche-Pareto Genetic Algorithm)*

En 1994 Horn, Nafpliotis y Goldberg [71] propusieron NPGA, una técnica basada en la selección mediante una competición entre individuos. Consiste en seleccionar aleatoriamente dos individuos que son comparados con un subconjunto de toda la población. Si uno de ellos está dominado (por los individuos elegidos al azar de la población) y el otro no, entonces el individuo no dominado gana. Cuando hay empate, el resultado del torneo se decide a través del intercambio de aptitud.

Sin embargo, además de requerir un factor de repartición de aptitud (que hay que asignar), esta técnica también precisa que se elija cuidadosamente el tamaño de la competición, ya que de él depende en gran medida su desarrollo.

#### *SPEA (Strength Pareto Evolutionary Algorithm)*

Este algoritmo fue introducido por Zitzler y Thiele [168] en 1998 y su enfoque fue concebido como un camino para integrar las diferentes técnicas de primera generación, intentando combinar las mejores características de cada una de ellas.

SPEA utiliza un archivo que contiene soluciones no dominadas encontradas previamente (un conjunto no dominado externo). En cada generación, los individuos no dominados son copiados al conjunto externo no dominado. Para cada individuo en este conjunto externo, se calcula un valor de resistencia.

#### *PAES (Pareto Archived Evolution Strategy)*

Este algoritmo fue introducido por Knowles y Corne [90] en 1999. Un aspecto interesante del mismo es el método utilizado para mantener la diversidad que consiste en un procedimiento de apilamiento que divide el espacio objetivo de una manera recursiva. Cada solución se coloca en una cierta ubicación de la red basada en los valores de sus objetivos (que se utilizan como sus "coordenadas" o "ubicación geográfica"). Dado que el procedimiento es adaptativo, no se requieren parámetros adicionales (excepto el número de divisiones del espacio objetivo).

#### *NSGA-II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm II)*

Una versión mejorada de la técnica NSGA se publicó en 2000 por Deb et al. [38][39]. En este algoritmo para cada solución se tiene que determinar cuántas soluciones lo dominan y el conjunto de soluciones a las que domina. En NSGA-II se estima la densidad de soluciones que rodean una solución particular en la población, calculando la distancia



media de dos puntos a cada lado de este punto a lo largo de cada uno de los objetivos del problema. Este valor es la llamada distancia de apilamiento. Durante la selección, NSGA-II utiliza un operador de apilamiento que toma en consideración el rango de no dominancia de un individuo en la población y su distancia de apilamiento (es decir, se prefieren soluciones no dominadas sobre soluciones dominadas, pero entre dos soluciones con la misma no dominancia se prefiere la que reside en la región menos concurrida).

El NSGA-II no utiliza una memoria externa como los otros MOEAs discutidos anteriormente. En cambio, el mecanismo elitista de la NSGA-II consiste en combinar los mejores padres con la mejor descendencia obtenida. Debido a sus mecanismos inteligentes, el NSGA-II es mucho más eficiente (desde un punto de vista computacional) que su predecesor, y su rendimiento es tan bueno que se ha vuelto muy popular en los últimos años, convirtiéndose en un hito frente a otros MOEAs.

La mayoría de MOEAs en distintas áreas de investigación y de aplicación comparten aproximadamente el mismo marco que el del algoritmo NSGA-II: un operador de selección basado en la dominación de Pareto y un operador de reproducción que son utilizados iterativamente [167].

#### *SPEA-II (Strength Pareto Evolutionary Algorithm II)*

Posteriormente vería la luz SPEA-II, desarrollada por Zitzler, Laumanns y Thiele [169] en 2001, que tiene tres diferencias fundamentales con respecto a su predecesor SPEA: la incorporación de una mejora de la estrategia empleada para asignar la aptitud de cada individuo de la población, el uso de una técnica para estimar la densidad de vecinos de una determinada solución que guía la búsqueda de una manera más eficiente, y el uso de un esquema de truncamiento de archivos que garantiza la preservación de soluciones del frente de Pareto.

Muchos otros algoritmos se han propuesto durante la segunda generación de MOEAs en los que los investigadores han adoptado técnicas de agrupamiento [107], entropía [89], y enfoques geométricos [157], entre otros mecanismos. La dominancia se ha vuelto cada vez más popular, no sólo por su eficacia, sino también por su sólida fundamentación teórica [93]. También se publicaron nuevos estudios sobre la optimización evolutiva multiobjetivo, así como varios libros monográficos [35][36][37][115][152].

Todos estos algoritmos han sido la semilla para generar una extensa literatura: A fecha de enero de 2017, se han publicado más de 10500 publicaciones sobre MOEA<sup>8</sup>. Entre estos trabajos, más del 50% se ha publicado en los últimos ocho años, el 46% son publicaciones en revistas y el 37% son publicaciones en conferencias.

---

<sup>8</sup> Estos datos estadísticos se basan en el repositorio de artículos de la web: <http://delta.cs.cinvestav.mx/~ccoello/EMOO/>

Ello da una muestra de la popularidad y rango de aplicación de estas técnicas. Es importante reseñar que en los últimos años los trabajos de investigación sobre MOEAs han explorado diferentes aspectos, ya sea centrándose en desarrollos teóricos [8][24][31] o aplicados [17][20], en métodos especiales para problemas multiobjetivo, (como el citado recocido simulado [3][9], la optimización de enjambre de partículas (PSO, *Particle Swarm Optimization*) [15][26] y los algoritmos meméticos [28][99]), y finalmente un gran número se centra en aplicaciones específicas de ciertos dominios y de difícil extrapolación a otros, tales como problemas de ingeniería [4][5][6] o problemas económicos y financieros [2][120].

## 2.3 Resolución de conflictos

En la literatura se pueden encontrar diversas aproximaciones para automatizar la detección y resolución de conflictos de tráfico aéreo. Kuchar y Yang [92] realizaron una recopilación sesenta y ocho métodos diferentes. Xiangmin et al. [162] presentaron una aproximación basada en un algoritmo memético con enfoque estratégico para evitar conflictos. Valenzuela y Rivas [155] ofrecieron un método para la detección y resolución de conflictos basado en el uso de patrones de trayectoria predefinidos. Matsuno et al. [103] propusieron un método de control estocástico casi óptimo para determinar las trayectorias de resolución de conflictos de aeronaves en presencia de incertidumbre en tiempo real. Durand y Barnier [47] experimentaron con un algoritmo derivado de la robótica para defender el control centralizado del tráfico aéreo.

También se han estudiado ampliamente enfoques óptimos de resolución de conflictos, centrándose en diferentes objetivos. Frazzoli et al. [61] analizaron la resolución de conflictos involucrando más de una aeronave presentando una metodología en la que cada aeronave propone su rumbo deseado, mientras que una autoridad centralizada resuelve cualquier conflicto que pueda surgir entre ellas. Clements [30] investigó el problema con formulación de control óptimo e incorporó un objetivo de desviación de tiempo mínimo. Raghunathan et al. [121] examinaron las estrategias de optimización dinámica para la resolución tridimensional de conflictos de múltiples aeronaves utilizando métodos de optimización de la trayectoria numérica. Hu et al. [72] analizaron las maniobras libres de conflictos para identificar la que minimiza una determinada función de coste. Green y Grace [64] describieron el concepto de una herramienta para ayudar a los controladores de tránsito aéreo a planificar estrategias eficaces de separación, reduciendo la carga de trabajo y el consumo de combustible.

En diferentes estudios se tiene en cuenta el conocimiento de los controladores de tránsito aéreo. Isaacson y Robinson [81] presentaron un proceso de resolución de conflictos basado en el conocimiento de los controladores, permitiendo que los conflictos previstos sean resueltos de una manera que sea consistente con la práctica común ATC. Flicker y Fricke [59] utilizaron el conocimiento de los controladores de tránsito aéreo para aumentar la aceptación de los sistemas de resolución de conflictos.

La resolución de conflictos en fase de planificación también se ha considerado en otros estudios. Huang y Tomlin [73] generaron planes libres de conflictos mientras minimizaban el tiempo total de tránsito de aviones en sectores respecto al plan de vuelo nominal. Yokoyama [164] propuso un algoritmo descentralizado de control predictivo de modelos para la planificación de trayectorias tridimensionales libres de conflictos para múltiples aeronaves.

## Capítulo 3. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROBLEMA DE PLANIFICACIÓN ÓPTIMA GLOBAL

---

En este capítulo se establece el marco matemático utilizado para resolver el problema de planificación óptima global (de un conjunto de vuelos) en fase estratégica. En primer lugar se presenta una sencilla descripción del problema a afrontar, así como el esquema y las simplificaciones seguidas para desarrollarlo. A continuación, se describe el módulo de generación de planificaciones aleatorias en fase estratégica, basándose en las preferencias de las aerolíneas. Finalmente, se presenta el módulo responsable de la búsqueda de la planificación óptima teniendo en cuenta un problema multiobjetivo.

La aplicación de estos dos primeros módulos generará una planificación óptima global, pero aún con conflictos, los cuales serán resueltos con la aplicación de los módulos descritos más adelante, en el Capítulo 4.

### 3.1 Descripción del problema, esquema y simplificaciones

El problema de planificación a resolver en este estudio considera el conjunto de vuelos para un día y en una región determinada. Es decir, se afrontará la planificación con los vuelos en un periodo de un día, y sólo se optimizará el tramo de los vuelos dentro de una región determinada, que en este estudio es el FIR España Continental (Figura 3-1).



*Figura 3-1 FIR España Continental*

Mientras que la planificación de un vuelo se utiliza para cumplir con el reglamento y proporcionar una medida de seguridad, también puede ser utilizada para gestionar los costes asociados con la operación del vuelo y reducir la congestión, adaptando la demanda a la capacidad disponible.

El objetivo del problema que aquí se afronta es encontrar la planificación, en fase estratégica, de un conjunto de vuelos que suponga la mejor solución global posible, en base a criterios que consideren los intereses de distintos actores del sistema ATM.

Para cumplir con el objetivo, en este estudio se ha utilizado en primer lugar una metodología *data-driven* con una gran cantidad de planes de vuelos que representan la intención de las aerolíneas. En segundo lugar, se ha desarrollado un proceso de optimización multiobjetivo que tiene en consideración los requisitos de los distintos actores del sistema ATM. Estos dos aspectos, proporcionan una nueva metodología de planificación de vuelos en fase estratégica en comparación al actual estado del arte (sección 2.1).

Para afrontar la resolución del problema aquí descrito, se han desarrollado dos módulos que han sido implementados y probados con MATLAB. La arquitectura de estos dos módulos se representa en la Figura 3-2.

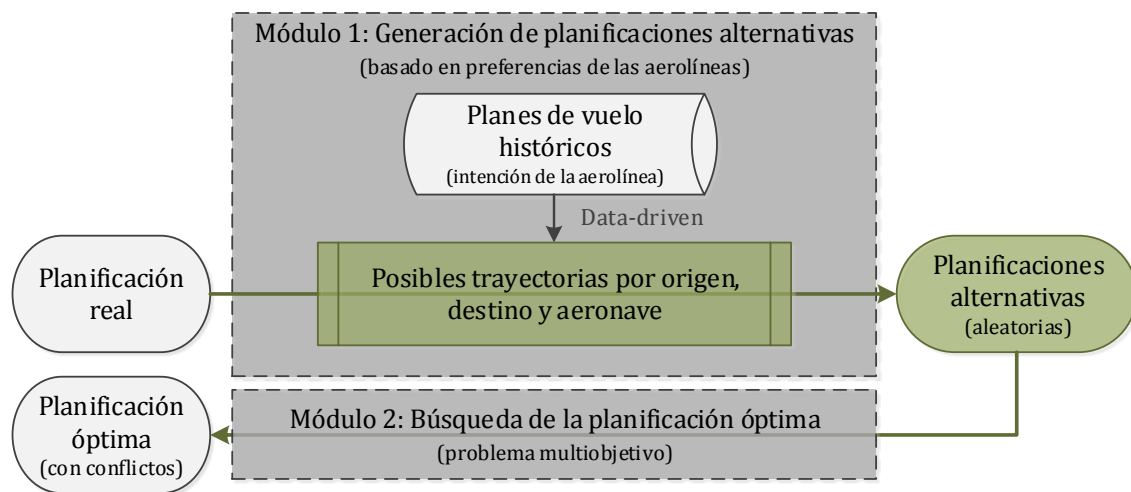


Figura 3-2 Arquitectura de la resolución del problema de planificación óptima global

En el módulo 1, generación de planificaciones alternativas, se determinan las trayectorias posibles (dentro del FIR España Continental) a considerar para cada combinación i) origen, ii) destino y iii) tipo de aeronave. Para ello se utiliza un gran número de planes de vuelo iniciales (más de cuatro millones y medio de vuelos, correspondientes a tres años de datos en el FIR España Continental) que representan la intención de las compañías aéreas. Este proceso se detalla en la Sección 3.2.

El módulo así desarrollado se aplica al tramo de la trayectoria dentro del FIR España Continental de los vuelos de un determinado día, para obtener una serie de planificaciones alternativas a la planificación real. Estas planificaciones alternativas alimentarán al

módulo 2 de búsqueda de la planificación óptima. La creación de planificaciones alternativas consiste en:

- la detección aleatoria de una trayectoria (de entre todas las posibles calculadas con el modelo *data-driven*) para cada vuelo del conjunto a optimizar, a la que se llama “planificación alternativa”; y
- la determinación de las funciones objetivo de cada planificación alternativa, que serán utilizadas en la optimización que se llevará a cabo en el siguiente módulo.

El módulo 2, de búsqueda de la planificación óptima, recurre a un proceso iterativo, basado en algoritmos evolutivos, que permite obtener una planificación óptima considerando un problema multiobjetivo. Concretamente, dichos objetivos serán:

- Minimización del coste asociado al consumo de combustible global.
- Minimización del número de desequilibrios entre capacidad y demanda.
- Minimización de la demora de arribada, frente a lo establecido en la planificación real generada por la compañía.

El primer objetivo representa los intereses de las compañías aéreas, el segundo el del proveedor de servicios, mientras el tercero es conjunto.

Este estudio se centrará en el entorno de crucero (con el fin de evitar el enmascarado de los resultados debido a la complejidad inducida por las fases de salida y aproximación), definido como el segmento desde el punto en el que finaliza el procedimiento de salida hasta el punto de llegada al procedimiento de aproximación.

## 3.2 Módulo de generación de planificaciones alternativas basado en preferencias de las aerolíneas

En este apartado se describe el primero de los módulos en la cadena encargada de resolver el problema de planificación óptima global. Este módulo inicial se encarga de generar planificaciones alternativas en fase estratégica, basándose en las preferencias de las aerolíneas.

Esta sección se estructura como sigue: en primer lugar se definen los conceptos necesarios y sus relaciones. A continuación se detallan los datos utilizados en la creación del módulo, en relación a los conceptos anteriores. Posteriormente se recoge una explicación detallada del proceso *data-driven* seguido para desarrollar el modelo que genere todas las posibles trayectorias (correspondientes al tramo dentro del FIR España Continental) para cada combinación origen, destino y aeronave. Finalmente, se describe la aplicación de este módulo al conjunto de vuelos de un día determinado.

### 3.2.1 Fundamentos

El módulo de generación de planificaciones alternativas se basa en una serie de conceptos que se definen aquí como referencia. Sirve esta sección, pues, de glosario de términos para este módulo.

El concepto fundamental que este módulo considera es la combinación origen-destino-aeronave, denominada “combinación O-D-A”. Este concepto representa de forma general la conexión entre un aeropuerto origen (O) y un aeropuerto destino (D), para un modelo de aeronave específico (A). Un ejemplo de combinación O-D-A sería LEMD-LIRF-A320, que sería distinta de la combinación LEMD-LIRF-B738. La granularidad del modelo específico depende de su categorización en BADA, como se detallará posteriormente.

Una combinación O-D-A específica puede volarse de diversas maneras dependiendo de los fijos, altitudes y velocidades previstas en su plan de vuelo inicial. Cada una de estas maneras se denominará en este estudio “trayectoria posible”. Las trayectorias posibles para una combinación O-D-A no son fijas, generándose dinámicamente a partir de la muestra de datos y asociándose a cada combinación O-D-A específica. Por tanto, cada combinación O-D-A existente en la muestra tendrá de 1 a  $n$  trayectorias posibles.

El proceso de obtención de estas trayectorias posibles, y su posterior rol en el algoritmo de planificación se detallará más adelante en este capítulo, pero se adelanta que se basan en el concepto “intermedio” de rutas. Las rutas son los extractos del plan de vuelo que describen la secuencia de fijos, niveles y velocidades para el vuelo dentro del FIR España Continental. A partir de ellas se genera cada trayectoria posible, como la trayectoria 4D sintética para una ruta específica. Una misma ruta puede aparecer en el plan de vuelo de distintos vuelos dentro de una combinación O-D-A, y se materializará en una sola trayectoria posible. La relación ruta y trayectoria posible es pues 1 a 1 para todas las combinaciones O-D-A.

Una combinación O-D-A puede tener su aeropuerto origen, destino o ambos fuera del FIR España Continental. En estos casos, las trayectorias posibles estarán limitadas a los puntos dentro de esta región de estudio.

### 3.2.2 Descripción de los datos utilizados.

#### *Plan de vuelo inicial*

Un plan de vuelo es un instrumento básico para la gestión del tránsito aéreo, en espacios donde existen problemas de capacidad. Dicho plan debe ser aprobado previamente por la entidad que gestione los flujos de aeronaves<sup>9</sup>, para garantizar que en ninguna parte del espacio aéreo el número de aeronaves supere la capacidad para ejercer el control de tráfico aéreo.

La planificación de un vuelo, particularmente cuando sigue reglas de vuelo instrumental, utiliza generalmente como elemento de base las rutas ATS publicadas. Las rutas ATS se definen a través de una serie ordenada de puntos de la ruta o fijos.

Un plan de vuelo recoge la ruta que la aeronave va a volar incluyendo la especificación de las altitudes y velocidades. El formato de plan de vuelo requerido por el sistema ATM esta normalizado por la OACI y tiene la forma que se recoge en la Figura 3-3.

En particular, y de interés para la realización del presente estudio, el formulario de plan de vuelo consta de la siguiente información:

- 1) aeropuerto de origen;
- 2) aeropuerto de destino;
- 3) modelo de aeronave;
- 4) identificación de aeronave;
- 5) velocidad de crucero;
- 6) nivel o altitud de crucero;
- 7) ruta (descrita a través del nombre de las aerovías a utilizar, de donde se derivan los fijos) ;
- 8) hora de salida del aeropuerto de origen; y
- 9) duración estimada del vuelo.

---

<sup>9</sup> En Europa esta entidad es el Centro Gestor de Operaciones en red (NMOC), y depende de la Organización Europea para la Seguridad de la Navegación Aérea (Eurocontrol).



FLIGHT PLAN / PLAN DE VUELO									
<b>PRIORITY</b> Prioridad << ≡ FF →		<b>ADDRESSEE (S)</b> Destinatario (s) <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div> <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div> <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div>							
<b>FILING TIME</b> Hora de depósito <div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 20px;"></div>		<b>ORIGINATOR</b> Remitente <div style="border: 1px solid black; width: 150px; height: 20px;"></div>							
<b>SPECIFIC IDENTIFICATION OF ADDRESSEE(S) AND/OR ORIGINATOR</b> Identificación exacta del (de los) destinatario(s) y/o del remitente <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div>									
<b>3 MESSAGE TYPE</b> Tipo de mensaje << ≡ ( FPL		<b>4 AIRCRAFT IDENTIFICATION</b> Identificación aeronave <div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px;"></div>		<b>8 FLIGHT RULES</b> Reglas de vuelo <input type="checkbox"/>		<b>TYPE OF FLIGHT</b> Tipo de vuelo <input type="checkbox"/>		<< ≡	
<b>9 NUMBER</b> Número <div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 20px;"></div>		<b>3 TYPE MOF AIRCRAFT</b> Tipo de aeronave/MM <div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 20px;"></div>		<b>WAKE TURBULENCE CAT.</b> Cat. de estela turbulenta <div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 20px;"></div>		<b>10 EQUIPMENT</b> Equipo <div style="border: 1px solid black; width: 60px; height: 20px;"></div>		<< ≡	
<b>1 DEPARTURE AERODROME</b> Aeródromo de salida <div style="border: 1px solid black; width: 60px; height: 20px;"></div>		<b>8 TIME</b> Hora <div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 20px;"></div>		<< ≡		<< ≡		<< ≡	
<b>5 CRUISING SPEED</b> Velocidad de crucero <div style="border: 1px solid black; width: 60px; height: 20px;"></div>		<b>6 LEVEL</b> Nivel <div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 20px;"></div>		<b>7 ROUTE</b> Ruta <div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px;"></div>		<< ≡		<< ≡	
<div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div>									
<div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div>									
<div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div>									
<b>2 DESTINATION AERODROME</b> Aeródromo de destino <div style="border: 1px solid black; width: 60px; height: 20px;"></div>		<b>9 TOTAL EET / EET Total</b> HR. MIN <div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 20px;"></div>		<b>ALTN AERODROME</b> Aeródromo alt. <div style="border: 1px solid black; width: 60px; height: 20px;"></div>		<b>2ND, ALTN AERODROME</b> 2º aeródromo alt. <div style="border: 1px solid black; width: 60px; height: 20px;"></div>		<< ≡	
<b>18 OTHER INFORMATION / Otros datos</b> <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div>									
<div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div>									
<div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div>									
<div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div>									
<b>SUPPLEMENTARY INFORMATION (NOT TO BE TRANSMITTED IN FPL MESSAGES)</b> Información suplementaria (En los mensajes FPL no hay que transmitir estos datos)									
<b>19. ENDURANCE</b> Autonomía HR. MIN → E / <div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 20px;"></div>		<b>PERSONS ON BOARD</b> Personas a bordo → P / <div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 20px;"></div>		<b>EMERGENCY RADIO</b> Equipo radio de emergencia → R / <div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 20px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 20px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 20px;"></div>					
<b>SURVIVAL EQUIPMENT / Equipo de supervivencia</b> → S / <div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 20px;"></div>		<b>JACKETS / Chalecos</b> → J / <div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 20px;"></div>		<b>FLUORES</b> Fluor <div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 20px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 20px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 20px;"></div>					
<b>DINGHIES / Botes neumáticos</b> → D / <div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 20px;"></div>		<b>COLOUR / Color</b> → C / <div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px;"></div>		<< ≡					
<b>AIRCRAFT COLOUR AND MARKINGS / Color y marcas de las aeronaves</b> A / <div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px;"></div>									
<b>REMARKS / Observaciones</b> N / <div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px;"></div>									
<b>PILOT IN COMMAND / Piloto al mando</b> → C / <div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px;"></div>									
<b>FILED BY / Presentado por</b> ) << ≡									
<div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div>									
<b>SPACE RESERVED FOR ADDITIONAL REQUIREMENTS</b> Espacio reservado para requisitos adicionales									

Figura 3-3 Formulario de plan de vuelo de OACI

Para la realización del presente modelo se utilizarán datos reales de funcionamiento del espacio aéreo gestionado por el proveedor de servicios de navegación aérea español, ENAIRE, en coordinación con la Organización Europea para la Seguridad de la Navegación Aérea, Eurocontrol. La información operacional específica utilizada es el conjunto de planes de vuelo iniciales del subsistema de Gestión de Planes de Vuelo (GIPV) del Sistema Automatizado de Control de Tránsito Aéreo (SACTA), la plataforma ATC española.

El plan de vuelo inicial es recibido en SACTA mediante un mensaje de creación de plan de vuelo con toda la información del mismo que ha proporcionado la aerolínea (vuelos comerciales) o el piloto (vuelos privados). En España, los planes de vuelo se reciben actualmente unas 17,5 horas antes de la operación, en promedio.

Se considera que el plan de vuelo inicial es la mejor representación de la intención de las compañías aéreas para minimizar sus costes operativos directos. Por ello, en este estudio se va a utilizar dicha información para crear un modelo que determine todas las trayectorias posibles para cada combinación O-D-A.

A continuación se representa el modelo de datos con la información de planes de vuelo iniciales, Figura 3-4. En primer lugar se tiene una tabla denominada “Vuelos” con la información del origen, destino, aeronave y los hitos horarios de la hora estimada de fuera de calzos (EOBT, *Estimated Off-Block Time*) y la hora estimada de aterrizaje (ELDT, *Estimated Landing Time*). En la segunda tabla “Planes de vuelo”, se tiene la ruta<sup>10</sup> a volar, definida a través de las coordenadas de los fijos, el instante y la altitud de paso por los mismos.

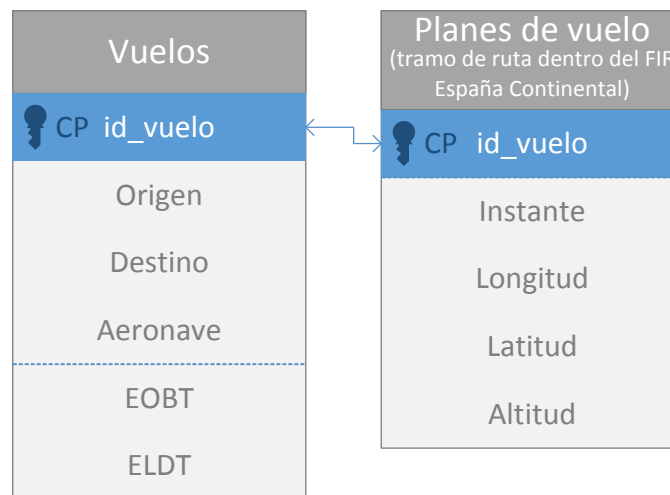


Figura 3-4 Base de datos de planes de vuelo iniciales

<sup>10</sup> Para la realización del modelo aquí presentado solamente se cuenta con la información de la ruta dentro del FIR España Continental.

*Configuraciones de control reales. Capacidad de sectores*

En este estudio se dispone de la información de las configuraciones de sectores de control reales utilizadas dentro del FIR España Continental, así como la capacidad declarada de cada uno de los sectores de dichas configuraciones. Esta información se recoge del diario de novedades en el que los controladores y el jefe de sala de los ACCs detallan los hechos relevantes y la información operativa.

En la Figura 3-5 se representa el modelo de datos con dicha información.



Figura 3-5 Base de datos de configuraciones reales, sectorización y volumetría

En primer lugar se tiene una tabla denominada “Configuraciones reales” con la información de los ACCs, desde donde se lleva a cabo el seguimiento en ruta de la región FIR España Continental. En ella se recoge la información de las configuraciones reales utilizadas en cada periodo del día, para los siguientes centros: ACC Barcelona ruta, ACC Madrid ruta norte, ACC Madrid ruta sur, y ACC Sevilla ruta, que constituyen lo que se ha denominado FIR España Continental.

En la tabla “Sectorización” se recoge la organización del espacio aéreo de cada una de los ACCs del espacio aéreo de estudio. El espacio aéreo se puede dividir de diferentes formas, definidas a partir de una serie de piezas denominadas sectores. Una configuración de sectores 9A significa que un región del espacio aéreo en particular (por ejemplo el ACC Barcelona ruta) se divide en 9 sectores de una manera particular; de la misma forma una configuración 9B también significa 9 sectores, pero distribuidos de una manera diferente. Esto conduce al hecho de que el catálogo de configuraciones disponibles es fijo, pero la configuración “utilizada” varía durante el día, adaptando los recursos de capacidad a la demanda esperada. En esta tabla también se recoge la capacidad operativa (en operaciones por hora) de cada uno de los sectores, así como los volúmenes elementales que forman cada sector.

Por último, en la tabla “Volumetría” se recogen los parámetros que definen la forma geométrica de cada uno de los volúmenes elementales, los cuales son prismas irregulares. Estos parámetros serán las coordenadas de la base, la altitud mínima y la altitud máxima hasta la que llega. En la Figura 3-6 se representa un ejemplo de un sector de control del ACC Madrid ruta norte, y los volúmenes elementales que lo constituyen.

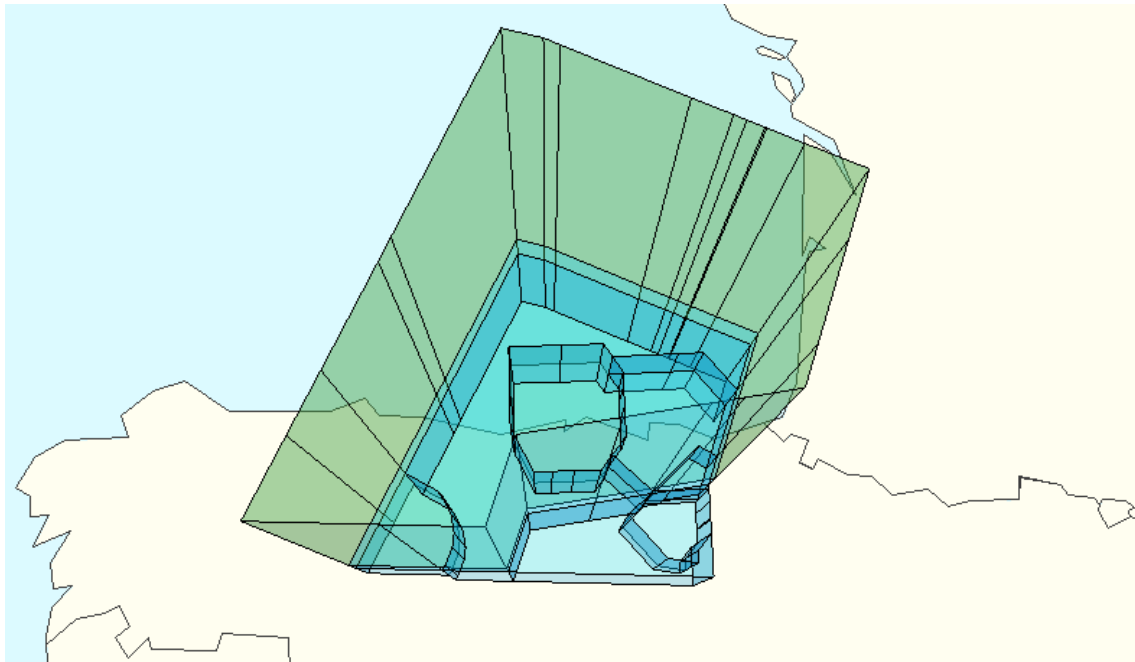


Figura 3-6 Representación de un sector y los volúmenes elementales que lo componen<sup>11</sup>

### 3.2.3 Limpieza de datos de entrada para el desarrollo del modelo *data-driven*

En [146] Solomatine y Ostfeld destacan la importancia de la limpieza y preparación de los datos en toda modelización. Por ello la primera fase para la creación del modelo *data-driven* es preparar la base de datos de planes de vuelo iniciales teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Selección de los vuelos cuya aeronave está en BADA (*Base of Aircraft Data*) [112], puesto que es de esta de donde se obtienen los parámetros para poder calcular el consumo de combustible de cada una de las trayectorias posibles. Como se ha mencionado, el consumo de combustible será uno de los objetivos a optimizar en el problema multiobjetivo, por lo que aquellos vuelos a los que no se le pueda calcular el consumo de combustible no serán optimizados. Aproximadamente el 90% de los vuelos de la muestra tiene su modelo de aeronave en BADA.
- Cruce del aeropuerto de origen y destino de todos los vuelos de la muestra, con una base de datos que contiene la localización geográfica (latitud, longitud y altitud) de cada aeropuerto. Conocer la distancia total de los vuelos a optimizar, desde el origen hasta el destino, es una necesidad que se detallará más adelante y que requiere de esta información geográfica de los aeropuertos.

<sup>11</sup> Imagen generada en la herramienta de Eurocontrol NEST, (<http://www.eurocontrol.int/services/nest-modelling-tool>).

- Como ya se ha comentado, este estudio se centrará en el entorno de crucero. Esta fase normalmente se da por encima de los 18.000 pies y hasta los 45.000 pies [57], por lo que en este proceso de preparación de los datos se filtra la información de los planes de vuelo para datos con una altitud superior a los 18.000 pies, eliminando el resto.
- El último proceso de limpieza consiste en transformar algunos de los parámetros que definen la ruta de los vuelos. Como puede verse en la tabla “Planes de vuelo” de la Figura 3-4, inicialmente se parte de la definición de la rutas dentro del FIR España Continental a través de las coordenadas de los puntos fijos, el instante y la altitud de paso por los mismos. En este proceso se transforman los datos temporales en velocidades, pasando a estar definida la ruta a través de las coordenadas de los fijos, la altitud y la velocidad horizontal y vertical entre cada par de fijos.

El primer objetivo de esta transformación es la limpieza de los planes de vuelo debido a valores fuera de determinados rangos<sup>12</sup> de velocidades horizontales y verticales. El segundo, es tener las rutas de los vuelos definidas con los parámetros que se utilizarán para buscar todas las trayectorias posibles existentes en la muestra.

En Figura 3-7 se esquematiza la estructura de los datos de la tabla “Vuelos” tras la limpieza de los mismos.

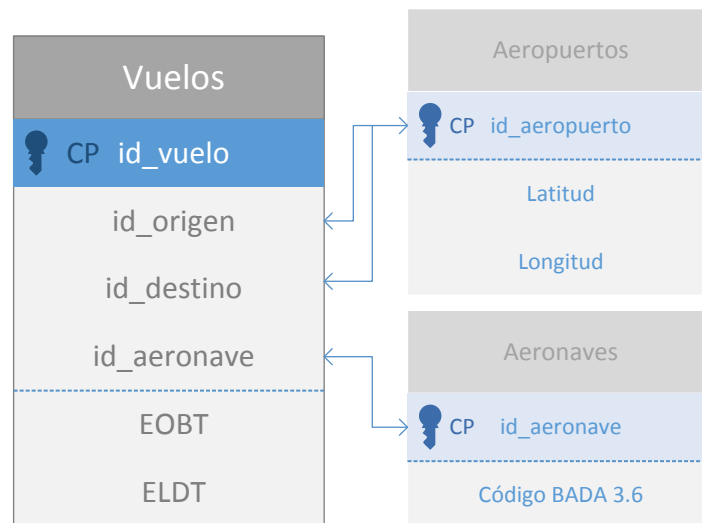


Figura 3-7 Esquema de datos de la tabla “Vuelos” tras su limpieza

#### Generación de tablas de distribución de frecuencias

Observando todos los valores de velocidad horizontal, velocidad vertical y altitud de cada tramo de ruta dentro del FIR España Continental de los vuelos de la muestra, se

<sup>12</sup> Estos rangos corresponden a valores extremos de velocidades de la muestra de planes de vuelo disponible.

puede observar como su variabilidad es muy grande. Por ello, el primer paso para poder obtener un número de trayectorias posibles para cada combinación O-D-A que sea manejable, y que pueda usarse para posteriormente detectar las trayectorias óptimas de un conjunto de vuelos, es organizar los datos mediante tablas de distribución de frecuencias [43].

Su construcción requiere en primer lugar de la selección de los intervalos de clase, para lo cual se aplican los pasos siguientes:

- Calcular el rango de los datos ( $R$ ), a partir del dato de menor ( $x_{min}$ ) y mayor ( $x_{max}$ ) valor numérico de la muestra

$$R = x_{max} - x_{min} \quad (1)$$

- Definir el número de clases ( $Nc$ ) en las que se deben clasificar los datos. Uno de los métodos más utilizados para determinar el número de clases es el método de Sturges [75][151] a partir del número de observaciones utilizadas para construir el histograma ( $o$ ).

$$Nc = 1 + \log_2 o \quad (2)$$

- Determinar la Amplitud de clase ( $Ac$ ).

$$Ac = R/Nc \quad (3)$$

En la Tabla 3-1 se recoge el algoritmo implementado en MATLAB<sup>13</sup> para el cálculo de estos parámetros.

Tabla 3-1 Algoritmo de cálculo de los parámetros para la construcción de las tablas de distribución de frecuencias

---

```
function [Nc,R_fl,Ac_fl,R_fl,Ac_fl,R_fl,Ac_fl] =param_dist_freq (pv)

% Calcular número de clases
Nc=round((log10(length(pv.id_vuelo))*3.3)+1);
% Altitud - calcular rango y amplitud de clase
R_fl=round(max(pv.fl)-min(pv.fl));
Ac_fl=round((R_fl/Nc)/10)*10;
% Velocidad Horizontal - Calcular rango y amplitud de clase
R_vel_2d=round(prctile(pv.vel_2d,lim_max_tab)-...
prctile(pv.vel_2d,lim_min_tab));
Ac_vel_2d=floor((R_vel_2d/Nc));
```

---

<sup>13</sup> A partir de aquí, todos los algoritmos definidos corresponden a su implementación en MATLAB.

---

```
% Velocidad Vertical - Calcular rango y amplitud de clase
R_vel_z=round(prctile(pv.vel_z,lim_max_tab)- ...
prctile(pv.vel_z,lim_min_tab));
Ac_vel_z=floor((R_vel_z/Nc)*10)/10;
```

---

A continuación, se agrupan los datos (de los parámetros altitud, velocidad horizontal y velocidad vertical de todos los vuelos de la muestra) en cada una de las clases. Para ello basta con redondear los datos de la muestra con una precisión de su correspondiente amplitud de clase. En cuanto a los parámetros latitud y longitud se utilizan para crear una tabla con todos los posibles puntos fijos de paso. El algoritmo desarrollado se recoge en la Tabla 3-2.

*Tabla 3-2 Algoritmo para agrupar los parámetros del plan de vuelo en cada una de las clases*

---

```
function pv = agrupacion(pv,Nc,R_fl,Ac_fl,R_fl,Ac_fl,R_fl,Ac_fl)

% Altitud
pv.fl=round(pv.fl/Ac_fl)*Ac_fl;
[altitudes.altitud,~,pv.id_fl]=unique(pv.fl,'rows');
altitudes.id_fl=(1:1:length(altitudes.altitud))';
pv=rmfield(pv,'fl');

% Velocidad Horizontal
pv.vel_2d=round(pv.vel_2d/Ac_vel_2d)*Ac_vel_2d;
[vel_horizontal.vel_2d,~,pv.id_vel_2d(find((pv.id_vuelo(2:end,1)-...
pv.id_vuelo(1:end-1,1))==0),1)]=...
unique(pv.vel_2d(find((pv.id_vuelo(2:end,1)-pv.id_vuelo(1:end-...
1,1))==0),1),'rows');
pv.id_vel_2d(length(pv.id_vel_2d)+1,1)=0;
vel_horizontal.id_vel_2d=(1:1:length(vel_horizontal.vel_2d))';
pv=rmfield(pv,'vel_2d');

% Velocidad Vertical
pv.vel_z=round(pv.vel_z/Ac_vel_z)*Ac_vel_z;
[vel_vertical.vel_z,~,pv.id_vel_z(find((pv.id_vuelo(2:end,1)-...
pv.id_vuelo(1:end-1,1))==0),1)]=...
unique(pv.vel_z(find((pv.id_vuelo(2:end,1)-pv.id_vuelo(1:end-...
1,1))==0),1),'rows');
vel_vertical.id_vel_z=(1:1:length(vel_vertical.vel_z))';
pv.id_vel_z(length(pv.id_vel_z)+1,1)=0;
pv=rmfield(pv,'vel_z');

% Fijos
[fijos,pv.id_fijos]=unique(horzcat(pv.lat,pv.lon),'rows');
fijos=struct('lat',fijos(:,1),'lon',fijos(:,2));
pv=rmfield(pv,'lat');
pv=rmfield(pv,'lon');
```

---

Cada uno de los parámetros (altitud, velocidad horizontal y velocidad vertical) que definen el plan de vuelo de cada vuelo de la muestra, es redondeada con una precisión de su correspondiente amplitud de clase calculada. De esta forma se obtiene el esquema de la tabla de “Planes de vuelo”, con la información de las rutas dentro del FIR España Continental, representado en la Figura 3-8.

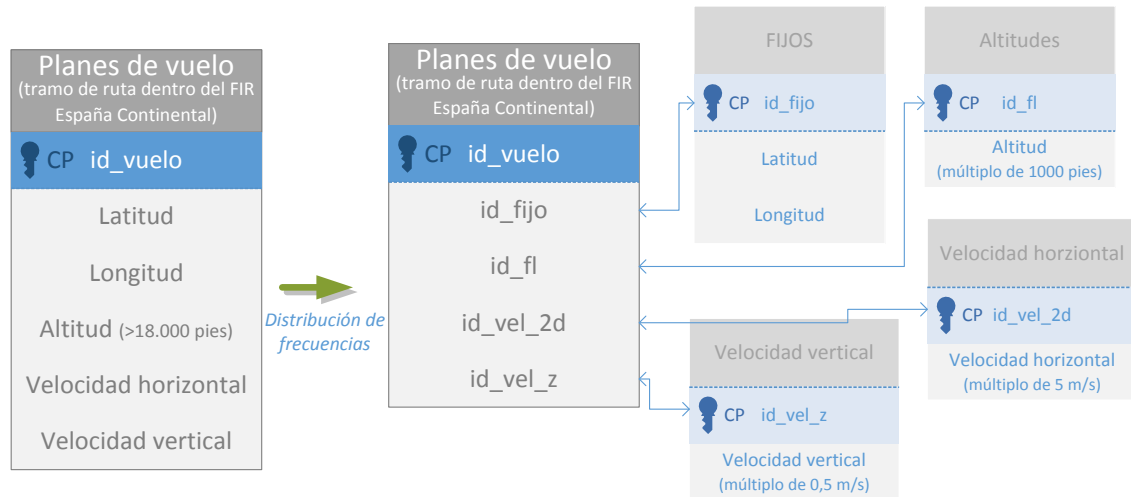


Figura 3-8 Esquema de datos de la tabla “Planes de vuelo” tras aplicar distribución de frecuencias

#### Búsqueda de las combinaciones O-D-A representativas de la muestra

En los tres años de datos de planes de vuelo se dan casi 90.000 combinaciones O-D-A distintas. Sin embargo muchas de estas combinaciones representan un porcentaje insignificante sobre el total de vuelos. Para buscar las combinaciones O-D-A significativas, es necesario calcular el porcentaje acumulado de vuelos en función del porcentaje acumulado de combinaciones O-D-A sobre las combinaciones totales (Tabla 3-3).

Tabla 3-3 Algoritmo para calcular las combinaciones O-D-A representativas de la muestra

```
function [v, comb, porc_habituales] = combinaciones_representativas(v)

% Búsqueda de combinaciones posibles
[comb,~,v.id_comb]= ...
    unique(horzcat(v.origen,v.destino,v.aeronave), 'rows');
comb(:,4)=(1:1:length(comb(:,1)))';

% Búsqueda de ocurrencia de cada combinación
for i=1:1:length(comb(:,1))
    comb(i,5)=length(find(v.id_comb==i));
end
comb(:,6)=(comb(:,5)/sum(comb(:,5)))*100;
% Ordenar la tabla de combinaciones por su ocurrencia
comb=sortrows(comb,-5);
comb(:,7)=cumsum(comb(:,5));
comb(:,8)=(1/length(comb(:,1)))*100;
comb(:,9)=cumsum(comb(:,8));
```



---

```
% Búsqueda del punto de cambio de pendiente de la curva
comb(:,10)=floor(comb(:,8)./comb(:,5));
comb=struct('id_comb',comb(:,4),'origen',comb(:,1),'destino',...
comb(:,2),'aeronave',comb(:,3),'acum_vuelos',comb(:,6), ...
'acum_comb',comb(:,9),'filtro',comb(:,10));

porc_habituales=comb.acum_vuelos(min(find(comb.filtro==1)));
```

---

En la Figura 3-9 a continuación, se representa el porcentaje acumulado de vuelos en función del porcentaje acumulado de combinaciones O-D-A sobre las combinaciones totales. Como puede observarse, más del 90% de los vuelos totales del año está constituido solamente por el 10 % de las combinaciones O-D-A con más vuelos, lo que se traduce en unas de 9.000 combinaciones O-D-A.

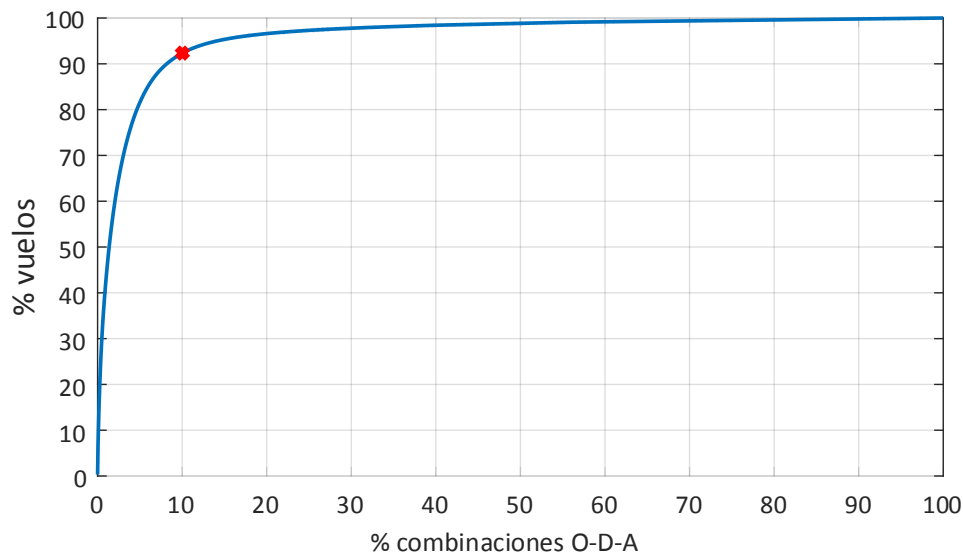


Figura 3-9 Porcentaje de vuelo en función de las combinaciones O-D-A

La aportación del resto de combinaciones es, por tanto, muy baja y se ha centrado el análisis en este conjunto significativo, dado que el coste computacional de incluirlas a todas no compensa a la mejora final que supone su integración. En una aplicación real se consideraría el 100% de las rutas, sin embargo en la prueba de concepto desarrollada en el presente estudio se ha considerado suficiente tomar el 90% de los vuelos.

En la Figura 3-10 se representa el esquema de datos de la tabla “Vuelos” tras eliminar las combinaciones O-D-A no representativas, y asociar a cada vuelo la combinación a la que pertenece.

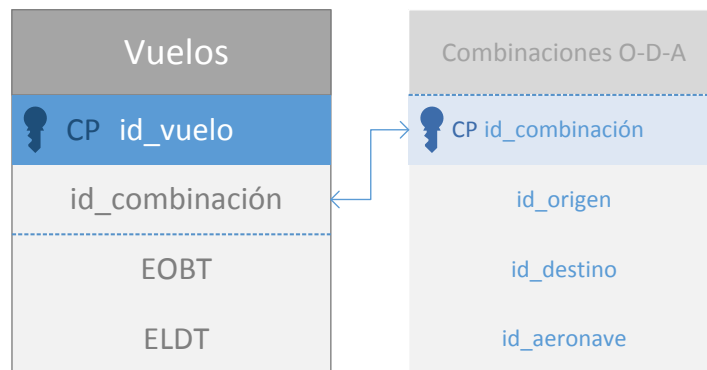


Figura 3-10 Esquema de datos de la tabla “Vuelos” tras la búsqueda de la combinación O-D-A a la que pertenecen

### 3.2.4 Desarrollo del modelo *data-driven*. Búsqueda de trayectorias posibles para cada combinación O-D-A

En esta sección se describe la creación del modelo que proporciona para cada combinación O-D-A todas las trayectorias posibles dentro del FIR España Continental, según se anticipó. Puesto que estas trayectorias posibles serán utilizadas posteriormente para la búsqueda de una planificación óptima, será necesario calcular algunas propiedades asociadas a cada una de las trayectorias posibles de todas las combinación O-D-A, que permitirán calcular las funciones objetivo de cada planificación. Estas propiedades son:

- Distancia total recorrida desde la entrada hasta la salida del FIR España Continental, se trata de un valor fijo calculado a partir de la información de la trayectoria.
- Distancia total recorrida desde el aeropuerto de origen hasta el de destino, se trata de un valor fijo calculado a partir de la información de la trayectoria y las coordenadas del aeropuerto de origen y de destino.
- Tiempo medio desde el aeropuerto de origen hasta el aeropuerto de destino.
- Consumo de combustible de la trayectoria dentro del FIR España Continental, se trata de un valor fijo calculado a partir de la información de la trayectoria y el modelo de aeronave.

La estructura del modelo que se va a desarrollar, para la generación de planificaciones alternativas, y que recoge todas las posibles trayectorias para cada combinación O-D-A se representa en la Figura 3-11.

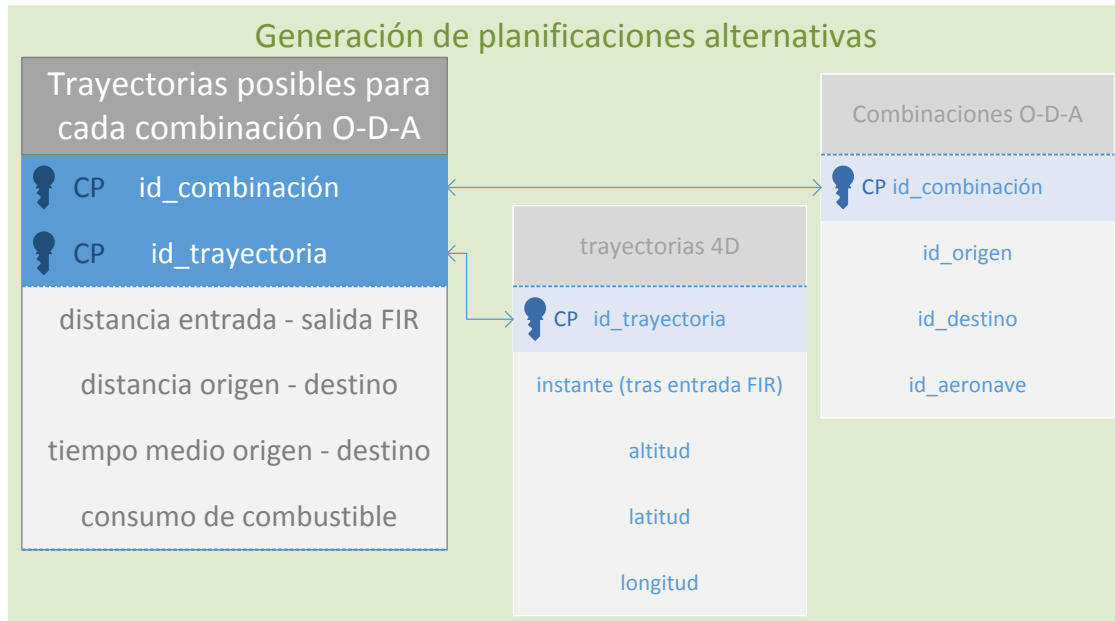


Figura 3-11 Esquema del modelo de generación de planificaciones alternativas. Tabla de trayectorias posibles para cada combinación O-D-A

Para la creación de la tabla que genere todas las posibles trayectorias para cada combinación O-D-A, y las propiedades asociadas a estas, se han seguido los siguientes pasos:

- Búsqueda de todas las trayectorias posibles, dentro del FIR España Continental, entre todos los vuelos de la muestra de los tres años de datos.
- Cálculo de las propiedades de cada trayectoria posible.
- Asociación de trayectorias posibles a cada combinación O-D-A

#### Búsqueda de todas las trayectorias posibles, dentro del FIR España Continental

Para la búsqueda de todas las trayectorias posibles dentro del FIR, se parte de la información de la tabla “Planes de vuelo”, de la Figura 3-8, con la información del tramo de ruta dentro del FIR España Continental de cada vuelo de la muestra de datos de tres años.

Como ya se ha visto, se han definido los tramos ruta dentro del FIR a través de los puntos fijos de paso, la altitud y la velocidad horizontal y vertical entre cada par de puntos fijos, parámetros que además han sido agrupados en cada una de sus clases (obtenidas utilizando tablas de distribución de frecuencias) de forma que el número de tramos de ruta posibles sea un número manejable<sup>14</sup>. Se utilizarán estos parámetros para el cálculo de todos los tramos de ruta posibles, en los tres años de datos con los que se cuenta.

<sup>14</sup> Con manejable, y haciendo referencia a los resultados mostrados en el Capítulo 5, se entiende unas 225.000 rutas totales posibles, considerando todos los vuelos de la muestra de tres años.

El algoritmo desarrollado para ello se recoge en la Tabla 3-4.

*Tabla 3-4 Algoritmo de búsqueda de todos los tramos de ruta posibles*

---

```

function [v, ruta, rut] = rutas_posibles(v, pv)

% Asociamos a cada vuelo su ruta en formato de "string", de forma que
% será más sencilla la aplicación de la función "unique"
v.fin=find((pv.id_vuelo(2:end,1)-pv.id_vuelo(1:end-1,1))~=0);
v.fin(length(v.id_vuelo))=length(pv.id_vuelo);
v.ini=1;
v.ini(2:length(v.id_vuelo),1)=v.fin(1:length(v.id_vuelo)-1,1)+1;

rut=horzcat(pv.id_fijos(ismember(pv.id_vuelo,v.id_vuelo)),...
    pv.id_fl(ismember(pv.id_vuelo,v.id_vuelo)),...
    pv.id_vel_2d(ismember(pv.id_vuelo,v.id_vuelo)),...
    pv.id_vel_z(ismember(pv.id_vuelo,v.id_vuelo)));

for j=1:1:length(v.id_vuelo)
v.rut_txt(j,1)=cellfun(@(x) (mat2str(x)),{rut(v.ini(j):v.fin(j),:)},...
    'uniformoutput',false);
end

% Búsqueda de rutas posibles de todos los vuelos de la muestra
% Búsqueda de la ruta a la que pertenece cada vuelo

[~,ruta.id_v,v.id_ruta]=unique(v.rut_txt);
v=rmfield(v,'rut_txt');
ruta.id_ruta=(1:1:length(ruta.id_v))';

```

---

Una vez localizados todos los tramos de ruta posibles, se calcula la trayectoria 4D asociada a cada uno. Estas trayectorias 4D se generan extrapolando linealmente un punto cada 10 segundos, utilizando para ello el algoritmo recogido en la Tabla 3-5.

La elección de 10 segundos para la extrapolación se debe a que, en el problema posterior de resolución de conflictos (presentado en el Capítulo 4), se usarán estas trayectorias para la búsqueda de los posibles conflictos potenciales. Este intervalo fue mostrado en por Durand y Gotteland como lo suficientemente pequeño como para detectar cualquier conflicto.

*Tabla 3-5 Algoritmo de cálculo de la trayectoria 4D de cada tramo de ruta posible*

---

```

function [trayectorias] = trayectorias_4d(ruta, v, rut, interval, ...
    altitudes, vel_horizontal, vel_vertical)
for i=1:1:length(ruta.id_ruta)
    % Obtención de los parámetros de la ruta i (latitud, longitud,
    % altitud, velocidad horizontal y velocidad vertical)
camino.lat=fijos.lat(rut(v.ini(ruta.id_v(i)):v.fin(ruta.id_v(i)),1));
camino.lon=fijos.lon(rut(v.ini(ruta.id_v(i)):v.fin(ruta.id_v(i)),1));

```

---

---

```

camino.fl=altitudes.altitud(rut(v.ini(ruta.id_v(i)):...
                        v.fin(ruta.id_v(i)),2));
camino.vel_2d=vel_horizontal.vel_2d(rut(v.ini(ruta.id_v(i)):...
                        v.fin(ruta.id_v(i))-1,3));
camino.vel_2d(length(camino.vel_2d)+1,1)=(rut(v.fin(ruta.id_v(i)),3));
camino.vel_z=vel_vertical.vel_z(rut(v.ini(ruta.id_v(i)):...
                        v.fin(ruta.id_v(i))-1,4));
camino.vel_z(length(camino.vel_z)+1,1)=(rut(v.fin(ruta.id_v(i)),4));

% Cálculo del instante de la ruta a partir de la distancia entre los
% fijos y la velocidad horizontal
camino.inst(2:length(camino.lat),1)= ...
    (vdist(camino.lat(2:end,1),camino.lon(2:end,1),...
        camino.lat(1:end-1,1),camino.lon(1:end-1,1))./...
        camino.vel_2d(1:end-1,1))/(24*60*60);
camino.inst=cumsum(camino.inst);

% creamos los instantes de la trayectoria con el 10s de intervalo
trayec.inst(:,1)=(min(camino.inst):(interval/(24*60*60))): ...
(floor(max(camino.inst)/(interval/(24*60*60))))* ...
(interval/(24*60*60))';

% interpolamos la altura, latitud y longitud de la ruta
trayec.fl(:,1)=interp1(camino.inst,camino.fl,trayec.inst(:,1),...
    'lineal');
trayec.lat(:,1)=interp1(camino.inst,camino.lat,trayec.inst(:,1),...
    'lineal');
trayec.lon(:,1)=interp1(camino.inst,camino.lon,trayec.inst(:,1),...
    'lineal');
[trayectorias{i,1}]=trayec;
clear camino
end

```

---

#### Cálculo de las propiedades de cada trayectoria posible

Tras la localización de todas las trayectorias posibles, es necesario calcular una serie de propiedades asociadas a cada trayectoria posible, para calcular posteriormente la función objetivo de cada una de las planificaciones alternativas generadas. Estas propiedades, así como los algoritmos implementados para su cálculo, son:

- i) Tiempo medio y distancia desde la entrada hasta la salida del FIR Continental España, para cada trayectoria posible. En los vuelos con el aeropuerto origen y destino dentro del FIR, los puntos de entrada y salida de la región son, respectivamente, el primer y el último fijo con una altitud igual o superior a 18.000 pies<sup>15</sup>.

---

<sup>15</sup> Como ya se comentó en la sección de limpieza de los datos, solamente se toma la parte de ruta por encima de 18.000 pies.

Para calcular este tiempo medio se utiliza la información del instante de entrada y de salida del FIR de cada vuelo de la muestra. Para cada trayectoria posible, su tiempo medio se calculará a partir de la información de los vuelos correspondientes a dicha trayectoria posible.

Para el cálculo de la distancia se utiliza la información de la trayectoria posible (que es en sí misma una trayectoria 4D sintética), por lo que se trata de un valor fijo y no de un promedio. Se considera del primer al último punto de la trayectoria contenidos en el FIR España Continental, en el plano horizontal.

En la Tabla 3-6 se recoge el algoritmo implementado para el cálculo del tiempo medio y la distancia desde la entrada hasta la salida del FIR de cada trayectoria posible.

*Tabla 3-6 Algoritmo de cálculo del tiempo medio y la distancia desde la entrada hasta la salida del FIR de cada trayectoria posible*

---

```
function [ruta] = propiedades_ruta(ruta, trayectorias, v)

for i=1:length(ruta.id_ruta)
    % Distancia entrada salida
    ruta.dist_ent_sal(i,1)=...
        nansum(vdist(trayectorias{i,1}.lat(1:end-1,1),...
            trayectorias{i,1}.lon(1:end-1,1),...
            trayectorias{i,1}.lat(2:end,1),...
            trayectorias{i,1}.lon(2:end,1)));
    % tiempo entrada salida
    ruta.t_ent_sal(i,1)=mean(v.inst_sal(v.id_ruta==i)-...
        v.inst_ent(v.id_ruta==i));
end
```

---

- ii) Tiempo medio y distancia desde el aeropuerto de origen hasta el punto de entrada en el FIR, para cada trayectoria posible. Para calcular este tiempo se utiliza la información de la hora estimada de fuera de calzos (EOBT) y el instante de entrada en el FIR, de cada vuelo de la muestra. En los vuelos con el aeropuerto de origen dentro del FIR, el punto de entrada al mismo será el primer fijo con una altitud igual o superior a 18.000 pies.

Además, este tiempo dependerá de la trayectoria posible seguida, puesto que lleva implícita la velocidad y la altitud, de las cuales obviamente depende el tiempo de vuelo. Por ello, el proceso de cálculo de este tiempo seguirá los siguientes pasos:

- búsqueda de todas las posibles combinaciones de aeropuerto de origen y trayectorias posibles<sup>16</sup> (a las que se llama par origen-trayectoria), dentro de la muestra de vuelos; y
- cálculo del tiempo promedio, entre la EOBT y la hora de entrada en el FIR, de los vuelos de cada par origen-trayectoria.

Como ya se ha comentado, solo se dispone de la información de los fijos de paso dentro del FIR España Continental, por lo tanto la distancia entre el aeropuerto de origen y el punto de entrada en el FIR, ha sido simplificada como la distancia ortodrómica entre los mismos.

En la Tabla 3-7 se recoge el algoritmo implementado para el cálculo del tiempo medio y la distancia desde el aeropuerto de origen a la entrada en el FIR para cada par origen-trayectoria.

*Tabla 3-7 Algoritmo de cálculo del tiempo medio y la distancia desde el origen a la entrada en el FIR para cada par origen-trayectoria*

---

```
function [ruta_origen, v] = prop_origen_trayec(ruta, ...
                                             comb, v, aeropuerto)
v.origen=comb.origen(v.id_comb);
% Búsqueda de las combinaciones ruta-origen posibles
% Búsqueda de la ruta-origen a la que pertenece cada vuelo
[a,~,v.org_ruta]=unique(horzcata(v.origen,v.id_ruta),'rows');
origen_ruta=struct('id_origen',a(:,1),'id_ruta',a(:,2));

for i=1:length(origen_ruta.id_origen)
% distancia origen entrada
origen_ruta.dist_org_ent(i,1)=...
    vdist(aeropuerto.lat(origen_ruta.id_origen(i,1)),...
    aeropuerto.lon(origen_ruta.id_origen(i,1)),...
    fijos.lat(ruta.id_ent(origen_ruta.id_ruta(i,1))),...
    fijos.lon(ruta.id_ent(origen_ruta.id_ruta(i,1))));
% tiempo origen entrada
origen_ruta.t_org_ent(i,1)=...
    mean((v.inst_ent(v.org_ruta==i)-v.EOBT(v.org_ruta==i)));
% desviación tiempo origen entrada
origen_ruta.desvt_org_ent(i,1)=...
    std((v.inst_ent(v.org_ruta==i)-v.EOBT(v.org_ruta==i)));
end
```

---

<sup>16</sup> Como se ha indicado anteriormente, una trayectoria posible puede formar parte de distintas combinaciones O-D-A. En este caso se buscan todas aquellas trayectorias posibles con origen (O) común. Según se ha indicado, la trayectoria posible está limitada al espacio dentro del FIR considerado, por lo que no incluye el segmento entre el aeropuerto origen y la entrada al FIR.

- iii) Tiempo medio y distancia desde el punto de salida del FIR hasta el aeropuerto de destino, para cada trayectoria posible. Para calcular este tiempo se utiliza la información del instante de salida del FIR y la hora estimada de aterrizaje (ELDT) en el aeropuerto de destino, de cada vuelo de la muestra. En los vuelos con el aeropuerto de destino dentro del FIR, el punto de salida del mismo será el último fijo con una altitud igual o superior a 18.000 pies.

De nuevo, este tiempo dependerá de la trayectoria posible seguida, puesto que lleva implícita la velocidad y la altitud, de las cuales obviamente depende el tiempo de vuelo. Por ello, el proceso de cálculo de este tiempo será el siguiente:

- búsqueda de todas las posibles combinaciones de aeropuerto de destino y trayectorias posibles<sup>17</sup> (a las que se llama par destino-trayectoria), dentro de la muestra de vuelos; y
- cálculo del tiempo promedio, entre la hora de salida del FIR y la ELDT, de los vuelos de cada par destino-trayectoria.

Como ya se ha comentado, solo se dispone de la información de los fijos de paso dentro del FIR España Continental, por lo tanto la distancia desde el punto de salida del FIR y el aeropuerto de destino, ha sido simplificada como la distancia ortodrómica entre los mismos.

En la Tabla 3-8 se recoge el algoritmo implementado para el cálculo del tiempo medio y la distancia desde la salida del FIR hasta el aeropuerto de destino para cada par destino-trayectoria.

*Tabla 3-8 Algoritmo de cálculo del tiempo medio y la distancia desde la salida del FIR hasta el aeropuerto de destino para cada par destino-trayectoria.*

---

```
function [ruta_destino, v] = prop_datino_trayec(ruta, ...
                                             comb, v, aeropuerto)
v.destino=comb.destino(v.id_comb);
% Búsqueda de las combinaciones ruta-destino posibles
% Búsqueda de la ruta-destino a la que pertenece cada vuelo
[a,~,v.des_ruta]=unique(horzcat(v.destino,v.id_ruta),'rows');
destino_ruta=struct('id_destino',a(:,1),'id_ruta',a(:,2));
for i=1:1:length(destino_ruta.id_destino)
% distancia salida destino
```

---

<sup>17</sup> Como se ha indicado anteriormente, una trayectoria posible puede formar parte de distintas combinaciones O-D-A. En este caso se buscan todas aquellas trayectorias posibles con destino (D) común. Según se ha indicado, la trayectoria posible está limitada al espacio dentro del FIR considerado, por lo que no incluye el segmento entre la salida del FIR y el aeropuerto de destino.



---

```

destino_ruta.dist_sal_des(i,1)=...
    vdist(fijos.lat(ruta.id_sal(destino_ruta.id_ruta(i,1))),...
    fijos.lon(ruta.id_sal(destino_ruta.id_ruta(i,1))),...
    aeropuerto.lat(destino_ruta.id_destino(i,1)),...
    aeropuerto.lon(destino_ruta.id_destino(i,1)));
% tiempo salida destino
destino_ruta.t_sal_des(i,1)=...
    mean((v.ELDT(v.des_ruta==i)-v.inst_sal(v.des_ruta==i)));
% desviacion tiempo salida destino
destino_ruta.desvt_sal_des(i,1)=...
    std((v.ELDT(v.des_ruta==i)-v.inst_sal(v.des_ruta==i)));
end

```

---

iv) Consumo de combustible de cada trayectoria posible en función del modelo de aeronave empleado. El consumo de combustible dependerá del modelo de aeronave, por lo que el proceso de cálculo de este es como sigue:

- búsqueda de todas las posibles combinaciones de aeronave y trayectorias posibles<sup>18</sup> (a las que se llama par aeronave-trayectoria), dentro de la muestra de vuelos; y
- cálculo del consumo de combustible dentro del FIR España Continental para cada par aeronave-trayectoria, aplicando el modelo de prestaciones de aeronave BADA [112].

En la Tabla 3-9 se recoge el algoritmo implementado para el cálculo del consumo de combustible, dentro del FIR España Continental, para cada par aeronave-trayectoria.

*Tabla 3-9 Algoritmo cálculo del consumo de combustible para cada par aeronave-trayectoria*

---

```

function [ruta_aeronave, v] = consumo_combustible(ruta, ...
    trayectorias,comb, v, aircraft)
v.aeronave=comb.aeronave(v.id_comb);
% Búsqueda de los pares aeronave-trayectoria
[a,~,v.ruta_aeron]=unique(horzcat(v.id_ruta,v.aeronave),'rows');
ruta_aeronave=struct('id_ruta',a(:,1),'id_aeronave',a(:,2));
% Cálculo del consumo de combustibles por ruta-aeronave
for i=1:length(ruta_aeronave.id_ruta)
    trayec=trayectorias{ruta_aeronave.id_ruta(i),1};
    avion=aircraft{ruta_aeronave.id_aeronave(i)};
    [ruta_aeronave.fuel(i,1)] = fuel_isa(trayec,avion);
end

```

---

<sup>18</sup> Como se ha indicado anteriormente, una trayectoria posible puede formar parte de distintas combinaciones O-D-A. En este caso se buscan todas aquellas trayectorias posibles con aeronave (A) común.

Llegados a este punto se tiene el modelo de datos representados en la Figura 3-12, en el que se tiene relacionado cada vuelo de la muestra con: i) la combinación O-D-A a la pertenece; ii) su trayectoria posible; iii) el par origen-trayectoria al que pertenece y su correspondiente tiempo medio y distancia desde el origen hasta la entrada en el FIR iv) el par destino-trayectoria al que pertenece y su correspondiente tiempo medio y distancia desde la salida en el FIR hasta el destino; y v) el par aeronave-trayectoria al que pertenece y su correspondiente consumo de combustible.

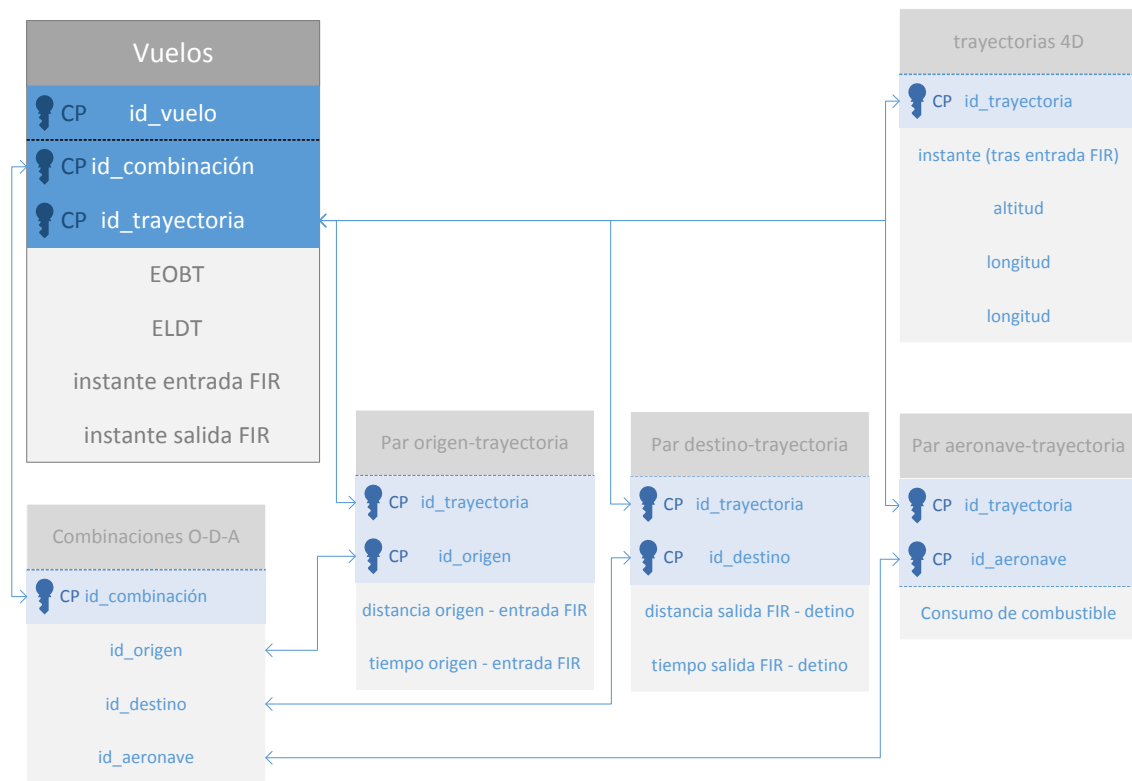


Figura 3-12 Esquema de datos de la tabla "Vuelos" tras la búsqueda de las trayectorias posibles y las propiedades de las mismas

#### Asociación de trayectorias posibles a cada combinación O-D-A

Este es el último paso para la creación del modelo que genere todas las trayectorias posibles (correspondientes al tramo dentro del FIR España Continental) para cada combinación O-D-A. Para desarrollarlo se parte del esquema de datos ilustrado en la tabla "Vuelos" de la Figura 3-12, en el que se tienen asociados todos los vuelos con su correspondiente combinación O-D-A y su trayectoria posible.

El proceso implementado se recoge en la Tabla 3-10.

Tabla 3-10 Algoritmo de búsqueda de las posibles rutas para cada combinación O-D-A

```
function [comb_ruta] = combinaciones_ruta(comb, v, ruta...
    origen_ruta, destino_ruta, ruta_aeronave)
comb_ruta(:,1)=comb.id;
for i=1:length(comb(:,1))
```

---

```

[a,~,c]=unique(v.id_ruta(v.id_comb==comb.id_comb(comb_ruta{i,1})));
% Búsqueda posibles rutas y su ocurrencia de la combinación i
co_ru.id_ruta=a;
co_ru.ocurrencia=hist(c,1:1:length(a)');

% Cálculo de distancia origen-destino de cada ruta de la combinación i
co_ru.dist_org_des=...
    origen_ruta.dist_org_ent(v.org_ruta(ruta.id_v(a)))+...
    ruta.dist_ent_sal(a)+...
    destino_ruta.dist_sal_des(v.des_ruta(ruta.id_v(a)));

% Cálculo de distancia entrada-salida de cada ruta de la combinación i
co_ru.dist_ent_sal=ruta.dist_ent_sal(a);

% Cálculo de tiempo origen-destino de cada ruta de la combinación i
co_ru.t_org_des=...
    origen_ruta.t_org_ent(v.org_ruta(ruta.id_v(a)))*24*60+...
    ruta.t_ent_sal(a)*24*60+...
    destino_ruta.t_sal_des(v.des_ruta(ruta.id_v(a)))*24*60;

% Cálculo de tiempo entrada-salida de cada ruta de la combinación i
co_ru.t_ent_sal=ruta.t_ent_sal(a)*24*60;

% Cálculo desviaciones estándar del tiempo origen-entrada
co_ru.desvt_org_ent=...
    origen_ruta.desvt_org_ent(v.org_ruta(ruta.id_v(a)))*24*60;

% Cálculo desviaciones estándar del tiempo salida-destino
co_ru.desvt_sal_des=...
    destino_ruta.desvt_sal_des(v.des_ruta(ruta.id_v(a)))*24*60;

% Cálculo consumo de combustible de cada ruta de la combinación i
co_ru.fuel=...
    ruta_aeronave.fuel(v.ruta_aeron(ruta.id_v(a)));

    comb_ruta{i,2}=co_ru;
    comb_ruta{i,3}=trayectorias(a);

    clear co_ru
end

```

---

De esta forma, finalmente, se obtiene un modelo (introducido previamente en la Figura 3-11) que proporciona todas las trayectorias posibles de una combinación O-D-A (representadas mediante trayectorias 4D) dentro del FIR España Continental. El modelo también proporciona las propiedades asociadas a cada trayectoria posible, que permitirán calcular las funciones objetivo en el proceso de búsqueda de la planificación óptima.

### 3.2.5 Aplicación del modelo. Cálculo de planificaciones alternativas

En esta sección, el modelo implementado se aplica a un conjunto de vuelos en un área y periodo determinado. En este estudio se consideran varios escenarios, con la información de los vuelos de un día dentro del FIR España Continental, para la validación de la metodología aquí desarrollada, los cuales se introducen en la sección 5.1. En decir, la

entrada al modelo será el conjunto de todos los vuelos a optimizar de cada escenario, con la información de su origen, destino, aeronave, hora estimada de fuera de calzos y hora estimada de aterrizaje<sup>19</sup>. El primer paso es calcular la combinación O-D-A a la que pertenecen los vuelos del escenario a optimizar.

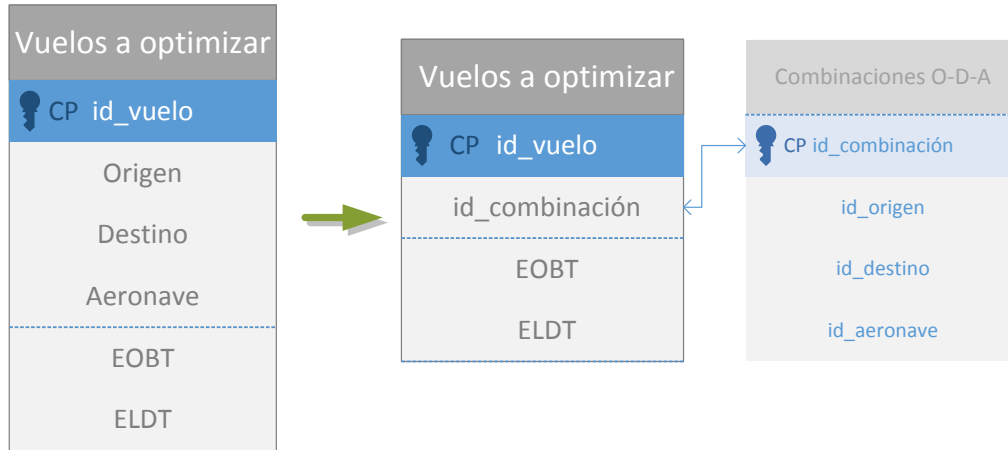


Figura 3-13 Esquema de datos de los vuelos a optimizar

A continuación, se genera un conjunto de planificaciones alternativas a la real para cada uno de los escenarios de estudio. Cada una de las planificaciones alternativas se genera tomando para cada vuelo, aleatoriamente, una trayectoria alternativa de entre todas las posibles obtenidas en el modelo *data-driven* previamente descrito.

Cada una de estas planificaciones alternativas constituye un “individuo solución” de la población inicial ( $P_0$ ) que es necesario generar para comenzar la optimización multiobjetivo basada en algoritmos evolutivos.

<sup>19</sup> La hora estimada de fuera de calzos y de aterrizaje son necesarias para el cálculo de la demora media de cada una de las planificaciones alternativa generadas en el proceso de optimización.

En la Figura 3-14 se esquematiza el proceso seguido para generar planificaciones alternativas.



Figura 3-14 Uso del modelo data-driven para la obtención de planificaciones alternativas

Además, para cada individuo solución de la población inicial, con el fin de obtener su aptitud, es necesario calcular el valor de las funciones objetivo a optimizar: i) consumo de combustible del conjunto de trayectorias, ii) número de desequilibrios entre capacidad y demanda, y iii) demora media de arribada.

A continuación se describe el proceso seguido para calcular las funciones objetivo de cada una de las planificaciones alternativas:

#### Cálculo del consumo de combustible (BADA Aircraft Performance Model)

La primera función objetivo de cada individuo solución es el consumo de combustible, del vuelo completo, del conjunto de nuevas trayectorias.

El consumo de combustible del vuelo completo se calcula extrapolando el consumo dentro del FIR España Continental al vuelo completo. Esta simplificación se ha realizado debido a que sólo se dispone del consumo de combustible dentro de dicha región puesto que es el tramo de vuelo que se está optimizando. Además dicha extrapolación es necesaria para evitar que en el proceso de optimización se premie a aquellas trayectorias que tienen menor recorrido dentro del FIR España Continental, pudiendo no ser las óptimas considerando el consumo de combustible del vuelo completo.

El consumo de combustible de cada una de las nuevas trayectorias se calculó previamente, en la sección 3.2.4 durante el desarrollo del modelo *data-driven*. Para el cálculo de dicho consumo de combustible se aplicó el modelo de prestaciones de aeronave BADA [112]:

- **Modelo Atmosférico:** Este modelo proporciona las propiedades de la atmósfera (temperatura  $\theta$ , presión  $p$  y densidad  $\rho$ ) en función de la altitud  $h$ , las cuales son necesarias para el de cálculo de las actuaciones de la aeronave. Lo más útil, y también lo más extendido en este tipo de estudios, es hacer uso del modelo de Atmósfera Estándar Internacional (ISA, *International Standard Atmosphere*) que se basa en las expresiones derivadas de considerar el aire como un gas perfecto.

$$\begin{aligned}\theta &= \theta_{SL} - \alpha_T \cdot h \\ p &= p_{SL} \left(1 - \frac{\alpha_T \cdot h}{\theta_{SL}}\right)^\delta \\ \rho &= \rho_{SL} \left(1 - \frac{\alpha_T \cdot h}{\theta_{SL}}\right)^{\delta-1} \\ \delta &= \frac{g}{R_a \cdot \alpha_T}\end{aligned}\tag{4}$$

donde los subíndices  $SL$  (*Sea Level*) se refieren a su valor a nivel del mar,  $\theta_{SL} = 288.15K$ ,  $p_{SL} = 1.01325 \cdot 10^5 N/m^2$ ,  $\rho_{SL} = 1.225 kg/m^3$ ;  $\alpha_T = 6.5 \cdot 10^{-3} K/m$  es el gradiente térmico;  $\delta$  es el rango de presión a nivel de mar;  $R_a = 287.05 J/(kg \cdot K)$  es la constante del aire; y  $g = 9.80665 m/s^2$  es la aceleración gravitatoria.

- **Modelo Aerodinámico:** En esencia, consiste en definir la expresión del coeficiente de resistencia aerodinámica.

El coeficiente de sustentación,  $C_L$ , se determina suponiendo que el ángulo de la trayectoria de vuelo es cero. Sin embargo, se hace una corrección para el ángulo de inclinación lateral  $\phi$  (el cual a su vez se calcula a partir velocidad de viraje  $\dot{\phi}$ ).

$$\begin{aligned}C_L &= \frac{2 \cdot m \cdot g}{\rho \cdot V^2 \cdot S \cdot \cos \phi}, \\ \tan \phi &= \frac{\dot{\phi} \cdot V}{g}\end{aligned}\tag{5}$$

donde  $m$  es la masa de la aeronave;  $V$  es la velocidad verdadera; y  $S$  es la superficie alar.

En condiciones nominales, el coeficiente de resistencia aerodinámica  $C_D$  se especifica como una función del coeficiente de sustentación  $C_L$ :

$$C_D = C_{D0,CR} + C_{D2,CR} \times (C_L)^2\tag{6}$$

donde  $C_{D0,CR}$  y  $C_{D2,CR}$  son coeficiente de resistencia aerodinámica para configuración de crucero.

La fuerza de resistencia aerodinámica ( $D$ ), se determina a partir del coeficiente de resistencia aerodinámica:

$$D = \frac{C_D \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S}{2}\tag{7}$$

- **Modelo Propulsivo y de Consumo:** Este modelo permite dar valor a las funciones de empuje  $T$  y de consumo de combustible.

$$T = D + \frac{m \cdot g}{V} \frac{dh}{dt} + m \frac{dV}{dt} \quad (8)$$

donde  $D$  es la resistencia aerodinámica;  $m$  es la masa del avión;  $g$  es la aceleración gravitatoria;  $V$  es la velocidad verdadera;  $h$  es la altitud; y  $d/dt$  es la derivada temporal.

Para los motores a reacción y turbohélice, el consumo específico de combustible,  $\eta$  (expresado en  $kg/min \cdot kN$ ), se especifica como una función de la velocidad verdadera,  $V$ :

$$\begin{aligned} jet: \eta &= C_{f1} \times \left(1 + \frac{V}{C_{f2}}\right) \\ turboprop: \eta &= C_{f1} \times \left(1 - \frac{V}{C_{f2}}\right) \times \left(\frac{V}{1000}\right) \end{aligned} \quad (9)$$

donde  $C_{f1}$ ,  $C_{f2}$  son el primer y segundo coeficientes de consumo específico, los cuales

En la fase de crucero, el consumo de combustible  $f_{CR}$  (expresado en  $kg/min$ ) se calcula utilizando un factor de flujo de combustible de crucero,  $C_{fcr}$ :

$$f_{CR} = \eta \times T \times C_{fcr} \quad (10)$$

Los coeficientes de resistencia  $C_{D0,CR}$ ,  $C_{D2,CR}$ ; la superficie alar  $S$ ; los coeficientes de consumo  $C_{f1}$ ,  $C_{f2}$  y  $C_{fcr}$ ; y la masa de referencia de la aeronave  $m_{ref}$  se obtienen de BADA, siendo distintas para cada modelo de aeronave.

#### Cálculo de los desequilibrios entre capacidad y demanda

La segunda función objetivo es el recuento de desequilibrios, entendidos como la suma de los excesos<sup>20</sup> de demanda frente a la capacidad horaria en cada uno de los sectores operativos durante el periodo de estudio.

La capacidad de un sector del espacio aéreo se define normalmente como un recuento de entradas, es decir como el número máximo de aeronaves que pueden entrar en un sector en un periodo de tiempo determinado (usualmente de una hora). Este conteo se

---

<sup>20</sup> Si hay un sector con un exceso de cinco vuelos frente a la capacidad, se contabilizan los cinco vuelos en lugar de contabilizar solamente las situaciones en las que se produjeron desequilibrios. Es decir, la función objetivo final será la suma de todos los vuelos en todos los intervalos horarios que excedieron a la capacidad, durante el periodo de estudio.

define, en términos de paso y duración, como la imagen tomada cada paso con un tiempo de exposición igual a la duración:

- El valor paso define la diferencia temporal entre el instante de comienzo de dos periodos consecutivos del recuento de entradas.
- El valor duración define la diferencia temporal entre el comienzo y fin de cada periodo del recuento de entradas.

En la Figura 3-15 se representa un ejemplo para un recuento de entradas con un paso de 20 minutos y una duración de una hora (en la primera hora se tienen seis entradas, y en la segunda hora se tienen cinco entradas).

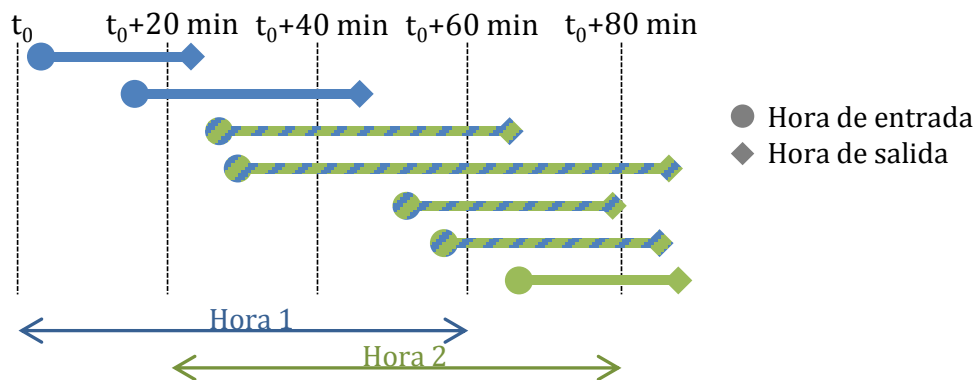


Figura 3-15 Recuento de entradas con un paso de 20 minutos y una duración de 1 hora

Para calcular los desequilibrios entre capacidad y demanda de cada de cada individuo solución se cuenta con la información de la configuración real utilizada en el periodo de estudio, además de la información de la capacidad declarada de cada uno de los sectores utilizados, de forma que dichos desequilibrios se dan como el exceso de demanda frente a la capacidad declarada en cada sector. La demanda horaria en cada sector se calcula teniendo en cuenta la nueva trayectoria de cada vuelo, como el número de entradas con un paso de 20 minutos y una duración de una hora.

Partiendo de los datos reales de configuraciones utilizadas, sectorización y volumetría (Figura 3-5), en primer lugar se determinarán los sectores operativos el día a optimizar, con su correspondiente capacidad operativa y los volúmenes elementales que lo forman. Esto se realizará cruzando las tablas de "Configuraciones reales" y "Sectorización", tal y como se muestra en la Figura 3-16.



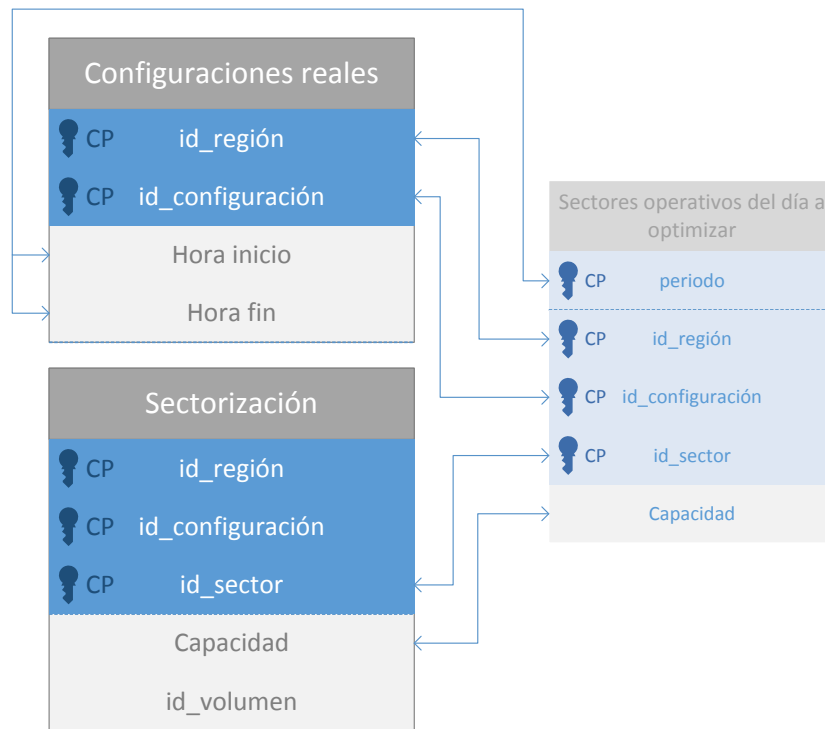


Figura 3-16 Esquema de cálculo de la tabla de "Sectores operativos del día a optimizar" con el dato de capacidad de cada sector.

A continuación, en la Tabla 3-11 se recoge el algoritmo implementado para el cálculo de los sectores operativos del día a optimizar.

Tabla 3-11 Algoritmo de búsqueda de los sectores operativos, el día de estudio, y su capacidad

```
function [sec_cap] = sectores_capacidad(dia, v, ruta...
    origen_ruta, destino_ruta, ruta_aeronave)

% Búsqueda de la tabla "Configuraciones Reales" los datos del
% día de estudio

sel=find(conf.inicio<datenum(dia,'yyyymmdd')+1&...
conf.fin>=datenum(dia,'yyyymmdd'));
conf=seleccionar(conf,sel);
clear sel

% Búsqueda de sectores operativos y su capacidad
sec_cap=struct('periodo',[],'id_acc',[],'id_config',[],...
    'id_sector',[],'capacidad',[],'id_vol',[]);

for i=1:length(conf.id_acc) % recorre todas los ACCs
    % y sus configuraciones
    for j=round((conf.inicio(i)-floor(conf.inicio(i)))*72)+1:1:...
        round((conf.fin(i)-floor(conf.fin(i)))*72)+2 % recorre
            % los periodos
% Localización del sector de para determinado ACC, config., y periodo
d.id_sector=sectorizacion.id_sector(sectorizacion.id_acc==...
conf.id_acc(i)&sectorizacion.id_config==conf.id_config(i));
```

```
% Localización de volúmenes elementales que componen dicho sector
d.id_vol=sectorizacion.id_vol(sectorizacion.id_acc==conf.id_acc(i)&...
    sectorizacion.id_config==conf.id_config(i));

% Localización de la capacidad de dicho sector
d.capacidad=sectorizacion.capacidad(sectorizacion.id_acc==...
    conf.id_acc(i)&sectorizacion.id_config==conf.id_config(i));

d.periodo(1:length(d.capacidad),1)=j;
d.id_acc(1:length(d.capacidad),1)=conf.id_acc(i);
d.id_config(1:length(d.capacidad),1)=conf.id_config(i);

sec_cap=unir(sec_cap,d);
clear d

end
end
```

Tras localizar los sectores operativos del día considerado, con su correspondiente capacidad operativa y los volúmenes elementales que los forman, el siguiente paso es calcular la demanda prevista en cada sector y periodo, para cada una de las planificaciones alternativas de la población inicial.

Para ello se cruzan las trayectorias obtenidas de todos los vuelos de cada una de las planificaciones alternativas, con la tabla de "Sectorización operativa el día a optimizar", previamente calculada, (Figura 3-16). Este proceso se detalla en la Figura 3-17.

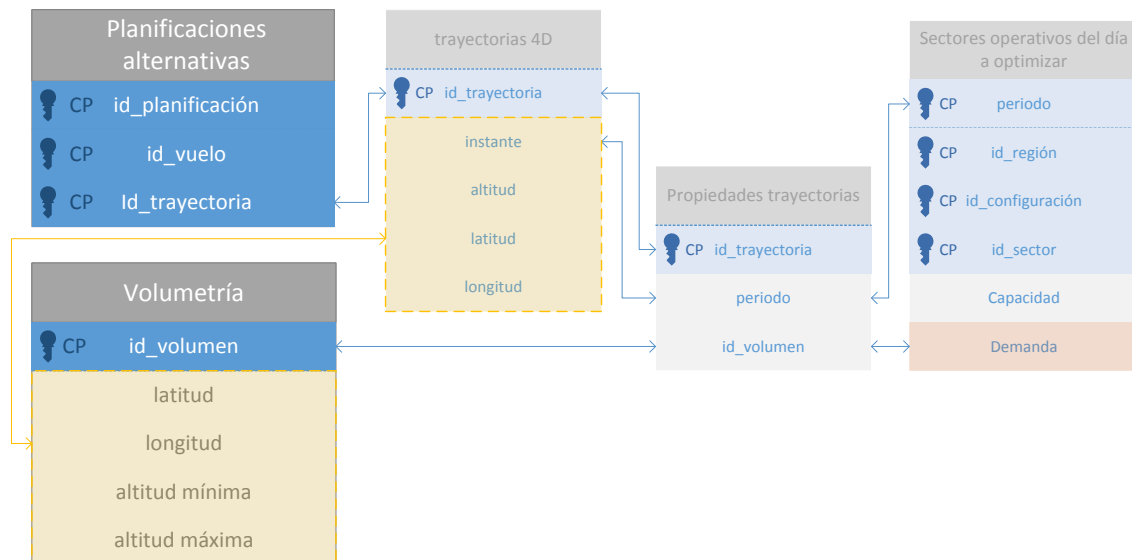


Figura 3-17 Esquema de cálculo de la demanda por sector y periodo, para cada planificación alternativa, del día a optimizar

A continuación, en la Tabla 3-12, se recoge el algoritmo implementado para el cálculo de la demanda por sector y periodo para cada planificación alternativa, del día a optimizar.

Tabla 3-12 Algoritmo cálculo de la demanda por sector y periodo, para cada planificación alternativa, del día a optimizar

---

```

function [desequil]=demanda(tr, sec_cap)

% Input: tr - contiene las trayectorias de la planificación
% alternativas de la que queremos calcular los desequilibrios

[a,~,c]=unique(horzcat(tr.inst,tr.id_vol,...
    tr.id_vuelo),'rows');
[a1,~,c1]=unique(a(:,1:2),'rows');
a1(:,3)=hist(c1,1:1:length(a1));
clear a c

for i=1:1:length(a1(:,1))
    sec_cap.deman(find(sec_cap.periodo==a1(i,1) & ...
        sec_cap.id_vol==a1(i,2)),1)=a1(i,3);
end
sec_cap.deman(length(sec_cap.deman):...
    length(sec_cap.deman)+(length(sec_cap.periodo)-
length(sec_cap.deman)))=0;
clear a1 c1
[a1,~,c1]=unique(horzcat(sec_cap.periodo,sec_cap.id_acc,sec_cap.id_con
fig,sec_cap.id_sector,sec_cap.capacidad),'rows');

imbalances=struct('periodo',a1(:,1),'id_acc',a1(:,2),'id_config', ...
    a1(:,3),'id_sector',a1(:,4),'capacidad',a1(:,5));
clear a1
for i=1:1:length(imbalances.periodo)

    imbalances.deman(i,1)=...
    sum(sec_cap.deman(sec_cap.periodo>=imbalances.periodo(i,1) &...
    sec_cap.periodo<=imbalances.periodo(i,1)+2&...
    sec_cap.id_acc==imbalances.id_acc(i,1) &...
    sec_cap.id_config==imbalances.id_config(i,1)&...
    sec_cap.id_sector==imbalances.id_sector(i,1)));

    imbalances.filtro(i,1)=...
    length(unique(sec_cap.periodo(...
    sec_cap.periodo>=imbalances.periodo(i,1) &...
    sec_cap.periodo<=imbalances.periodo(i,1)+2&...
    sec_cap.id_acc==imbalances.id_acc(i,1) &...
    sec_cap.id_config==imbalances.id_config(i,1) &...
    sec_cap.id_sector==imbalances.id_sector(i,1))));

end

del=find(imbalances.filtro<3);
sec_cap=borrar(sec_cap,del);

desequil=sum((sec_cap.deman(find((sec_cap.capacidad-
sec_cap.deman)<0))-...
    sec_cap.capacidad(find((sec_cap.capacidad-
sec_cap.deman)<0))));

```

---

*Cálculo de la demora de arribada*

La tercera función objetivo de cada individuo solución es la demora media de arribada. Dicha demora viene dada por la diferencia entre el tiempo total de vuelo obtenido de la planificación real y en la planificación alternativa.

Para el cálculo de la demora media es necesario calcular la demora de arribada individual de cada vuelo ( $d$ ), expresada en la siguiente función:

$$d^i = t_{real}^i - t_{trayectoria\ alternativa}^i \quad (11)$$

donde  $t_{real}^i$  y  $t_{trayectoria\ alternativa}^i$  son, respectivamente, el tiempo total de trayecto de un vuelo en la planificación real y del mismo vuelo en la planificación alternativa. El tiempo total de vuelo se calcula como la diferencia entre la hora estimada de aterrizaje y de fuera de calzos.

### 3.3 Módulo de búsqueda de la planificación óptima multiobjetivo

En este apartado se describe el segundo de los módulos para resolver el problema de planificación óptima de trayectorias, el cual se encarga de la optimización multiobjetivo que tiene en consideración los intereses de los distintos actores del sistema ATM. En primer lugar, se define qué es un problema multiobjetivo. A continuación, se explica la necesidad del uso de algoritmos evolutivos multiobjetivo para resolver el problema que aquí se afronta. Finalmente, se describe la aplicación del algoritmo NSGA-II, para la resolución del problema.

#### 3.3.1 Definición del problema multiobjetivo

Como se anticipó en la sección 2.2, se puede definir el problema de optimización multiobjetivo como: “la tarea de encontrar un vector de variables de decisión que satisfaga restricciones y optimice un vector de funciones objetivo. Esas funciones, generalmente en conflicto unas con otras, describen matemáticamente un criterio de desempeño. Por lo tanto, el término optimizar significa encontrar un vector solución con valores aceptables para todas las funciones objetivo” [114].

Cualquier problema de optimización multiobjetivo se formula de manera general como:

Encontrar el vector de variables de estado  $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$  que optimice el conjunto de funciones objetivo  $[f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), \dots, f_M(\bar{x})]$ , satisfaciendo las restricciones:

$$g_i(\bar{x}) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, u \quad (12)$$

$$h_i(\bar{x}) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (13)$$

donde  $M$  es el número de funciones objetivo;  $N$  es el número de variables de estado;  $u$  es el número de restricciones de desigualdad y  $p$  de restricciones de igualdad.

En el problema que aquí se aborda, el vector de variables de estado  $\bar{x}$  está formado por las trayectorias alternativas de cada uno de los vuelos del día para el que estamos buscando la planificación óptima. Las funciones objetivo, como se ha indicado, serán i) el consumo de combustible; ii) los desequilibrios entre capacidad demanda; y iii) la demora generada por este conjunto de trayectorias alternativas.

#### Óptimo de Pareto

Es prácticamente imposible, y más en problemas de cierta entidad, que pueda existir un solo vector  $\bar{x}$  que optimice simultáneamente todos los objetivos. En términos de minimización de objetivos, se dice que un vector  $\bar{x} \in \Sigma$  es *óptimo de Pareto* si no existe otro  $\bar{x} \in \Sigma$  tal que  $f_i(\bar{x}) \geq f_i(\bar{x})$  para toda  $i = 1, 2, \dots, m$  y  $f_j(\bar{x}) > f_j(\bar{x})$  para cualquier  $j$ , donde  $\Sigma$  es el espacio solución. Es decir,  $\bar{x}$  es óptimo de Pareto si no existe un vector

factible de variables de estado  $\bar{x} \in \Sigma$  que produzca un decremento en alguno de los criterios sin causar un incremento simultáneo en alguno de los otros criterios.

En la Figura 3-18, se muestra el caso de un problema con dos objetivos a minimizar con sus respectivas funciones objetivo. En la misma, los puntos verdes nombrados con letras son óptimos de Pareto, pues no hay otra solución de  $\Sigma$  que consiga reducir los valores de  $f_1$  y  $f_2$  simultáneamente.

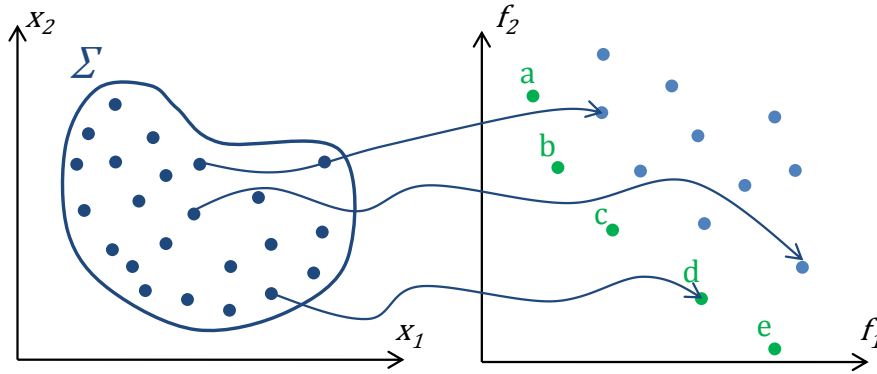


Figura 3-18 Las soluciones a-e son óptimos de Pareto del conjunto de soluciones  $\Sigma$

#### Dominancia de Pareto

Uno de los conceptos fundamentales de la optimización multiobjetivo basada en conjuntos de Pareto es el de “Dominancia de Pareto”. Se dice que solución  $\bar{x}_1$  domina a otra solución  $\bar{x}_2$  si y solo si  $\bar{x}_1$  es parcialmente menor a  $\bar{x}_2$ . Es decir, si se cumple que: i) la solución  $\bar{x}_1$  no es de menor calidad que  $\bar{x}_2$  en ninguno de los objetivos; y ii) la solución  $\bar{x}_1$  es estrictamente mejor que  $\bar{x}_2$  en al menos uno de los objetivos.

Expresado matemáticamente:

$$\bar{x}_1 < \bar{x}_2 \text{ si } i, k \in \{1, \dots, m\}, f_i(\bar{x}_1) \leq f_i(\bar{x}_2) \wedge \exists k: f_k(\bar{x}_1) < f_k(\bar{x}_2) \quad (14)$$

En la Figura 3-19, la solución  $b$  domina a todas las soluciones en rojo, que no consiguen un valor menor en ninguno de los dos objetivos.

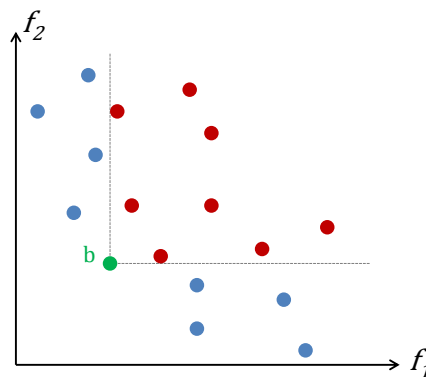


Figura 3-19 Soluciones dominadas y no dominadas por la solución  $b$

### Frente de Pareto

Para un problema multiobjetivo dado  $\min[f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), \dots, f_m(\bar{x})]$ , el conjunto óptimo de Pareto ( $P$ ), o frente de Pareto, se define como:

$$P = \{\bar{x} \in S \mid \nexists \bar{x}' \in \Sigma: \bar{x} < \bar{x}'\} \quad (15)$$

Por tanto, el frente de Pareto de un determinado problema está formado por todas aquellas soluciones  $\bar{x}$  que no son dominadas por ninguna otra perteneciente al espacio de soluciones  $S$ . En la Figura 3-20 se representa el frente de Pareto y las soluciones dominadas en rojo.

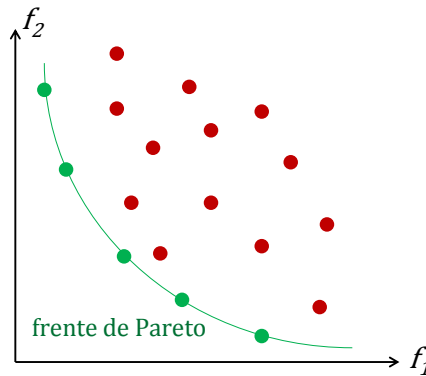


Figura 3-20 Frente de Pareto

### 3.3.2 Algoritmos evolutivos multiobjetivo

En nuestro problema, el espacio solución está formado por todas las posibles planificaciones generadas al combinar todos los vuelos de la muestra a optimizar con todas sus trayectorias posibles. En promedio cada día hay unos 4000 vuelos, y cada vuelo tiene una media de 70 trayectorias posibles, lo que genera unas  $70^{4000}$  planificaciones alternativas distintas. Como es evidente resulta imposible evaluar todas las soluciones posibles, por lo que se tendrá que recurrir al uso de técnicas de optimización para resolverlo.

Como ya se introdujo durante la revisión de la literatura en la sección 2.2.2, la optimización multiobjetivo basada en técnicas evolutivas es un método heurístico que surgió con el fin de resolver este tipo de problemas, caracterizado por ser capaz de obtener un conjunto de soluciones, con los mejores compromisos entre los objetivos optimizados (frente de Pareto).

Como también se recogió en la sección 2.2.2, en la década de los 90, se comenzó el desarrollo de los algoritmos evolutivos multiobjetivo (MOEAs), con MOGA de Fonseca y Fleming [60], NSGA de Srinivas y Deb [150], y NPGA de Horn et al. [71]. Las dos características comunes de estos algoritmos son: i) la asignación de la aptitud a los

miembros de la población basada en una clasificación de dominancia, y ii) la preservación de la diversidad entre las soluciones de un mismo frente no dominado.

Deb et al. [38][39] presentaron el algoritmo NSGA-II, una versión mejorada de la técnica NSGA. Con dicho algoritmo se introdujo el elitismo [130] como mecanismo de búsqueda, aportando una mayor eficiencia, al reducir los tiempos de computación y mejorar la forma del frente de Pareto. Como ya se comentó, el mecanismo elitista de la NSGA-II consiste en combinar los mejores padres con la mejor descendencia obtenida. Este mecanismo hace que su rendimiento sea muy bueno, lo que lo ha hecho muy popular en los últimos años, convirtiéndose en un hito frente a otros MOEAs.

### 3.3.3 Algoritmo NSGA-II (*Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*)

En este estudio se ha utilizado el algoritmo NSGA-II, uno de los más conocidos algoritmos multiobjetivo, clasificado como de tipo elitista, ya que incorpora un mecanismo de preservación de las soluciones dominantes a través de varias generaciones de un algoritmo genético.

A continuación, se resumen los principales pasos seguidos para la implementación de este algoritmo:

#### Aproximación de ordenamiento rápido no dominado

El primer paso es describir un procedimiento sencillo para clasificar una población en diferentes frentes no dominados.

Este consiste en que primero para cada solución  $\pi$  se calcula: i) el recuento de dominancia  $np$ , como el número de soluciones que dominan dicha solución  $\pi$  y, ii) el conjunto de soluciones  $Sp$  a las que domina la solución  $\pi$ . Para cada solución  $\pi$  con  $np = 0$ , se recorre cada miembro  $q$  de su conjunto  $Sp$  reduciendo su correspondiente recuento de dominancia en uno. De este modo, si para cualquier miembro  $q$  su recuento de dominancia se convierte en cero, se pone en una lista separada  $Q$  (estos miembros pertenecen al segundo frente no dominados). Ahora, el procedimiento anterior se continúa con cada miembro de  $Q$  para identificar el tercer frente no dominado. Este proceso continúa hasta que se identifican todos los frentes.

Para integrar este procedimiento, en la creación de nuestro módulo de búsqueda de la planificación óptima se ha utilizado el algoritmo implementado en MATLAB por Aravind Seshadri y que se muestra en la Tabla 3-13

Tabla 3-13 Algoritmo de ordenamiento rápido no dominado [39][150]. (Copyright (c) 2009, Aravind Seshadri)

---

```
% Copyright (c) 2009, Aravind Seshadri. All rights reserved.
%% Non-Dominated sort.
for i = 1 : N
    % Number of individuals that dominate this individual
```

---



---

```

individual(i).n = 0;
% Individuals which this individual dominate
individual(i).p = [];
for j = 1 : N
    dom_less = 0;
    dom_equal = 0;
    dom_more = 0;
    for k = 1 : M
        if (x(i,V + k) < x(j,V + k))
            dom_less = dom_less + 1;
        elseif (x(i,V + k) == x(j,V + k))
            dom_equal = dom_equal + 1;
        else
            dom_more = dom_more + 1;
        end
    end
    if dom_less == 0 && dom_equal ~= M
        individual(i).n = individual(i).n + 1;
    elseif dom_more == 0 && dom_equal ~= M
        individual(i).p = [individual(i).p j];
    end
end
if individual(i).n == 0
    x(i,M + V + 1) = 1;
    F(front).f = [F(front).f i];
end
end
% Find the subsequent fronts
while ~isempty(F(front).f)
    Q = [];
    for i = 1 : length(F(front).f)
        if ~isempty(individual(F(front).f(i)).p)
            for j = 1 : length(individual(F(front).f(i)).p)
                individual(individual(F(front).f(i)).p(j)).n = ...
                    individual(individual(F(front).f(i)).p(j)).n - 1;
                if individual(individual(F(front).f(i)).p(j)).n == 0
                    x(individual(F(front).f(i)).p(j),M + V + 1) = ...
                        front + 1;
                    Q = [Q individual(F(front).f(i)).p(j)];
                end
            end
        end
    end
    front = front + 1;
    F(front).f = Q;
end

[temp,index_of_fronts] = sort(x(:,M + V + 1));
for i = 1 : length(index_of_fronts)
    sorted_based_on_front(i,:) = x(index_of_fronts(i),:);
end
current_index = 0;

```

---

Preservación de la diversidad (Operador de Apilamiento)

Además de la convergencia hacia el conjunto óptimo de Pareto, también se quiere que el algoritmo genético mantenga una proliferación de las soluciones obtenidas. El Operador de Apilamiento permite cuantificar el espacio alrededor de una alternativa que no se encuentra ocupada por ninguna otra solución. Para esto se calcula la distancia de apilamiento ( $d_i$ ), dada por el perímetro del cuboide (Figura 3-21) formado por las soluciones vecinas que poseen el mismo rango de dominancia que la alternativa  $i$ :

$$d_i = \sum_{m=1}^M \left| \frac{f_m^{(I_{i+1}^m)} - f_m^{(I_{i-1}^m)}}{f_m^{max} - f_m^{min}} \right| \quad (16)$$

donde  $I^m$  es un vector que indica la alternativa de solución vecina a la alternativa  $i$ ,  $f_m^{max}$  y  $f_m^{min}$  son los valores máximo y mínimo sobre todo el espacio de solución de la función objetivo  $M$ , y  $\Pi$  es el número de funciones objetivo optimizadas.

Se puede afirmar que para un conjunto de soluciones en competencia, la alternativa que introduce el mayor nivel de diversidad es aquella con la mayor distancia de apilamiento.

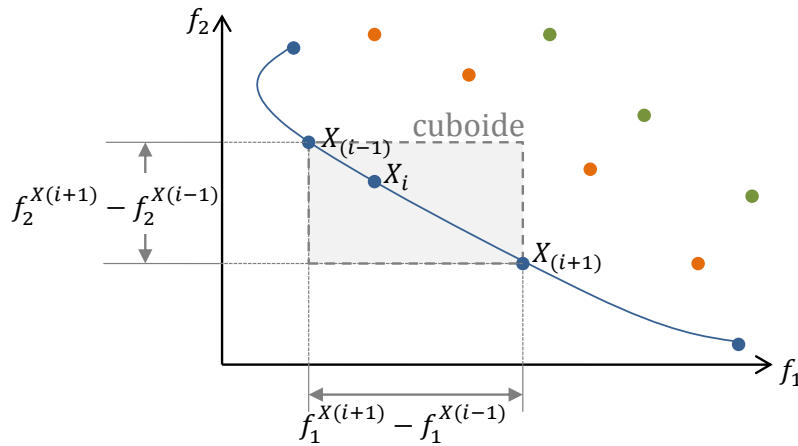


Figura 3-21 Distancia de apilamiento

De nuevo se ha tomado el algoritmo implementado en MATLAB por Aravind Seshadri y que se muestra en la Tabla 3-14.

Tabla 3-14 Algoritmo de cálculo del operador de apilamiento (Copyright (c) 2009, Aravind Seshadri)

```
% Copyright (c) 2009, Aravind Seshadri. All rights reserved.
for front = 1 : (length(F) - 1)
    distance = 0;
    y = [];
    previous_index = current_index + 1;
    for i = 1 : length(F(front).f)
        y(i,:) = sorted_based_on_front(current_index + i,:);
    end
    current_index = current_index + i;
```

---

```

    % Sort each individual based on the objective
    sorted_based_on_objective = [];
    for i = 1 : M
        [sorted_based_on_objective, index_of_objectives] = sort(y(:,V + i));
        sorted_based_on_objective = [];
        for j = 1 : length(index_of_objectives)
            sorted_based_on_objective(j,:) = y(index_of_objectives(j),:);
        end
        f_max = ...
        sorted_based_on_objective(length(index_of_objectives), V + i);
        f_min = sorted_based_on_objective(1, V + i);
        y(index_of_objectives(length(index_of_objectives)), M + V + 1 + i) ...
            = Inf;
        y(index_of_objectives(1), M + V + 1 + i) = Inf;
        for j = 2 : length(index_of_objectives) - 1
            next_obj = sorted_based_on_objective(j + 1, V + i);
            previous_obj = sorted_based_on_objective(j - 1, V + i);
            if (f_max - f_min == 0)
                y(index_of_objectives(j), M + V + 1 + i) = Inf;
            else
                y(index_of_objectives(j), M + V + 1 + i) = ...
                    (next_obj - previous_obj) / (f_max - f_min);
            end
        end
        end
        distance = [];
        distance(:,1) = zeros(length(F(front).f),1);
        for i = 1 : M
            distance(:,1) = distance(:,1) + y(:,M + V + 1 + i);
        end
        y(:,M + V + 2) = distance;
        y = y(:,1 : M + V + 2);
        z(previous_index:current_index,:) = y;
    end
    f = z();

```

---

### Selección por torneo según operador de apilamiento

Este procedimiento reemplaza la selección usada en el algoritmo genético tradicional. Consiste en comparar dos soluciones las cuales poseen, cada una, dos atributos:

- Un rango de no dominancia  $r_i$ , según el frente de Pareto.
- Una distancia local de apilamiento  $d_i$ .

La selección retorna la solución ganadora  $i$  basándose en dos criterios fundamentales:

- Si tiene mejor rango:  $r_i < r_j$
- Si tienen el mismo rango pero  $i$  tiene mejor distancia de apilamiento:  $d_i > d_j$

De nuevo se ha tomado el algoritmo implementado en MATLAB por Aravind Seshadri y que se muestra en la Tabla 3-15.

Tabla 3-15 Algoritmo de selección por torneo (Copyright (c) 2009, Aravind Seshadri)

---

```

function f = tournament_selection(chromosome, pool_size, tour_size)
% Copyright (c) 2009, Aravind Seshadri. All rights reserved.
[pop, variables] = size(chromosome);
% The penultimate element contains the information about rank.
rank = variables - 1;
distance = variables;
% Until the mating pool is filled, perform tournament selection
for i = 1 : pool_size
    % Select n individuals at random, where n = tour_size
    for j = 1 : tour_size
        % Select an individual at random
        candidate(j) = round(pop*rand(1));
        % Make sure that the array starts from one.
        if candidate(j) == 0
            candidate(j) = 1;
        end
        if j > 1
            % Make sure that same candidate is not choosen.
            while ~isempty(find(candidate(1 : j - 1) == candidate(j)))
                candidate(j) = round(pop*rand(1));
                if candidate(j) == 0
                    candidate(j) = 1;
                end
            end
        end
    end
    % Collect information about the selected candidates.
    for j = 1 : tour_size
        c_obj_rank(j) = chromosome(candidate(j),rank);
        c_obj_distance(j) = chromosome(candidate(j),distance);
    end
    % Find the candidate with the least rank
    min_candidate = ...
        find(c_obj_rank == min(c_obj_rank));
    % If more than one candidate the least rank (maximum crowding distance)
    if length(min_candidate) ~= 1
        max_candidate = find(c_obj_distance(min_candidate) == ...
            max(c_obj_distance(min_candidate)));
    % If a few individuals have the least rank and have maximum crowding
    if length(max_candidate) ~= 1
        max_candidate = max_candidate(1);
    end
    % Add the selected individual to the mating pool
    f(i,:) = chromosome(candidate(min_candidate(max_candidate)),:);
    else
        % Add the selected individual to the mating pool
        f(i,:) = chromosome(candidate(min_candidate(1)),:);
    end
end
end

```

---

### Operadores genéticos de cruce y mutación

El cruce y la mutación se basan en considerar los vuelos de cada planificación alternativa (individuo) como los alelos del genotipo del dicho individuo y trayectorias posibles de cada uno de dichos vuelos como los valores que puede tomar el alelo.

El operador de cruce consiste en intercambiar las trayectorias de determinados vuelos de dos soluciones ‘padres’ para generar dos nuevas soluciones ‘descendientes’. En la Figura 3-22 se ilustra el proceso, donde  $\lambda_b^i$  y  $\lambda_q^i$  son las trayectorias del vuelo  $i$  de cada uno de los padres implicados en el cruce; con  $i = 1, \dots, n$  siendo  $n$  el número de vuelos.  $\Lambda^i$  es el conjunto de trayectorias posibles del vuelo  $i$ .

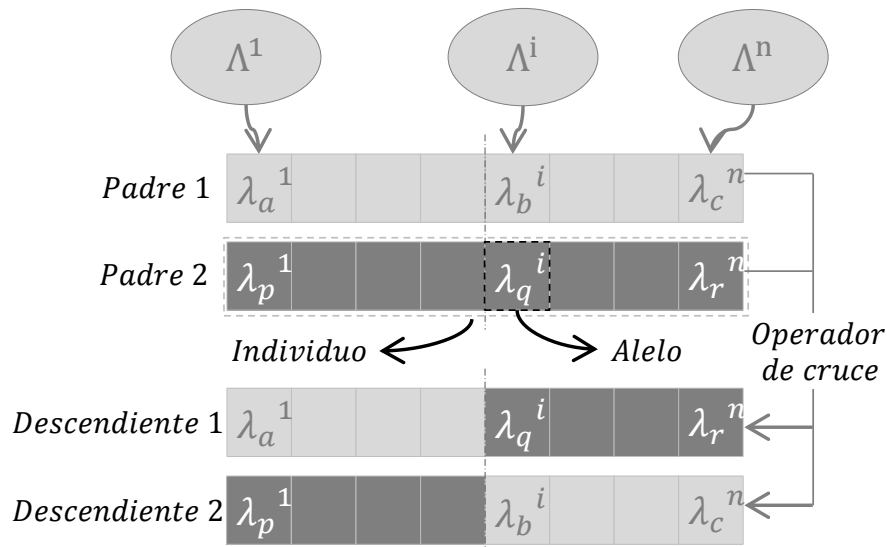


Figura 3-22 Ilustración del operador de cruce

A continuación, Tabla 3-16, se recoge el algoritmo que se ha implementado para realizar la operación de cruce de la población. En dicho algoritmo las trayectorias de determinados vuelos de una de las planificaciones alternativas son intercambiadas con las trayectorias de los vuelos de una segunda planificación. Este proceso se realiza para un porcentaje determinado de las planificaciones.

Tabla 3-16 Algoritmo del operador de cruce

```

%% Operador de cruce
[c1] = alea_sin_rep(1,cro_pop,cro_pop);
c(1:cro_pop/2,1)=c1(1:cro_pop/2,1);
c(1:cro_pop/2,2)=c1((cro_pop/2)+1:end,1);
x_cro_ch={};
cro_ch=[];

for i=1:1:cro_pop/2
    x1=x_to_cro_ch{c(i,1),1};
    x2=x_to_cro_ch{c(i,2),1};
    x1=horzcat((1:1:len)',x1);
    x2=horzcat((1:1:len)',x2);
    
```

```
[d1] = alea_sin_rep(1,len,len);
if rem(len,2)==0 %len es par
    d(1:len/2,1)=d1(1:len/2,1);
    d(1:len/2,2)=d1((len/2)+1:end,1);
    x3=vertcat(x1(d(:,1),:),x2(d(:,2),:));
    x4=vertcat(x1(d(:,2),:),x2(d(:,1),:));
else
    d(1:(len-1)/2,1)=d1(1:(len-1)/2,1);
    d(1:(len-1)/2,2)=d1((len-1)/2+1:end-1,1);
    x3=vertcat(x1(d(:,1),:),x2(d(:,2),:),x2(d1(end,1),:));
    x4=vertcat(x1(d(:,2),:),x2(d(:,1),:),x2(d1(end,1),:));
end

clear x1 x2
x3=sortrows(x3,1);
x4=sortrows(x4,1);
x3(:,1)=[];
x4(:,1)=[];

% Cálculo de funciones objetivo de las nuevas planificaciones tras el
% cruce
[f3,x3]=alelo(x3,v_opt,comb_dia,tr_reman,volumenes,dia,cap_dem);
[f4,x4]=alelo(x4,v_opt,comb_dia,tr_reman,volumenes,dia,cap_dem);
x_cro_ch=vertcat(x_cro_ch,x3,x4);
cro_ch=vertcat(cro_ch,f3,f4);
clear d d1 f3 f4 x3 x4
end
```

El operador de mutación consiste en buscar aleatoriamente nuevas trayectorias (entre todas las posibles trayectorias obtenidas en el modelo *data-driven* desarrollado) de determinados vuelos de una solución ‘padre’ para crear una nueva solución ‘descendiente’. En la Figura 3-23 se ilustra el proceso, donde  $\lambda_b^i$  es la trayectoria del vuelo  $i$  del individuo padre, y  $\lambda_u^i$  es la trayectoria de dicho vuelo del individuo descendiente tras aplicar el operador de mutación.

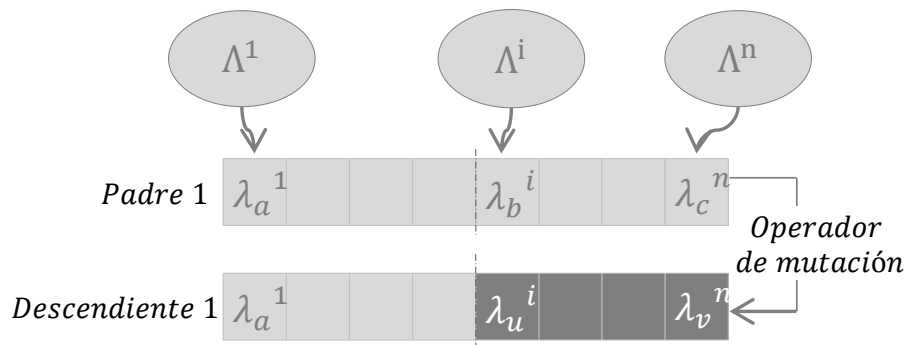


Figura 3-23 Ilustración del operador de mutación

En la Tabla 3-17 a continuación, se recoge el algoritmo que se ha implementado para realizar la operación de mutación de la población. En dicho algoritmo las trayectorias de

varios vuelos de una de las planificaciones alternativas son modificadas. Para realizar esta modificación se vuelve a tomar aleatoriamente una trayectoria para esos vuelos, de entre todas las posibles obtenidas en el modelo *data-driven* desarrollado en la sección 3.2.4

Tabla 3-17 Algoritmo del operador de mutación

```
%% Operador de mutación
x_fu_mut_ch={};
mut_fu_ch=[];
for i=1:1:mut_fu_pop
    xm=x_to_mut_ch{i,1};
    [d1] = alea_sin_rep(1,len,len);
    d1=d1(1:floor(len/2));
    xm(d1,2)=1;

    %Cálculo de funciones objetivo de las nuevas planificaciones de
    mutacion
    [fm,xm]=alelo_mut_fu(xm,v_opt,comb_dia,tr_reman,volumenes,dia,cap_dem)

    x_fu_mut_ch=vertcat(x_fu_mut_ch,xm);
    mut_fu_ch=vertcat(mut_fu_ch,fm);
clear    d1 xm fm
end
```

### Recombinación y Selección

Antes de finalizar una generación del algoritmo se ejecuta un proceso de preselección y preservación de las soluciones de élite, que consiste en reunir el conjunto de soluciones padres y los descendientes obtenidos por medio de los operadores de selección, cruce y mutación. De esta manera la población actual aumenta al doble de los individuos de la población inicial. Para ello es necesario clasificar el conjunto completo en sus respectivos frentes de dominancia y preservar los individuos que pertenezcan a los frentes de mejor calidad.

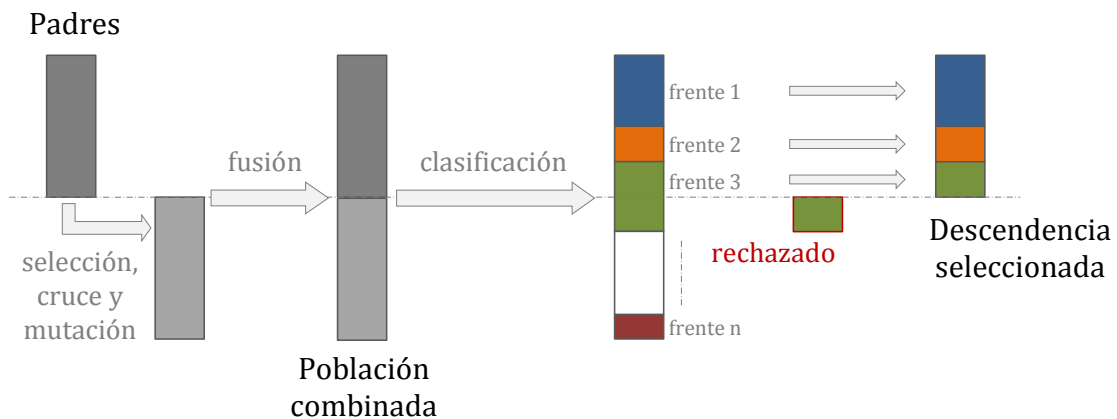


Figura 3-24 Recombinación y selección

Diagrama de flujo de algoritmo NSGA-II

Tras la obtención de una población inicial  $P_0$  (sección 3.2.5) y calcular las funciones objetivo de cada individuo solución, esta se clasifica en frentes usando ordenamiento no dominado. Tras ello comienza la iteración  $gen = 0$  del algoritmo NSGA-II en el que: i) primero se realiza la selección, cruce y mutación que genera la población de hijos  $Q_{gen}$  del mismo tamaño que  $P_{gen}$ ; ii) a continuación, se combinan la población de padres  $P_{gen}$  y de hijos  $Q_{gen}$ ; y iii) finalmente, se calcula la población final (considerando el frente de dominancia y la distancia de apilamiento de cada individuo) que será la nueva población de padres  $P_{gen+1}$  de la siguiente iteración. Si se cumple el criterio de convergencia, se finaliza el proceso; de lo contrario se realiza una nueva iteración ( $gen = gen + 1$ ).

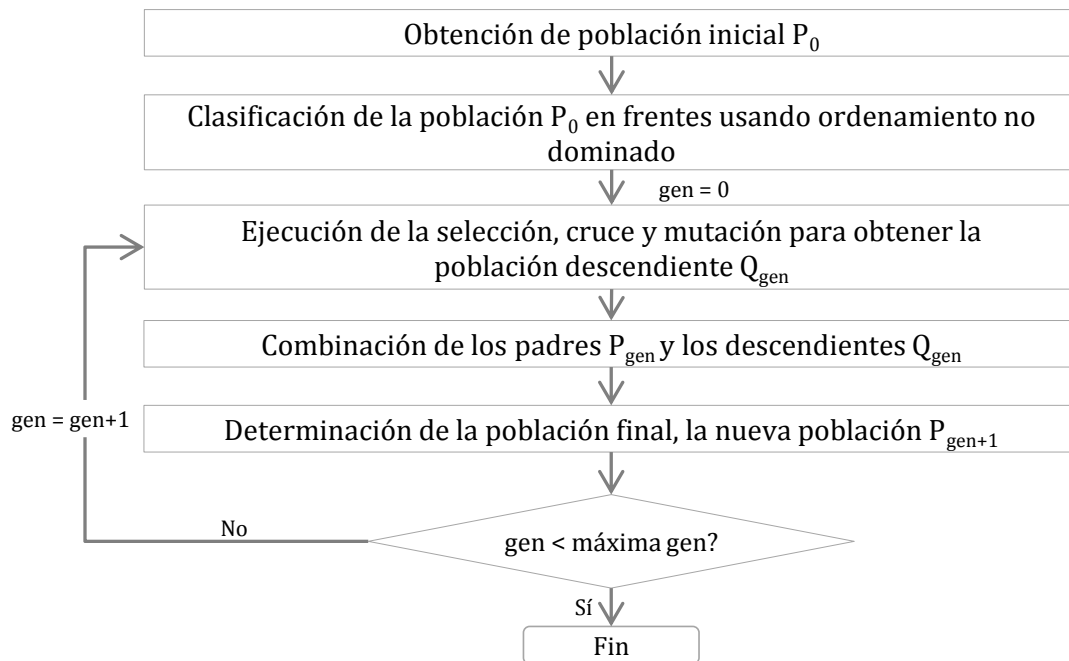


Figura 3-25 Diagrama de flujo algoritmo NSGA-II

A continuación se recoge el algoritmo, Tabla 3-18, utilizado, implementado en MATLAB por A. Seshadri, que se ha utilizado en el presenta estudio. Respecto al algoritmo original implementado por Seshadri, se han realizado una serie de modificaciones, como es la creación, e implementación de los algoritmos, de unos operadores de cruce y mutación *ad hoc* para el presente problema a resolver.

Tabla 3-18 Algoritmo general NSGA-II (Copyright (c) 2009, Aravind Seshadri)

```

% Copyright (c) 2009, Aravind Seshadri. All rights reserved.
%% Objective Function
M=3; % M is the dimension of the objective space,
%% Initialize the population
dir_nsga=dir(directorio);

if length(dir_nsga(:,1))-2==1
    chromosome=x;
  
```



---

```

        %% Sort the initialized population
        chromosome = non_domination_sort_mod(chromosome, M, V);
        [~,ids_chromosome]=ismember(chromosome(:,1),x(:,1));
        y_chromosome=y(ids_chromosome,1);
        i=0;
        mejora=0;
        clear dir_nsga
    else
        load(strcat(directorio,sep,'loop_',num2str(length(dir_nsga(:,1))-
3),'.mat'),'LOOP')
        chromosome =LOOP{1,4};
        y_chromosome =LOOP{1,5};
        i=length(dir_nsga(:,1))-3;
        mejora=LOOP{1,6};
        clear LOOP dir_nsga
    end

%% Sort the initialized population (using non-domination-sort)
chromosome = non_domination_sort_mod(chromosome, M, V);

%% Start the evolution process
for i = 1 : gen
    % Select the parents
    % pool - It is common to have this to be half the population size.
    % tour - Tournament size. Original NSGA-II uses binary tournament
    pool = round(pop/2);
    tour = 2;
    % Selection process (binary tournament selection is employed)
    parent_chromosome = tournament_selection(chromosome, pool, tour);
    % Perfrom crossover and Mutation operator
    mu = 20;
    mum = 20;
    offspring_chromosome = ...
        genetic_operator(parent_chromosome, ...
            M, V, mu, mum, min_range, max_range);

    % Intermediate population
    [main_pop,temp] = size(chromosome);
    [offspring_pop,temp] = size(offspring_chromosome);
    clear temp

    % intermediate_chromosome is a concatenation of current population
    % and the offspring population.
    intermediate_chromosome(1:main_pop,:) = chromosome;
    intermediate_chromosome(main_pop + 1 : main_pop + ...
offspring_pop, 1 : M+V) = offspring_chromosome;

    % Non-domination-sort of intermediate population
    intermediate_chromosome = ...
        non_domination_sort_mod(intermediate_chromosome, M, V);

    % Perform Selection
    chromosome = replace_chromosome(intermediate_chromosome, M, V, pop);
    if ~mod(i,100)
        clc
        fprintf('%d generations completed\n',i);
    end
end
end

```

---

### *Selección del tamaño de la población*

La dimensión de la población ha sido un tema clave a considerar en la computación evolutiva [1][41]. Un tamaño de población "pequeño" podría guiar al algoritmo a soluciones deficientes [119], y un tamaño de población "grande" podría hacer que el algoritmo gastara más tiempo de cálculo en encontrar una solución [97]. Estudios realizados por Rosenthal y Borschbach [128] mostraron que el tamaño óptimo de la población con respecto a la convergencia y la diversidad está en un rango limitado de 70 a 100 individuos.

Para poder determinar el tamaño adecuado de la población en el problema que aquí se afronta, en este estudio se han realizado tres experimentos con una población de 50, 100 y 200 individuos. En la sección 5.3.2 se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los experimentos, así como la conclusión del tamaño más adecuado a utilizar.

## Capítulo 4. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROBLEMA DE RESOLUCIÓN ESTRATÉGICA DE CONFLICTOS

---

Este capítulo establece el marco matemático de la metodología de resolución de conflictos. En primer lugar se describe el problema a afrontar, así como el esquema y las simplificaciones consideradas. A continuación, se describe el módulo encargado de la generación de resoluciones a los conflictos, basadas en la operativa del controlador de tráfico aéreo. Finalmente, se presenta el módulo de búsqueda de la resolución óptima.

Los módulos desarrollados a largo de este capítulo se aplicarán a la planificación óptima global, obtenida como resultado de los módulos descritos en el Capítulo 3. Tras la detección de los potenciales conflictos se procederá a su resolución, para finalmente obtener una planificación óptima global y sin conflictos.

### 4.1 Descripción del problema, esquema y simplificaciones

La resolución del problema de resolución de conflictos en fase de estratégica abordado en esta sección pretende obtener una planificación óptima y sin conflictos, integrando el conocimiento del controlador de tráfico aéreo para la resolución de los potenciales conflictos detectados en la planificación.

Para cumplir con el objetivo, en este estudio se ha utilizado en primer lugar una metodología *data-driven* con una gran cantidad de datos de acciones de resolución de conflictos operacionales reales. En segundo lugar, se ha desarrollado un proceso de optimización multiobjetivo que tiene en cuenta los requisitos de diferentes actores del sistema ATM. Estos dos aspectos proporcionan una nueva metodología de resolución de conflictos en fase estratégica en comparación al actual estado del arte (sección 2.3).

El enfoque aquí presentado será de aplicación para el personal operativo encargado de la planificación estratégica, no estando destinado su uso a los controladores de tráfico aéreo en fase táctica. Esta funcionalidad se enmarca dentro de un concepto operacional de menor detección y resolución táctica de conflictos y mayor monitorización, en base a una planificación fiable.

Para afrontar la resolución del problema aquí descrito, se han desarrollado dos módulos<sup>21</sup> que han sido implementados y probados con MATLAB. La arquitectura de los mismos se representa en l Figura 4-1

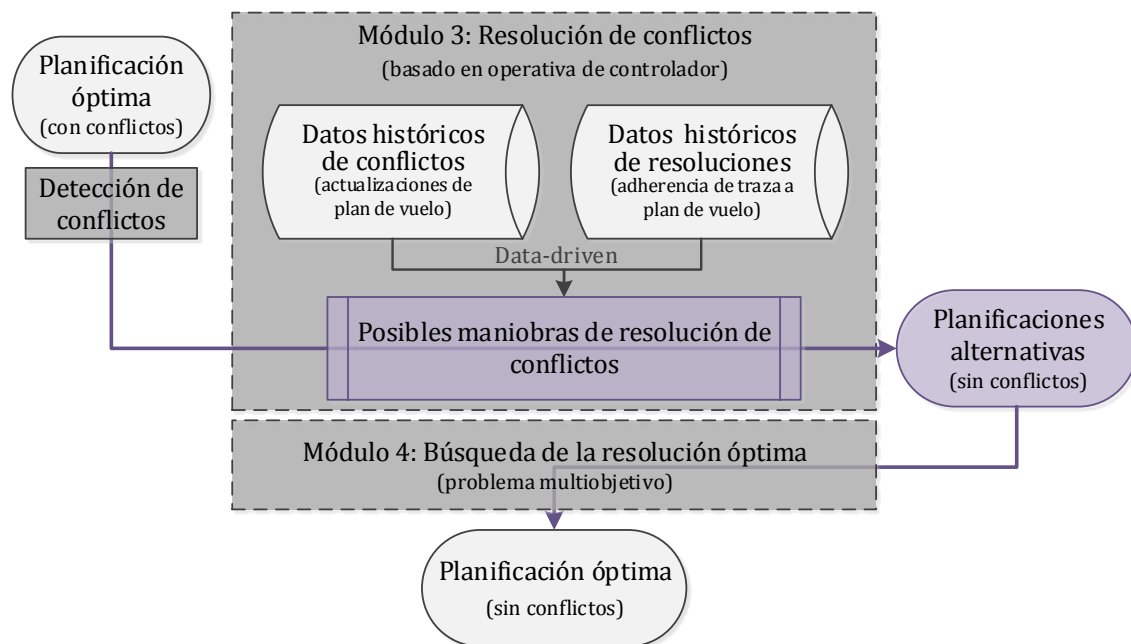


Figura 4-1 Arquitectura de la resolución del problema de resolución de conflictos

En el módulo 3, de resolución de conflictos, se crea una base de datos que contiene alrededor de 18.000 conflictos operacionales reales observados durante 72 días. Estos conflictos se obtienen a partir de las actualizaciones de los planes de vuelo. También contiene la resolución táctica de estos conflictos, obtenida de la adherencia de la traza radar al plan de vuelo activo. Este módulo se explica con detalle en la sección 4.2.

El módulo así desarrollado se aplica sobre las planificaciones óptimas obtenidas tras la aplicación de la optimización descrita en el Capítulo 3. Para ello tras detectar los conflictos entre los vuelos de cada día a planificar, estos serán resueltos aplicando todas las posibles maniobras obtenidas en el módulo 3.

En el módulo 4, de búsqueda de la resolución óptima, todas las resoluciones candidatas para cada conflicto se evalúan en un proceso de optimización multiobjetivo, resultando un plan óptimo y sin conflictos. Este proceso se detalla en la sección 4.3.

El modelo de resolución de conflictos aquí planteado considera acciones verticales y temporales. Las acciones horizontales de resolución de conflictos son inherentemente tácticas y, por lo tanto, no adecuadas en una metodología de planificación estratégica, por

<sup>21</sup> La designación de estos es módulo 3 y módulo 4, puesto que son una parte del prototipo final de generación de planificaciones óptimas globales y sin conflicto. Los modulos 1 y 2 fueron desarrollados en el Capítulo 3.

lo que no se han considerado. Hacerlo supone la definición de una estrategia de "vectorización" que implicaría el uso de nuevos puntos de navegación para el enrutamiento de los vuelos, característica a evitar en fase estratégica.

Como ya se comentó en el Capítulo 3, este estudio se centra en el entorno de crucero (con el fin de evitar el enmascarado de los resultados debido a la complejidad inducida por las fases de salida y aproximación), definido como el segmento desde el punto en el que finaliza el procedimiento de salida hasta el punto de llegada al procedimiento de aproximación. Además, en lo que se refiere al problema que se afronta en este capítulo, en la sección 5.4.1 de resultados se muestra que más de la mitad de los conflictos operacionales ocurren cuando ambas aeronaves están en la fase de crucero.

## 4.2 Módulo de resolución de conflictos basado en la operativa del controlador de tráfico aéreo

En este apartado se describe el módulo de resolución de conflictos basado en la lógica del controlador. En primer lugar, se explica la operativa del sistema de control de tráfico aéreo actual. A continuación, se describen los datos utilizados y una explicación detallada del proceso *data-driven* seguido para desarrollar el modelo de generación de resoluciones alternativas de conflictos. Finalmente, se describe la aplicación de este modelo al conjunto de conflictos detectados en las planificaciones óptimas previamente obtenidas.

### 4.2.1 Concepto operacional de control de tráfico aéreo actual

Como ya se ha comentado, el modelo a implementar se obtendrá a partir de una metodología *data-driven*. Para la aplicación de la misma es preciso conocer: i) el funcionamiento del sistema de control de tráfico aéreo actual; y ii) los datos que disponen los controladores para poder ejercer su función de vigilancia y control. La presente sección profundiza en el primer aspecto, mientras que la siguiente lo hace en el segundo.

#### Vigilancia y control

En la navegación aérea es necesario conocer la posición e intenciones de las aeronaves allá donde pudieran entrar en conflicto. La función de vigilancia requiere de los medios necesarios para suministrar al controlador de tráfico aéreo información de entrada necesaria y suficiente para poder ejercer su función. El control, por lo tanto, es una salida producida por el agente y que tiene como misión identificar, transmitir y, en su caso, producir las acciones precisas para que el correspondiente proceso controlado evolucione apropiadamente [132].

En el caso de la vigilancia aérea ésta sirve para que el controlador de tráfico aéreo, conozca el estado de las aeronaves (posición e intenciones) y a partir de esta información lleve a cabo las acciones de control necesarias para mantener un flujo de aeronaves seguro, fluido y eficiente. Este proceso es el denominado control de tráfico aéreo, realizado sobre las aeronaves en el seno de un volumen dado de espacio aéreo. Las tareas a realizar por el controlador son [133]:

- Adquisición de información: el controlador debe ser capaz de establecer el estado actual de todas las aeronaves (traza radar) y la intención de las mismas.
- Análisis de la información: debe establecer el estado previsto, utilizando para ello sus planes de vuelo y el conocimiento de sus prestaciones. También debe aplicar reglas de separación a cada par de aeronave, con el objeto de identificar los conflictos reales o potenciales.
- Decisión sobre acciones a tomar: construir las instrucciones para su resolución.
- Implementación de esas acciones: transmitir las instrucciones a las aeronaves concernidas.

### Control en ruta

En el control de ruta, las aeronaves se encuentran lejos de los aeródromos, en su fase de crucero, siguen trayectorias que, salvo en momentos puntuales, presentan un comportamiento cinemático próximo al movimiento uniforme con cambios puntuales, breves y pequeños de rumbo y altitud.

El control de ruta actual tiene su centro de toma de decisiones en la posición de controlador ejecutivo. El agente que ocupa este puesto actúa en base al estado en que se encuentran las aeronaves dentro del sector que tiene asignado. En entornos de alta densidad, el estado de las aeronaves se establece básicamente a partir de sus trazas radar y la progresión de vuelo (dada por las actualizaciones de los planes de vuelo).

La identificación de cualquier situación en la que un par de aeronaves previsiblemente vaya a transgredir la norma de separación mínima (horizontal o vertical), es la tarea básica del controlador en la vigilancia de aeronaves dentro de su sector. Estas situaciones se denominan eventos de proximidad o conflictos potenciales. La Figura 4-2 representa un conflicto, donde la aeronave “intrusa” invade el volumen de protección de la aeronave de referencia, definido por el cilindro de radio  $D_{min}$  (distancia mínima horizontal permitida entre aeronaves, de 5 millas según criterios actuales) y altura  $2H_{min}$  (siendo  $H_{min}$  la separación vertical mínima permitida, siendo de 1000 pies).

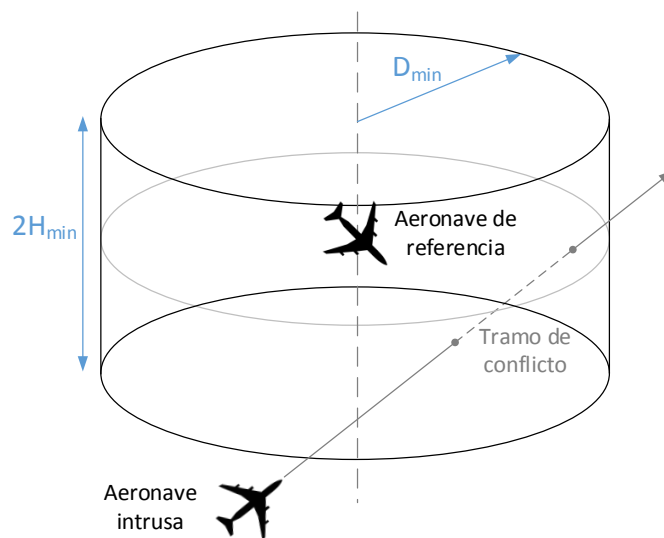


Figura 4-2 Caracterización de un conflicto

Actualmente, el control de aeronaves dentro de cada sector se realiza a través de una interfaz hombre-máquina, denominada Unidad de Control de Sector o UCS (CWP, *Controller Working Position*). Esta unidad permite que dos controladores, ejecutivo y planificador-ayudante, dispongan de toda la información de vigilancia e información aeronáutica complementaria necesaria.

#### Tratamiento de planes de vuelo, TPV<sup>22</sup>

El Subsistema de Tratamiento de Planes de Vuelo (TPV) de SACTA está compuesto por un módulo de Tratamiento Central de Planes de Vuelo (TCPV) y uno o varios módulos de Tratamiento Local de Planes de Vuelo (TLPV), por cada área de responsabilidad.

El TCPV centraliza el proceso inicial de creación de los planes de vuelo y de otros mensajes ATFCM relativos tanto a planes de vuelo como a mensajes de gestión de *slots* asignados por la entidad que gestiona los flujos de aeronaves<sup>23</sup>. El TLPV gestiona toda la información relativa a plan de vuelo (presentación en pantallas, fichas, códigos de vigilancia por radar, etc.) dentro de su área de responsabilidad, ya se trate de un centro de control de ruta o de un área terminal.

El TCPV se comunica automáticamente con los TLPV y les envía las creaciones, modificaciones y cancelaciones de los planes de vuelo que les afectan. Analiza los datos y extrae la ruta válida del plan de vuelo; calcula el perfil del vuelo en cuatro dimensiones (puntos fijos y sectores con niveles y horas de paso) y transmite esa información a otros subsistemas externos vía GIPV (Sistema Gestor de Información de Planes de Vuelo).

Cuando el TLPV recibe los planes de vuelo del TCPV, se los transmite al TDVM (Tratamiento de Datos de Vigilancia Multidependencia), imprime fichas de vuelo de forma descentralizada y procesa las acciones de control efectuadas manualmente por un controlador desde esas posiciones de control (creación y modificación de planes de vuelo, cambios de nivel, ruta, etc.).

También procesa las actualizaciones automáticas que proceden del tratamiento de datos radar con otros centros de control colaterales (ya sean nacionales o extranjeros) y transmite a su vez las posibles modificaciones al TCPV para su proceso y distribución al resto de los TLPV afectados, de forma que todo el sistema SACTA trabaja con la misma información de plan de vuelo.

#### 4.2.2 Descripción de los datos utilizados. Plan de vuelo y traza radar

Como se ha descrito, para poder mantener una separación entre aeronaves dentro de su área de control, los controladores cuentan con la información del estado actual de cada aeronave (trazas radar) y el estado previsto (basado en las actualizaciones de los planes de vuelo). Por ello para desarrollar el modelo *data-driven* de resolución de conflictos se cuenta con la siguiente información:

---

<sup>22</sup> Descripción obtenida de:

[http://www.enaire.es/csee/Satellite/navegacion-aerea/es/Sacta\\_FA/1043236956928/1043829980636/](http://www.enaire.es/csee/Satellite/navegacion-aerea/es/Sacta_FA/1043236956928/1043829980636/)

<sup>23</sup> En Europa esta entidad es el Centro Gestor de Operaciones en red o NMOC, y depende de la Organización Europea para la Seguridad de la Navegación Aérea (Eurocontrol).



### Actualizaciones de plan de vuelo

En primer lugar, se ha partido de la información de los planes de vuelo del subsistema GIPV de SACTA. Este contiene información de los planes de vuelo que están volando o van a volar en un futuro cercano en el espacio aéreo que afecta al FIR Continental España. Este sistema permite tener acceso a cada modificación del plan de vuelo (y la hora que se ha producido), dado que se recibe un nuevo registro del plan de vuelo cada vez que se modifica alguno sus campos (en particular, y de gran utilidad para este estudio, la hora y el nivel de paso por cualquier fijo de la ruta).

A continuación se representa el modelo de datos con la información de todas las actualizaciones de los planes de vuelo, Figura 4-3. En primer lugar se tiene una tabla denominada “Vuelos - PV” con la información del origen, destino, modelo de aeronave y la hora de paso por el primer fijo dentro del FIR España Continental.

En la segunda tabla “Planes de vuelo”, se tiene la ruta a volar o ya volada, definida a través de las coordenadas de los puntos fijos (dentro del FIR España Continental), el instante y la altitud de paso por los mismos. Para identificar todas las actualizaciones de plan de vuelo<sup>24</sup> pertenecientes a cada vuelo se cuenta con la información de la hora de registro de dicha actualización, lo que permite dar un identificativo único (“id\_actualización”) a cada una de ellas.

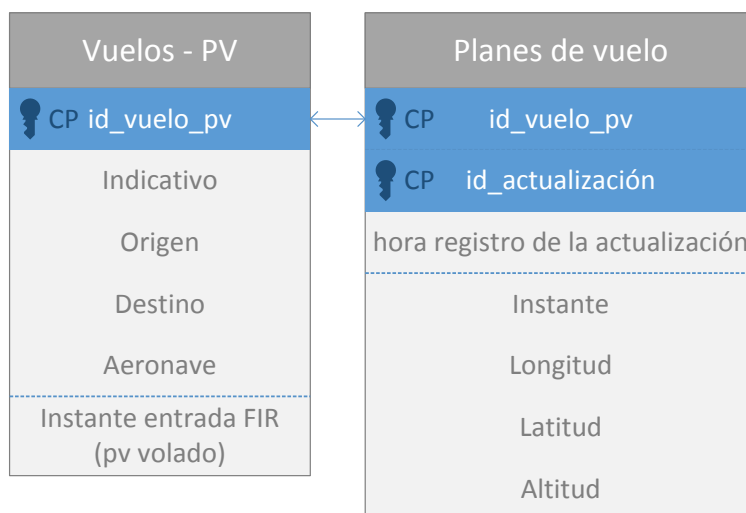


Figura 4-3 Base de datos de actualizaciones de planes de vuelo

<sup>24</sup> Un vuelo tiene varios planes de vuelo a los que llamaremos “actualizaciones del plan de vuelo”. Cada actualización recoge las posibles modificaciones que sufre el último plan de vuelo vigente, ya sea antes o durante la operación del vuelo. Es decir, en cada momento un vuelo solo tiene un plan de vuelo vigente, el cual está activo desde la hora de registro de dicha actualización hasta la entrada de una nueva (o del mensaje de cancelación del plan de vuelo).

### Traza radar

Esta es la información de los radares secundarios que se envía a la plataforma de control de tráfico aéreo. Incluye el indicativo del vuelo, la altitud, la velocidad, la posición, la dirección y la hora. La información se actualiza cada 5 segundos.

A continuación se representa el modelo de datos con la información de trazas radar, Figura 3-4. En primer lugar se tiene una tabla denominada “Vuelos - TR” con la información del origen, destino, aeronave y la hora real de entrada en el FIR España Continental. En la segunda tabla “Trazas radar”, se tiene la trayectoria radar volada, definida a través de las coordenadas, instantes y altitud de vuelo en cada punto.

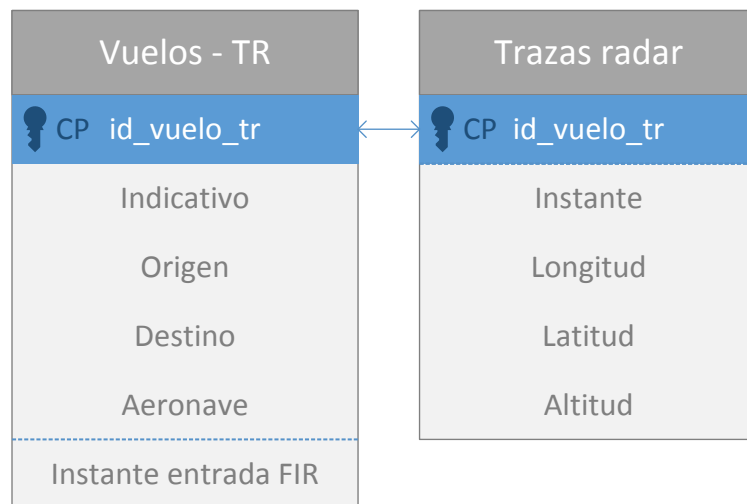


Figura 4-4 Base de datos de trazas radar

Para realizar el modelo, que se describe en el siguiente apartado, se han examinado todas las actualizaciones de planes de vuelo y sus correspondientes trazas radar para más de 300.000 vuelos en el FIR España Continental. Esto cubre un período de 72 días, dispersos a lo largo del año, con más de 4.200 vuelos por día. La gran cantidad de datos operacionales evitará cualquier sesgo causado por regiones, patrones de tráfico o una estacionalidad particular.

#### 4.2.3 Desarrollo del modelo *data-driven*

En este estudio se analizan alrededor de 18.000 conflictos operacionales obtenidos del conjunto de vuelos descrito, con el fin de desarrollar un modelo de resolución de conflictos basado en las acciones reales tomadas por los controladores en la fase táctica, midiendo la adherencia del plan de vuelo en conflicto con la traza radar.

Este modelo viene dado por la función:

$$Y = F(X) \quad (17)$$

donde  $X$  es el vector de entrada que caracteriza el conflicto, en particular la relación entre las trayectorias de los aviones;  $Y$  es la matriz de resolución de conflictos que contiene las soluciones propuestas por el modelo; y  $F(X)$  denota el mapa no lineal que describe la dependencia entre el conflicto y la resolución.

A continuación se recogen todos los pasos seguidos, para la realización del modelo *data-driven*.

#### Cruce de fuentes

Es necesario cruzar los datos de planes de vuelo y trazas radar, al proceder de fuentes distintas. Para ello se utilizan los campos, que identifican de forma unívoca a cada vuelo: i) identificativo, ii) origen; iii) destino; y iv) hora de entrada en el FIR España Continental.

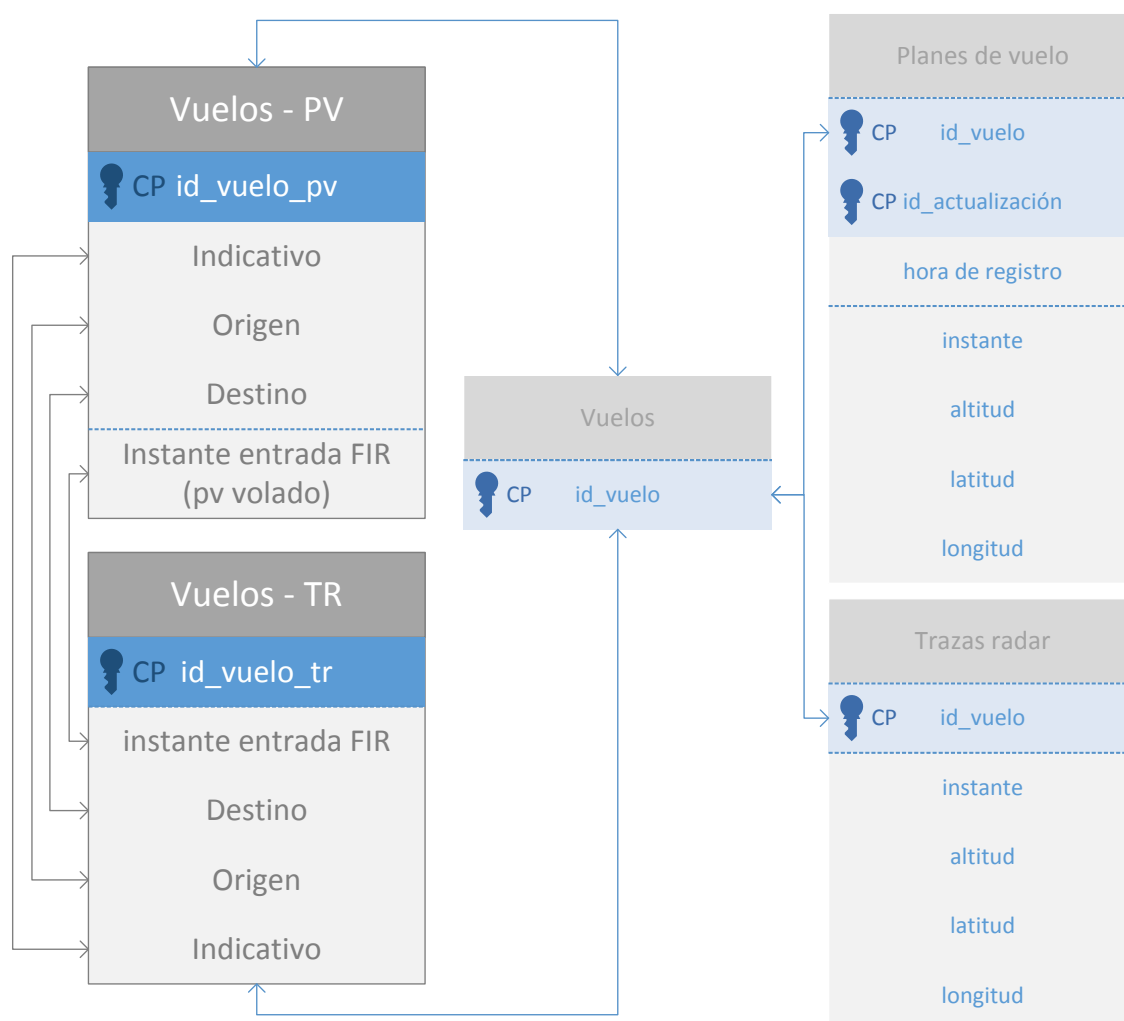


Figura 4-5 Esquema del cruce de las fuentes de planes de vuelo y trazas radar

El esquema de cruce de ambas fuentes se recoge en la Figura 4-5, y el algoritmo implementado para tal fin en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1 Algoritmo de cruce de las fuentes de planes de vuelo y trazas radar

---

```

function [v, tr, pv] =cruce (v, tr, pv, t_tr, t_pv )

%% cruce trazas - planes de vuelo:
% Recorremos las tabla de vuelos-tr, para bucar su correspondiente
% indice de vuelo de la tabla vuelos-pv

for i=1:length(v.id_vuelo(:,1))
% Búsqueda del indice vuelo del plan de vuelo correspondiente
% para el cruce utilizamos los datos de los vuelos de cada fuente que
% identifican de forma univoca cada vuelo:
% 1) identificativo - callsign
% 2) origen
% 3) destino
% 3) hora de entrada en el FIR (del pv cogemos el paso por el
% primer punto del último mensaje de actualización del pv)

    coinc.id_vuelo=v_pv.id_vuelo(strcmp(t_pv(:,1),t_tr(i,1))==1&...
strcmp(t_pv(:,2),t_tr(i,2))==1&strcmp(t_pv(:,3),t_tr(i,3))==1);
    coinc.ins_ent=v_pv.ins_ent(strcmp(t_pv(:,1),t_tr(i,1))==1&...
strcmp(t_pv(:,2),t_tr(i,2))==1&strcmp(t_pv(:,3),t_tr(i,3))==1);
    coinc.dif=abs(coinc.ins_ent-v.ins_ent(i,1));

    if length(coinc.id_vuelo(coinc.dif(:,1)<(1/24),1))==1
        v.id_vuelo_pv(i,1)=coinc.id_vuelo(coinc.dif(:,1)<(1/24),1);
    else
        v.id_vuelo_pv(i,1)=0;
    end
clear coinc
end

% Nos quedamos solo con los vuelos cruzados
v=borrar(v,find(v.id_vuelo_pv==0));

% quitamos vuelos cuyo plan de vuelo tiene asociadas varias trazas
[~,b,~]=unique(v.id_vuelo_pv,'first');
a=v.id_vuelo_pv(find(not(ismember(1:numel(v.id_vuelo_pv),b)))');
del=find(ismember(v.id_vuelo_pv,...
    v.id_vuelo_pv(find(not(ismember(1:numel(v.id_vuelo_pv),b)))')));
tr=seleccionar(tr,ismember(tr.id_vuelo,v.id_vuelo));

clear sel a b t_pv t_tr v_pv
v=rmfield(v,'ins_ent');

[~,tr.id_vuelo]=ismember(tr.id_vuelo,v.id_vuelo);
v.id_vuelo=unique(tr.id_vuelo);

% buscamos información del plan de vuelo
pv=seleccionar(pv,ismember(pv.id_vuelo,v.id_vuelo_pv));

[~,pv.id_vuelo]=ismember(pv.id_vuelo,v.id_vuelo_pv);
v=rmfield(v,'id_vuelo_pv');

```

---

### Creación de escenarios

Para la obtención de la base de datos de conflictos operacionales (y de maniobras de resolución de los mismos) observados en fase táctica es necesaria la creación de escenarios temporales en los cuales evaluar la existencia de potenciales conflictos, a partir de la información de las actualizaciones de planes de vuelos y trazas radar, tal y como se describirá más adelante. Este enfoque de la creación de escenarios temporales es necesario para poder capturar las frecuentes actualizaciones de los planes de vuelo, que provocan que los conflictos deban ser detectados a corto plazo.

El conjunto de datos recogidos durante un escenario temporal individual se representa como:

$$\{X_i, Y_i\}_{i=1}^C \quad (18)$$

donde  $C$  es el número de conflictos;  $X_i$  son las variables de entrada que caracterizan los conflictos; e  $Y_i$  son las variables de salida con la información de las maniobras de resolución.

La base de datos histórica de conflictos creada para desarrollar el modelo consiste en una colección de conflictos, es decir, un conjunto de conjuntos

$$\{\{X_i, Y_i\}_{i=1}^C\}_{dt=1}^\epsilon \quad (19)$$

donde  $dt$  es el intervalo de tiempo del escenario; y  $\epsilon$  indica el número total de escenarios.

De nuevo, en [146] Solomatine y Ostfeld destacan la importancia de la preparación de datos en cualquier ejercicio de modelado, y en particular la elección de los intervalos de tiempo utilizados para crear los escenarios. Un número de estudios en otros campos [14][44][96] se ocupan de la selección de los intervalos de tiempo óptimo de datos.

En este estudio, los escenarios se generaron a intervalos de tiempo de cinco minutos, resultando 288 escenarios por día para cada día de la muestra. El intervalo se eligió sobre la base de un estudio [53] en el que se analizó un modelo de detección de conflictos utilizando RAMS Plus, una herramienta de simulación ATM de tiempo acelerado. El estudio re-evaluó muestras de conflictos cada cinco minutos.

En este estudio, para probar la fiabilidad del número de conflictos detectados en los escenarios creados con intervalos de cinco minutos, también se han calculado los conflictos con intervalos de un minuto para un día de la muestra y se han comparado los dos conjuntos de datos obtenidos. Los resultados mostraron que sólo el 1,10% de los conflictos detectados utilizando intervalos de un minuto no se detectaron cuando se utilizaban intervalos de cinco minutos. Por lo tanto, los intervalos de cinco minutos se consideran aptos para este estudio.

Con el fin de disponer de la misma información que el controlador en su toma de decisión para resolver un conflicto, en cada escenario, los datos necesarios son: i) los últimos planes de vuelo actualizados, utilizados para detectar y clasificar los conflictos; ii) la traza radar, para identificar las acciones tomadas por los controladores para resolver los conflictos.

En la Tabla 4-2 se detalla el algoritmo implementado en este estudio para la creación de los escenarios sobre todos los datos de la muestra considerada, y la obtención de los datos necesarios de cada uno de ellos.

*Tabla 4-2 Algoritmo de creación de escenarios temporales para la detección de conflictos históricos*

---

```

function [v, tr, pv] =creacion_escenarios (v, tr, pv, t_tr, t_pv )

% Creamos los escenarios con un intervalo de 5 minutos
Interval=5;
escenarios=(0:(interval/(24*60)):dias)+'datenum(dia)','yyyymmdd');

for k=1:1:length(escenarios(:,1))-1
% Buscamos todos los vuelos (v_esc) y sus trazas (tr_esc) con algún
punto de la traza dentro del FIR a la hora del escenario
v_esc.id_vuelo(:,1)= ...
unique(tr.id_vuelo(tr.inst>periodos(k) &tr.inst<periodos(k+1)));
tr_esc=seleccionar(tr,find(ismember(tr.id_vuelo,v_esc.id_vuelo)));

if length(v_esc.id_vuelo)>0
% Buscamos del mensaje de actualización del plan de vuelo (pv_esc)
% inmediatamente anterior a la hora del escenario para cada uno de
% los vuelos del mismo
pv_esc=seleccionar(pv,find(ismember(pv.id_vuelo,v_esc.id_vuelo)));

[~,~,pv_esc.pv]= ...
unique(horzcat(pv_esc.id_vuelo,pv_esc.id_mensaje),'rows');
pv_esc=borrar(pv,find((periodos(k)- pv_esc.registro)<0));
mensajes=horzcat(pv_esc.id_vuelo,pv_esc.id_mensaje,pv_esc.pv);
mensajes=sortrows(mensajes,-2);
mensajes=sortrows(mensajes,1);

[~,b,~]=unique(mensajes(:,1),'stable');
mensajes=mensajes(b,:);
pv_esc=seleccionar(pv_esc,find(ismember(pv_esc.pv,mensajes(:,3))));
clear mensajes
pv_esc =rmfield(pv_esc,'pv');
v_esc.id_vuelo=unique(pv_esc.id_vuelo);

% Buscamos las trazas radar (tr_esc de los vuelos del escenario
tr_esc=seleccionar(tr,find(ismember(tr.id_vuelo,v_esc.id_vuelo)));
end
end

```

---

### Detección de conflictos basada en datos históricos

Para la detección de los potenciales conflictos en cada escenario, se utiliza: i) la información de la traza radar para localizar la posición de los vuelos a la hora de comienzo del escenario; y ii) la última actualización de plan de vuelo vigente a la hora del escenario, para predecir la trayectoria de cada vuelo y si esta presentará un conflicto con otra aeronave.

Para cada vuelo se genera su trayectoria 4D, mediante la extrapolación de un punto, del plan de vuelo, cada 5 segundos. Durand y Gotteland [48] mostraron que este intervalo era lo suficientemente pequeño como para detectar cualquier conflicto. De acuerdo con su plan de vuelo, la trayectoria de la aeronave pasa por puntos fijos  $p_1, p_2, \dots, p_n$ , cuyas coordenadas geográficas se conocen de antemano. Las coordenadas 4D  $(\varphi, \lambda, h, t)$  se calculan entre cada par de fijos de paso, como se observa en la siguiente figura.

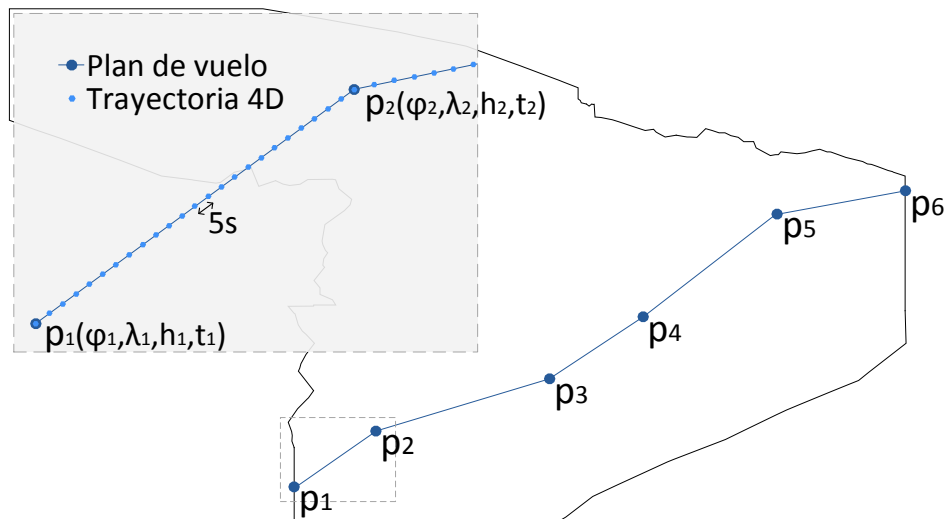


Figura 4-6 Creación de trayectorias 4d a partir de planes de vuelo

En la Figura 4-6 se recoge el algoritmo implementado para la creación de las trayectorias 4D correspondiente a la última actualización del plan de vuelo de todos los vuelos de cada escenario.

Tabla 4-3 Algoritmo de creación de trayectorias 4D de plan de vuelo

---

```
function [pv_sinteticos] =trayectoria4D_pv (pv)

% Creación de planes de vuelo sintéticos, trayectoria 4D de cada vuelo
% con intervalo temporal de 5 segundos
interval=5;

for i=1:length(v.id_vuelo)
% Obtención de los parámetros de la plan de vuelo del vuelo i
% (tiempos de paso, latitud, longitud, y altura)
camino= seleccionar(pv,find(pv.id_vuelo==v.id_vuelo(i)
```

---

---

```

% creamos los instantes de la trayectoria 4D con 5 s de distancia
% emporal entra cada punto
trayec.inst(:,1)=(min(camino.inst):(interval/(24*60*60)):(floor(max(ca
mino.inst)/(interval/(24*60*60))))*(interval/(24*60*60)))';
% interpolamos la altura, latitud y longitud de la ruta
trayec.fl(:,1)=interp1(camino.inst,camino.fl,trayec.inst(:,1),...
    'lineal');
trayec.lat(:,1)=interp1(camino.inst,camino.lat,trayec.inst(:,1),...
    'lineal');
trayec.lon(:,1)=interp1(camino.inst,camino.lon,trayec.inst(:,1),...
    'lineal');
[pv_sinteticos{i,1}]=trayec;
clear camino
end

```

---

Una vez se dispone tanto de la traza radar como de la trayectoria 4D prevista de los vuelos de cada escenario, se inicia el proceso de detección de conflictos. Para ello se utilizará el algoritmo de detección de conflictos denominado *por parejas*<sup>25</sup> [11][82], calculando la distancia entre cada par de trayectorias. Donde se detecten pérdidas de separación se registrarán los parámetros del conflicto, esto es, los puntos geométricos (PGC) y el instante (TC) donde se detectó el conflicto.

En la Figura 4-7 se muestra la aplicación del método de detección de conflictos por parejas, correspondiente a las trayectorias de las aeronaves 1 y 2. Una cruz roja indica un conflicto. Las líneas punteadas grises indican las coordenadas 4D en el mismo instante.

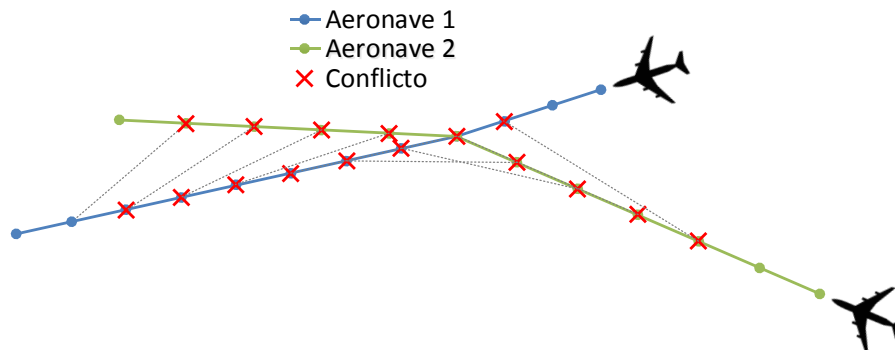


Figura 4-7 Ilustración del algoritmo de detección de conflictos por parejas

En [11][82], donde se describe el algoritmo de detección de conflictos por parejas, se utilizó un tiempo para la extrapolación de las trayectorias de 10 segundos, que en esta investigación se ha reducido a 5 segundos para mejorar la precisión. La implementación de dicho algoritmo realizada en el presente estudio se recoge en la Tabla 4-4.

---

<sup>25</sup> Del inglés “Pairwise”.



Tabla 4-4 Algoritmo de detección de conflictos por parejas

---

```

function [out,tc,pgc] = pairwise(pv1,pv2)

% Input : pv1, pv2, trayectorias 4d del plan de vuelo de cada uno de
% los vuelos de los a detectar si están en conflicto
% output: out es uno si existe conflicto. tc y pgc son los instantes y
% coordenadas en caso de existencia de conflicto
out=0; tc=[]; pgc=[];

% tenemos ambos planes de vuelo sintéticos con una precisión de sg
pv1.inst=round(pv1.inst*24*60*60)/(24*60*60);
pv2.inst=round(pv2.inst*24*60*60)/(24*60*60);

pv1=ordenar(pv1,'inst');
pv2=ordenar(pv2,'inst');

% Buscamos los puntos del primer vuelo (pv1_coin) que coinciden
% temporalmente con puntos de segundo vuelo
loc1 = ismember(pv1.inst, pv2.inst);
pv1_coin=seleccionar(pv1,find(loc1==1));

% Buscamos los puntos del segundo vuelo (pv2_coin) que coinciden
% temporalmente con puntos de primer vuelo
loc2 = ismember(pv2.inst, pv1.inst);
pv2_coin=seleccionar(pv2,find(loc2==1));

% Si existe algún instante témpora común entre ambos vuelos buscamos
% si en estos se infringe la separación mínima
H=10; % separación vertical de 1000 pies (10 niveles de vuelo)
D=5*1852; % separación horizontal de 5 millas pies (a metros)

if length(loc1)>0

% Buscar puntos en los que se infringe la separación mínima
conf=find...
(vdist(pv1_coin.lat,pv1_coin.lon,pv2_coin.lat,pv2_coin.lon)<D&...
abs(pv1_coin.fl-pv2_coin.fl)<H);

    if length(conf)>0
        out=1;
        tc=pv1_coin.inst(conf); %instantes del conflicto
        pgc.lat=pv1_coin.lat(conf); %latitud de los puntos del conflicto
        pgc.lon=pv1_coin.lon(conf); %longitud de los puntos del conflicto
    end
end

```

---

Tras aplicar el algoritmo de detección de conflictos por parejas a los vuelos de todos los escenarios de la muestra, se obtiene la base de datos con todos los conflictos potenciales detectados, la cual se representa en la Figura 4-8.

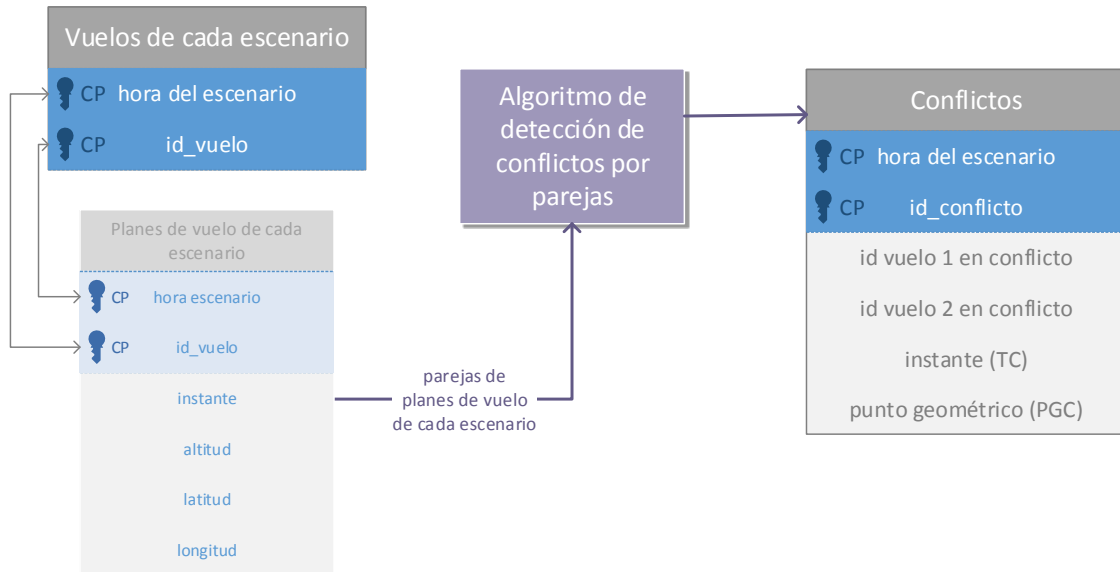


Figura 4-8 Módulo de detección de conflictos. Esquema de la base de datos de conflictos históricos

#### Resolución de conflictos basada en datos históricos: adherencia de la traza radar al plan de vuelo

Las posibles maniobras de resolución de conflictos realizadas por los controladores incluyen: i) cambios de velocidad; ii) maniobras verticales y iii) giros en dos dimensiones. Tal y como se ha explicado, el modelo de resolución de conflictos que se desarrolla en este estudio se refiere a las dos primeras maniobras.

Tras la identificación de los conflictos históricos de la muestra de datos, el siguiente paso es clasificarlos según la resolución táctica aplicada en cada caso. Las siguientes ecuaciones se utilizan para evaluar la adherencia de la trayectoria real volada (traza radar) a la trayectoria planeada (plan de vuelo actualizado). Para cada conflicto se calcula:

- Desviación temporal (DT) de la trayectoria volada (traza radar) en comparación con la trayectoria 4D del último plan de vuelo actualizado en el punto geométrico donde se detectó el conflicto (PGC):

$$DT = t_{PV}^{PGC} - t_{TR}^{PGC} \quad (20)$$

donde  $t_{PV}^{PGC}$  es el instante estimado por el plan de vuelo en el PGC; y  $t_{TR}^{PGC}$  es el instante real indicado por la traza radar.

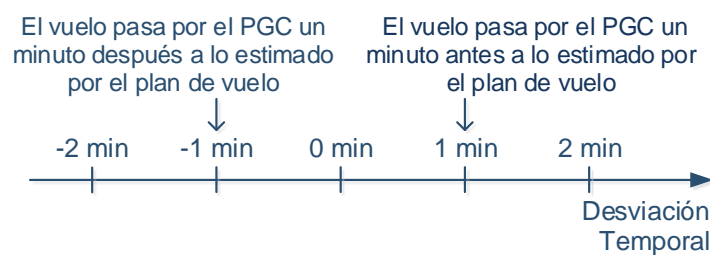


Figura 4-9 Ilustración de la desviación temporal

Una desviación temporal de 0 minutos significa que el vuelo pasa sobre el punto geométrico donde se detectó el conflicto en el mismo instante que el estimado por el plan de vuelo.

- Desviación vertical (DV) de la trayectoria volada (traza radar) en comparación con la trayectoria del último plan de vuelo actualizado en el momento en que se detectó el conflicto (TC).

$$DV = h_{PV}^{TC} - h_{TR}^{TC} \quad (21)$$

donde  $h_{PV}^{TC}$  es la altitud estimada por el plan de vuelo en TC; y  $h_{TR}^{TC}$  es la altitud real indicada por la traza radar.



*Figura 4-10 Ilustración de la desviación vertical*

Una desviación vertical de 0 pies significa que el vuelo pasa sobre el punto geométrico donde se detectó el conflicto, a la misma altura que la estimada por el plan de vuelo. Cualquier conflicto sobre el que se aplique una desviación vertical inferior a 1.000 pies sobre alguno de los vuelos implicados en el mismo, no resolverá dicho conflicto.

En la Tabla 4-5 se recoge el algoritmo implementado para la detección de las maniobras de resolución aplicadas en un conflicto determinado.

*Tabla 4-5 Algoritmo de detección de las maniobras de resolución de conflictos*

```
function [resol]=maniobra_resolucion(pv1,pv2,tr1,tr2,tc);

%% Desviación temporal: punto geométrico del conflicto (PGC)
% Puntos del plan de vuelo en el punto geometrico del conflicto (PGC)
pv1_inst_conf=ismember(pv1_inst,tc);
pv2_inst_conf=ismember(pv2_inst,tc);
pv1_conf_gpc=seleccionar(pv1,find(pv1_inst_conf==1));
pv2_conf_gpc=seleccionar(pv2,find(pv2_inst_conf==1));

% Puntos de la traza en el punto geometrico del conflicto (PGC)
tr1_conf_gpc=seleccionar(tr1,knnsearch(horzcat(tr1.lat,tr1.lon),...
    horzcat(pv1_conf_gpc.lat,pv1_conf_gpc.lon)));
tr2_conf_gpc=seleccionar(tr2,knnsearch(horzcat(tr2.lat,tr2.lon),...
    horzcat(pv2_conf_gpc.lat,pv2_conf_gpc.lon)));
```

```

resol.desv_temp1=...
    round((mean(tr1_conf_gpc.inst-pv1_conf_gpc.inst)*24*60)*100)/100;
resol.desv_temp2(cont,1)=...
    round((mean(tr2_conf_gpc.inst-pv2_conf_gpc.inst)*24*60)*100)/100;

%% Desviación vertical: instante del conflicto TC)
% Puntos de de la traza en el instante del conflicto (TC)
tr1_conf_tc=seleccionar(tr1,find(tr1.inst_conf==1));
tr2_conf_tc=seleccionar(tr2,find(tr2.inst_conf==1));
% Puntos del plan de vuelo en el instante del conflicto (TC)
pv1_conf_tc=seleccionar(pv1_conf_gpc,...
    find(ismember(pv1_conf_gpc.inst,tr1_conf_tc.inst)));
pv2_conf_tc=seleccionar(pv2_conf_gpc,...
    find(ismember(pv2_conf_gpc.inst,tr2_conf_tc.inst)));

resol.desv_vert1=...
    round((mean(tr1_conf_gpc.fl-pv1_conf_gpc.fl))*100)/100;
resol.desv_vert2=...
    round((mean(tr2_conf_gpc.fl-pv2_conf_gpc.fl))*100)/100;

```

Aplicando el algoritmo de detección de las maniobras de resolución de conflictos (Tabla 4-5) sobre todos los conflictos de la muestra, se genera la base de datos de resolución de conflictos históricos que se utilizará para el desarrollo del modelo *data-driven*. Este proceso y la base de datos generada, denominada “Resoluciones”, se ilustra en la Figura 4-11.

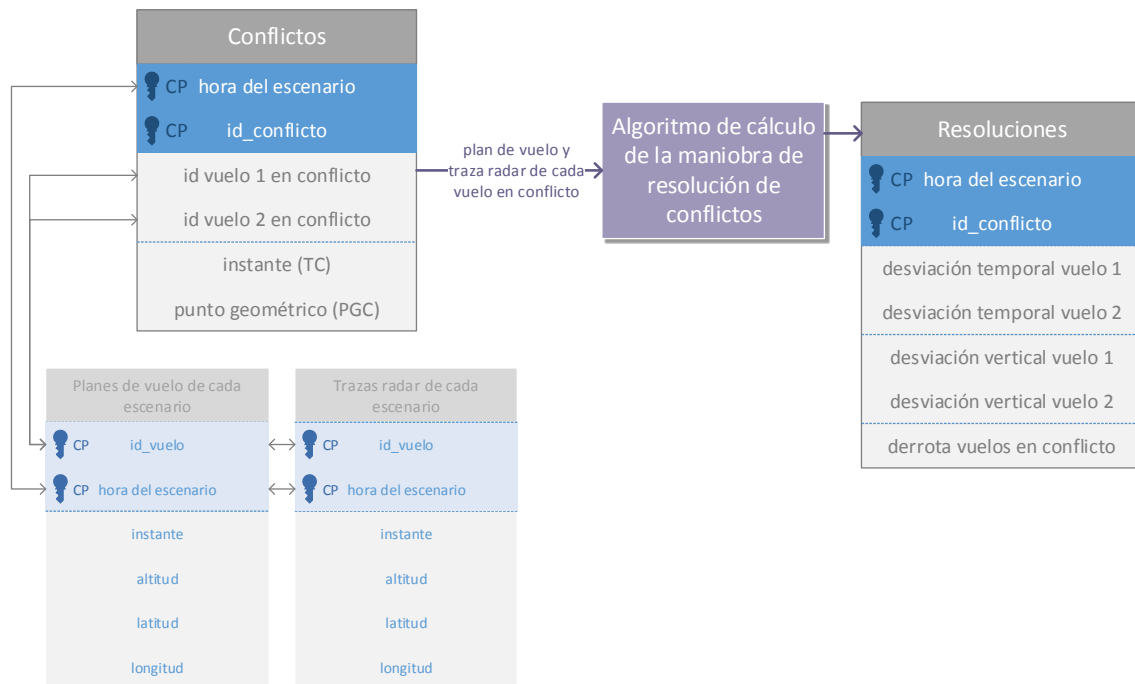


Figura 4-11 Esquema de la base de datos de resolución de conflictos históricos

*Desarrollo del modelo de resolución de conflictos*

Esta sección describe la metodología utilizada para desarrollar el modelo de resolución de conflictos. En su generación se utiliza el conjunto de conflictos históricos detectados previamente y la información de las correspondientes maniobras reales de control (desviación temporal o vertical) aplicadas para resolverlos (Figura 4-11). Para la generación de dicho modelo se utilizarán dos tareas fundamentales del *data-driven*: clasificación y *clustering*<sup>26</sup> [100].

Se han clasificado las resoluciones de conflictos según la relación entre la dirección de las trayectorias, o derrota, de las aeronaves involucradas en el conflicto. Para el cálculo de la derrota de los vuelos en conflictos en el instante del mismo se ha utilizado el algoritmo recogido en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6 Algoritmo de cálculo de la derrota de los vuelos en conflicto

---

```
function [resol]=heading(pv1, pv2, tc);
% Puntos del plan de vuelo en conflicto
pv1.inst_conf=ismember(pv1.inst,tc);
pv2.inst_conf=ismember(pv2.inst,tc);

%% Cálculo de derrota entre vuelos en conflicto
[~,pv1.heading(2:end,1),~]=...
    vdist(pv1.lat(1:end-1,1),pv1.lon(1:end-1,1),...
    pv1.lat(2:end,1),pv1.lon(2:end,1));
[~,pv2.heading(2:end,1),~]=...
    vdist(pv2.lat(1:end-1,1),pv2.lon(1:end-1,1),...
    pv2.lat(2:end,1),pv2.lon(2:end,1));

pv1.heading(1,1)=NaN;
pv2.heading(1,1)=NaN;
pv1=seleccionar(pv1,find(pv1_inst_conf==1));
pv2=seleccionar(pv2,find(pv2_inst_conf==1));

heading=abs(pv1.heading-pv2.heading);
heading(find(heading(:,1)>180),1)=...
    (heading(find(heading(:,1)>180),1)-180);
resol.heading =mean(heading);
```

---

Se considera válida la clasificación de conflictos basada en los criterios de la sección 5.4.2.1.5 del Doc. 4444 de la OACI [77] Concretamente, con el propósito de aplicación de separaciones, en dicho documento se recogen los términos misma derrota, derrotas que se cruzan y derrotas opuestas, tal y como se detalla en la Figura 4-12.

---

<sup>26</sup> Término inglés que se refiere a las técnicas de agrupación del aprendizaje automático o *machine learning*.

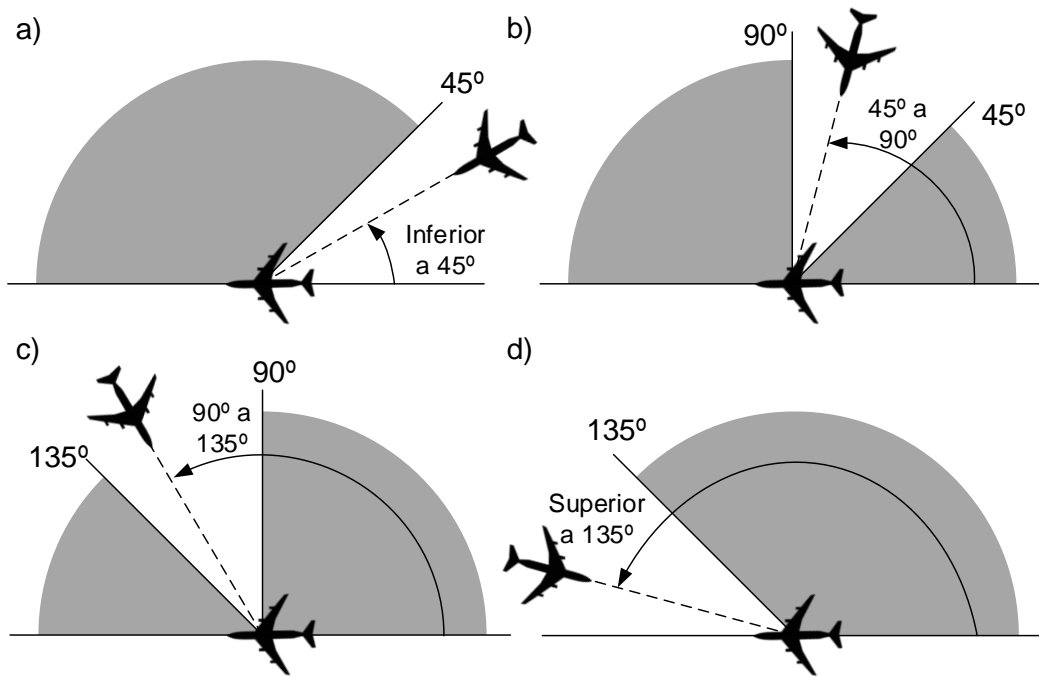


Figura 4-12 Aeronaves con a) misma derrota; b) derrota que se cruzan ( $45^\circ$  a  $90^\circ$ ); c) derrota que se cruzan ( $90^\circ$  a  $135^\circ$ ); d) derrota opuestas [77]

En la Tabla 4-7 se recoge el algoritmo implementado para la clasificación de los datos de resoluciones históricas en función de la derrota entre las aeronaves en conflicto.

Tabla 4-7 Algoritmo de clasificación de los datos de resoluciones históricas en función de la derrota entre las aeronaves en conflicto

```
function [clase_resol]=clasificacion(resol);

% Clasificación de resoluciones temporales según la derrota

clase_resol.temp_0_45=...
vertcat(resol.desv_temp1(resol.heading>=0&resol.heading<45),...
        resol.desv_temp2(resol.heading>=0&resol.heading<45));
clase_resol.temp_45_90=...
vertcat(resol.desv_temp1(resol.heading>=45&resol.heading<90),...
        resol.desv_temp2(resol.heading>=45&resol.heading<90));
clase_resol.temp_90_135=...
vertcat(resol.desv_temp1(resol.heading>=90&resol.heading<135),...
        resol.desv_temp2(resol.heading>=90&resol.heading<135));
clase_resol.temp_135_180=...
vertcat(resol.desv_temp1(resol.heading>=135&resol.heading<=180),...
        resol.desv_temp2(resol.heading>=135&resol.heading<=180));

% Clasificación de resoluciones verticales según la derrota
clase_resol.vert_0_45=...
vertcat(resol.desv_vert1(resol.heading>=0&resol.heading<45),...
        resol.desv_vert2(resol.heading>=0&resol.heading<45));
clase_resol.vert_45_90=...
vertcat(resol.desv_vert1(resol.heading>=45&resol.heading<90),...
        resol.desv_vert2(resol.heading>=45&resol.heading<90));
clase_resol.vert_90_135=...
vertcat(resol.desv_vert1(resol.heading>=90&resol.heading<135),...
```

---

```

        resol.desv_vert2(resol.heading>=90&resol.heading<135);
clase_resol.vert_135_180=...
vertcat(resol.desv_vert1(resol.heading>=135&resol.heading<=180),...
        resol.desv_vert2(resol.heading>=135&resol.heading<=180));

```

---

Finalmente, se utiliza un método de aprendizaje no supervisado, denominado *clustering* [16][94]. El objetivo del *clustering* es determinar el agrupamiento intrínseco en un conjunto de datos. Así, el *clustering* identifica los distintos grupos o *clusters* en los datos, sobre la base de la hipótesis de que un *cluster* en un espacio de datos es una región de alta densidad de puntos [135].

El algoritmo *k-means* [68][111][125], uno de los algoritmos de *clustering* más utilizados, es un método de agrupación particional, que presenta dos ventajas: i) es fácil de implementar y funciona con cualquier norma estándar; y ii) permite paralelización directa.

Un inconveniente del algoritmo *k-means* es que la solución alcanzada a menudo depende de los puntos de partida. Por lo tanto, es posible alcanzar un mínimo local, donde la reasignación de cualquier punto a un nuevo grupo aumentaría la suma total de las distancias al *centroide*<sup>27</sup>, cuando de hecho puede existir una mejor solución. Con el fin de evitar los mínimos locales, se ha utilizado un parámetro llamado *replicates*<sup>28</sup> para enfrentar este problema. Para cada una de las réplicas, el algoritmo *k-means* comienza a partir de un conjunto seleccionado aleatoriamente de *centroides* iniciales. A veces el algoritmo encuentra más de un mínimo local, sin embargo la solución final devuelta es la que tiene la suma total de distancias más baja.

En la Tabla 4-8 se recoge el algoritmo de *clustering* sobre los datos históricos de resoluciones de conflictos (una vez clasificados) implementado en este estudio, con el fin de obtener el modelo de resolución de conflictos en base a la operativa del controlador.

Tabla 4-8 Algoritmo de aplicación de técnicas de clustering (*k-means*) sobre los datos históricos de resoluciones de conflictos

---

```

function [modelo]=creacion_modelo_resol(clase_resol,clusters,rep);
%% Creación del modelo con k-means
derrotas=[0,45,90,135];
modelo=struct('derrota',[],'tipo',[],'nivel',[],'probabilidad',[]);
for i=1:1:4
    if i==1
        resol_temp=clase_resol.temp_0_45;
        resol_vert=clase_resol.vert_0_45;
    elseif i==2
        resol_temp=clase_resol.temp_45_90;
        resol_vert=clase_resol.vert_45_90;

```

---

<sup>27</sup> El centroide de un *cluster* se define como el punto equidistante de los objetos pertenecientes a dicho *cluster*.

<sup>28</sup> <http://mathworks.com/help/stats/k-means-clustering.html>

---

```

elseif i==3
    resol_temp=clase_resol.temp_90_135;
    resol_vert=clase_resol.vert_90_135;
elseif i==4
    resol_temp=clase_resol.temp_135_180;
    resol_vert=clase_resol.vert_135_180;
end

% Cálculo de niveles posibles de desviaciones temporales (tipo 1) y su
% probabilidad de ocurrencia
model_temp.id=(1:1:clusters)';
model_temp.tipo=ones(clusters,1)*1;
model_temp.derrota=derrotas(i);
[resol_temp(:,2),model_temp.nivel(:,1),~,~]=...
    kmeans(resol_temp(:,1),clusters,...
        'Distance','cityblock','Replicates',rep);
for j=1:1:length(model_temp.id)
    model_temp.ocurrencia(j,1)=length(find(resoluciones(:,2)==j));
end
model_temp.probabilidad(j,1)=...
    (model_temp.ocurrencia/sum(model_temp.ocurrencia))*100;
modelo =unir(maniobras,model_temp);
clear model_temp resol_temp

% Cálculo de niveles posibles de desviaciones verticales(tipo 2) y su
% probabilidad de ocurrencia

model_vert.id=(1:1:clusters)';
model_vert.tipo=ones(clusters,1)*2;
model_vert.derrota=derrotas(i);
[resol_vert(:,2),model_vert.nivel(:,1),~,~]=...
    kmeans(resol_vert(:,1),clusters,'Distance',...
        'cityblock','Replicates',rep);

for j=1:1:length(model_vert.id)
    model_vert.ocurrencia(j,1)=length(find(resoluciones(:,2)==j));
end
model_vert.probabilidad(j,1)=...
    (model_vert.ocurrencia/sum(model_vert.ocurrencia))*100;
modelo =unir(maniobras,model_vert);
clear model_vert resol_vert
end

```

---

Para determinar el número de *clusters* se ha utilizado la regla de Sturges [75][151], que permite obtener el número deseable de grupos en los que debería clasificarse una distribución. La fórmula de Sturges se deriva de una distribución binomial asumiendo una distribución aproximadamente normal.

$$k = 1 + \log_2 o \quad (22)$$

donde  $k$  es el número de *clusters*; y  $o$  es el número de observaciones utilizadas para construir el histograma.

En la Tabla 4-9 se recoge la implantación de la fórmula de Sturges para el cálculo de *clusters* que se ha utilizado previamente.



Tabla 4-9 Algoritmo de Sturges para la detección del número de clusters

```
function [clusters]=sturges(clase_resol);

%% Detección del número de cluster por Sturges
observaciones=mean...
([length(clase_resol.temp_0_45),length(clase_resol.temp_45_90),...
length(clase_resol.temp_90_135),length(clase_resol.temp_135_180),...
length(clase_resol.vert_0_45),length(clase_resol.vert_45_90),...
length(clase_resol.vert_90_135),length(clase_resol.vert_135_180)]);

clusters=round(1+(3.3*(log10(observaciones))));
```

De esta forma, tras aplicar las técnicas de clasificación y *clustering* sobre la base de datos de resoluciones históricas, se obtiene el modelo de resolución de conflictos. Dicho modelo entregará, en función de la derrota entre las aeronaves involucradas en el conflicto: i) el tipo y nivel de la desviación a aplicar para resolver los conflictos (minutos de desviación para resoluciones temporales o pies de desviación para resoluciones verticales); y ii) la probabilidad de que se produzca este tipo y nivel de desviación para resolver el conflicto (como el porcentaje de veces que se dio dicha resolución sobre el total de resoluciones históricas de la muestra). La creación del modelo se ilustra en la Figura 4-13.

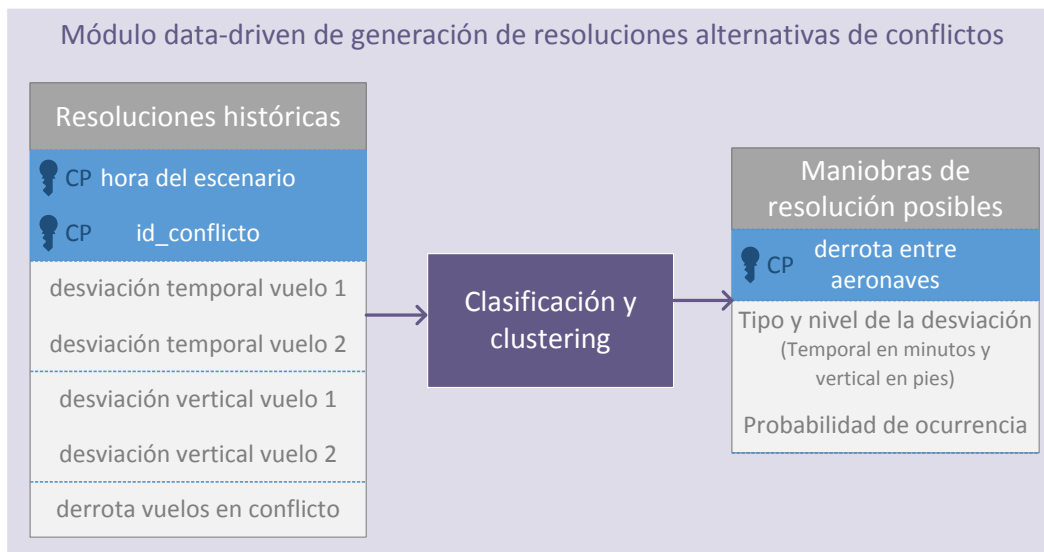


Figura 4-13 Obtención del modelo de generación de resoluciones alternativas

#### 4.2.4 Aplicación del modelo. Cálculo de resoluciones alternativas

En esta sección se aplica el modelo de generación de resoluciones alternativas desarrollado en la sección previa. Dicho modelo se usará sobre las planificaciones óptimas (de todos los vuelos de cada día de estudio) obtenidas tras la aplicación de los modelos desarrollados en el Capítulo 3.

El primer paso es detectar los conflictos entre los vuelos de cada uno de los días a planificar. Para ello se aplica el algoritmo de detección de conflictos por parejas (Tabla 4-4) obteniendo los potenciales conflictos y las características de estos, tal y como se muestra en la Figura 4-14 a continuación.

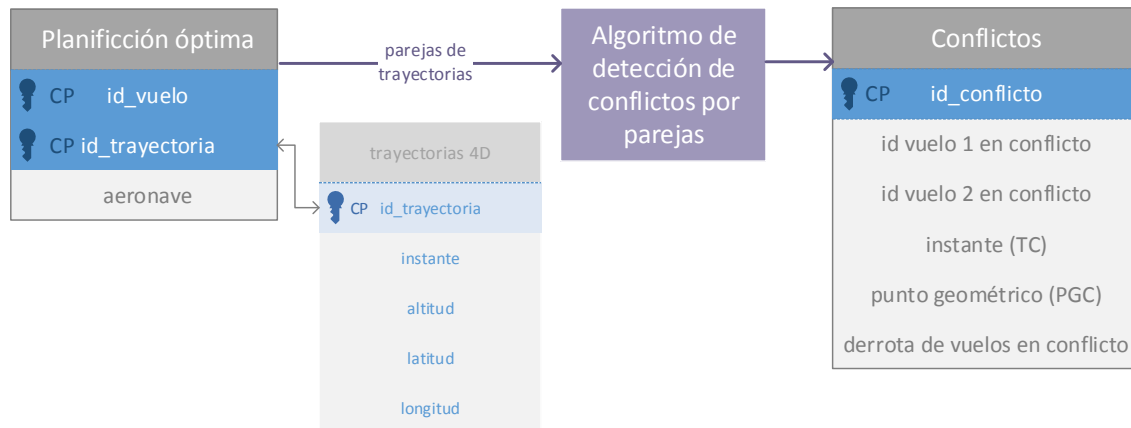


Figura 4-14 Esquema de datos de conflictos detectados en las planificaciones óptimas

A continuación, se resuelven los conflictos aplicando todas las posibles maniobras obtenidas en el modelo desarrollado en la sección anterior (Figura 4-13). De esta forma se modifican las trayectorias de cada aeronave involucrada en un conflicto, dando lugar a un conjunto de resoluciones posibles, es decir, trayectorias alternativas para cada vuelo afectado.

#### Resolución de conflictos temporales (velocidad)

La resolución temporal consiste en adelantar o retrasar el instante en que un vuelo pasa sobre el punto donde el conflicto fue detectado. Esto se ilustra en la Figura 4-15, donde los instantes del plan de vuelo real (con conflicto) se muestran en azul, y los instantes de la nueva trayectoria (después de aplicar la resolución temporal) se muestran en verde. El instante de inicio y de fin del conflicto están representados por  $t_i$  y  $t_f$ . En el ejemplo, el conflicto se resolvería temporalmente si la nueva trayectoria llega al punto donde se detectó el conflicto 2 minutos antes a lo especificado en el plan de vuelo real.



Figura 4-15 Ejemplo de la resolución temporal de conflictos

A continuación se recogen una serie de restricciones que se han considerado en las resoluciones temporales:

- El instante de entrada y salida de la fase de crucero ( $t_n$  y  $t_x$ ) permanecen constantes. Esto significa que si un conflicto se resuelve retrasando su llegada al punto de conflicto, la aeronave reducirá su velocidad en la fase anterior al conflicto (para llegar más tarde) y aumentará su velocidad posteriormente (para compensar el retraso y asegurar que el instante de salida es el mismo).
- Todas las velocidades establecidas en el nuevo plan de vuelo deben ser válidas de acuerdo con BADA (Base de Datos de Aeronaves), de lo contrario la trayectoria propuesta se considerará inválida.

En la Tabla 4-10 se recoge la implementación del algoritmo de cálculo de trayectorias alternativas al aplicar resolución temporal con un determinado nivel de resolución (dado por los minutos de diferencia con los que la nueva trayectoria llega al punto detectado de conflicto).

Tabla 4-10 Algoritmo de cálculo de trayectoria alternativa al aplicar resolución temporal

---

```
function [trl_alt]=resolucion_temporal(tr,nivel_resol);
% Input: trayectoria del vuelo a desviar (trl), nivel de la resolución
% a aplicar en minutos (nivel_resol)
% Output: trayectoria 4D resultante de aplicar la desviación
% temporal correspondiente

%% datos de la trayectoria del vuelo que vamos a buscar sus
resoluciones
tr.vel_2d(2:length(tr.inst),1)=...
    (vdist(tr.lat(2:end,1),tr.lon(2:end,1),...
    tr.lat(1:end-1,1),tr.lon(1:end-1,1)))./...
    ((tr.inst(2:end,1)-tr.inst(1:end-1,1))*(24*60*60));
tr.vel_z(2:length(tr.inst),1)=...
    ((tr.fl(2:end,1)-tr.fl(1:end-1,1))*30.48)./...
    ((tr.inst(2:end,1)-tr.inst(1:end-1,1))*(24*60*60));
tr.fase(find(tr.vel_z>0))=1; %ascenso
tr.fase(find(tr.vel_z==0))=2; %crucero
tr.fase(find(tr.vel_z<0))=3; %descenso

% Puntos de la trayectoria en conflicto
tr_conf=seleccionar(tr,find(tr.inst_conf==1));

%% Búsqueda de la trayectoria alternativa con una
%desviación temporal de la variable nivel_resol
tr_alt=struct('inst',tr.inst,'fl',tr.fl, ...
'lat',tr.lat,'lon',tr.lon);

% Búsqueda de las horas de inicio y fin de crucero y de las hora de
entrada
% y salida del conflicto
hora(1,1)=tr_alt.inst(min(find(tr.fase==2)));
hora(1,2)=tr_conf.inst(1,1);
hora(1,3)=tr_conf.inst(end,1);
hora(1,4)=tr_alt.inst(max(find(tr.fase==2)),1);

% Búsqueda de las horas de inicio y fin de crucero y de las hora de
entrada
% y salida del conflicto al modificar la trayectoria para su
```

---

---

```

resolución
hora(2,1)=hora(1,1);
hora(2,2)=hora(1,2)+(nivel_resol/(24*60*60));
hora(2,3)=hora(1,3)+(nivel_resol/(24*60*60));
hora(2,4)=hora(1,4);

% comprobar si las horas del conflicto sigue estando en la fase de
crucero
if hora(2,1)<hora(2,2) & hora(2,4)>hora(2,3)
    for l=1:1:length(hora(1,:))
        hora(3,l)=find(tr_alt(:,l)==hora(1,l));
    end

    tr_alt.inst(hora(3,1):hora(3,2),1)=...
        (hora(2,1):(hora(2,2)-hora(2,1)))/(hora(3,2)-hora(3,1)):hora(2,2)';
    tr_alt.inst(hora(3,3):hora(3,4),1)=...
        (hora(2,3):(hora(2,4)-hora(2,3)))/(hora(3,4)-hora(3,3)):hora(2,4)';
    tr_alt.inst(hora(3,2):hora(3,3),1)=...
        tr_alt.inst(hora(3,2):hora(3,3),1)+(nivel_resol/(24*60*60));

else
    tr_alt=struct('inst',[],'fl',[],'lat',[],'lon',[]);
end

```

---

#### Resolución vertical de conflictos

La resolución vertical de conflictos consiste en aumentar o disminuir la altitud de crucero en que el vuelo pasará sobre el punto donde se detectó un conflicto. Esto se ilustra en la Figura 4-16, donde la altitud de crucero del plan de vuelo real (con conflicto) se muestra en azul, y la altitud de crucero de la nueva trayectoria (después de aplicar la resolución vertical) se muestra en verde. En el ejemplo dado, el conflicto se resolvería verticalmente con la nueva trayectoria volando en el punto donde se detectó el conflicto 2.000 pies, tanto por encima como por debajo, a la altitud original de vuelo.

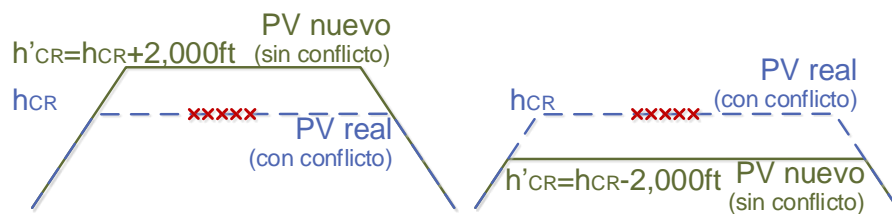


Figura 4-16 Ejemplo de la resolución vertical de conflictos

A continuación se recogen una serie de restricciones que se han considerado en las resoluciones verticales:

- Los ratios de ascenso o descenso establecidos en el nuevo plan de vuelo han sido extrapolados del plan de vuelo original.
- Todas las altitudes de crucero ( $h'_{CR}$ ) establecidas en el nuevo plan de vuelo deben ser válidas de acuerdo con BADA, de lo contrario la trayectoria propuesta se considerará inválida.

En la Tabla 4-11 se recoge la implantación del algoritmo de cálculo de trayectorias alternativas al aplicar resolución vertical con un determinado nivel de resolución (dado por los pies de diferencia con los que la nueva trayectoria llega al punto detectado de conflicto).

*Tabla 4-11 Algoritmo de cálculo de trayectoria alternativa al aplicar resolución vertical*

---

```
function [tr_alt]=resolucion_vertical(tr,nivel_resol);
% Input: trayectoria del vuelo a desviar (tr), nivel de la resolución
% a aplicar en pies(nivel_resol)
% Output: trayectoria 4D resultante de aplicar la desviación
% vertical correspondiente

%% datos de la trayectoria del vuelo que vamos a buscar sus
resoluciones
tr.vel_2d(2:length(tr.inst),1)=...
    (vdist(tr.lat(2:end,1),tr.lon(2:end,1),...
    tr.lat(1:end-1,1),tr.lon(1:end-1,1)))./...
    ((tr.inst(2:end,1)-tr.inst(1:end-1,1))*(24*60*60));
tr.vel_z(2:length(tr.inst),1)=...
    ((tr.fl(2:end,1)-tr.fl(1:end-1,1))*30.48)./...
    ((tr.inst(2:end,1)-tr.inst(1:end-1,1))*(24*60*60));

%% Búsqueda de la trayectoria alternativa con una desviación vertical
tr_alt=tr(:,1:4);
if vert>0
    % todo crucero
    if min(find(tr.fase==0))==1&max(find(tr.fase==0))==length(tr.fase)
        tr_alt.fl=tr.fl+vert;
    % solo ascenso y crucero
    elseif
min(find(tr.fase==0))>1&max(find(tr.fase==0))==length(tr.fase)
        [tr_alt]=sub_fl_ascenso(tr,tr_alt,vert);
        tr_alt(min(find(tr_alt.fl==0)):end).fl=...
        tr(min(find(tr_alt.fl==0)):end).fl+vert;
    % solo crucero y descenso
    elseif
min(find(tr.fase==0))==1&max(find(tr.fase==0))<length(tr.fase)
        [tr_alt]=sub_fl_descenso(tr,tr_alt,vert);
        tr_alt(1:max(find(tr_alt.fl==0))).fl=...
        tr(1:max(find(tr_alt.fl==0))).fl+vert;
    % ascenso, crucero y descenso
    elseif
min(find(tr.fase==0))>1&max(find(tr.fase==0))<length(tr.fase)
        [asc]=sub_fl_ascenso(tr,tr_alt,vert);
        [des]=sub_fl_descenso(tr,tr_alt,vert);
        tr_alt.fl=0;
        tr_alt(1:min(find(asc.fl==0))-1,2)=...
        asc(1:min(find(asc.fl==0))-1).fl;
        tr_alt(max(find(des.fl==0))+1:end,2)=...
        des(max(find(des.fl==0))+1:end).fl;
        tr_alt(min(find(tr_alt.fl==0)):max(find(tr_alt.fl==0))).fl=...
        tr(min(find(tr_alt.fl==0)):max(find(tr_alt.fl==0))).fl+vert;
    end
elseif vert<0
    % todo crucero
    if min(find(tr.fase==0))==1&max(find(tr.fase==0))==length(tr.fase)
        ini_cru=1;
```

---

---

```

    fin_cru=length(tr.fl);
    tr_alt(ini_cru:fin_cru).fl=tr(ini_cru:fin_cru).fl+vert;

    % solo ascenso y crucero
    elseif
min(find(tr.fase==0))>1&max(find(tr.fase==0))==length(tr.fase)
    fin_cru=length(tr.fl);
    asc=find(tr_alt.fl<tr(min(find(tr.fase==0))-1).fl+vert);
    if length(asc)==0
        ini_cru=1;
        tr_alt(ini_cru:fin_cru).fl=tr(min(find(tr.fase==0))-1).fl+vert;
    else
        ini_cru=max(asc(find(asc(:,1)<(min(find(tr.fase==0))-1)),1));
        tr_alt(ini_cru:min(find(tr.fase==0))-1).fl=...
            tr(min(find(tr.fase==0))-1).fl+vert;
        tr_alt(min(find(tr.fase==0)):fin_cru).fl=...
            tr(min(find(tr.fase==0)):fin_cru).fl+vert;
    end
    % solo crucero y descenso
    elseif
min(find(tr.fase==0))==1&max(find(tr.fase==0))<length(tr.fase)
    ini_cru=1;
    des=find(tr_alt.fl<tr(max(find(tr.fase==0))).fl+vert);
    if length(des)==0
        fin_cru=length(tr.fl);
        tr_alt(ini_cru:fin_cru).fl=tr(max(find(tr.fase==0))).fl+vert;
    else
        fin_cru=min(des(find(des(:,1)>max(find(tr.fase==0))),1));
        tr_alt(max(find(tr.fase==0)):fin_cru).fl=...
            tr(max(find(tr.fase==0))).fl+vert;
        tr_alt(ini_cru:max(find(tr.fase==0))).fl=...
            tr(ini_cru:max(find(tr.fase==0))).fl+vert;
    end
    % ascenso, crucero y descenso
    elseif
min(find(tr.fase==0))>1&max(find(tr.fase==0))<length(tr.fase)
    asc=find(tr_alt.fl<tr(min(find(tr.fase==0))-1).fl+vert);
    ini_cru=max(asc(find(asc(:,1)<(min(find(tr.fase==0))-1)),1));
    des=find(tr_alt.fl<tr(max(find(tr.fase==0))).fl+vert);
    fin_cru=min(des(find(des(:,1)>max(find(tr.fase==0))),1));
    if length(ini_cru)==0&length( fin_cru)>0
        ini_cru=1;
    elseif length(ini_cru)>0&length( fin_cru)==0
        fin_cru=length(tr.fl);
    elseif length(ini_cru)==0&length( fin_cru)==0
        ini_cru=1;
        fin_cru=length(tr.fl);
    end
    tr_alt(ini_cru:min(find(tr.fase==0))-1).fl=...
        tr(min(find(tr.fase==0))-1).fl+vert;
    tr_alt(max(find(tr.fase==0)):fin_cru).fl=...
        tr(max(find(tr.fase==0))).fl+vert;
    tr_alt(min(find(tr.fase==0)):max(find(tr.fase==0))).fl=...
        tr(min(find(tr.fase==0)):max(find(tr.fase==0))).fl+vert;
    end
end

```

---

Al aplicar el modelo a los conflictos detectados se obtiene un conjunto de resoluciones posibles para cada conflicto. Este conjunto de resoluciones alternativas contiene todas las

posibles resoluciones verticales y temporales, proporcionadas por el modelo *data-driven* implementado, para cada aeronave involucrada en un conflicto. También se calculan las siguientes propiedades para cada una de las posibles resoluciones:

- Probabilidad de ocurrencia de la resolución, es decir, de que esta sea implementada por el controlador. Cuanto mayor sea, más probable es que se lleve a cabo la acción propuesta. Este valor fue el calculado al crear el modelo de resolución de conflictos (Figura 4-13), y es función de cada tipo y nivel de resolución.
- Combustible adicional consumido aplicando la resolución propuesta, según el modelo de rendimiento de la aeronave BADA. Este valor puede ser negativo, en cuyo caso la nueva trayectoria consumirá menos combustible que la original.

En la Tabla 4-12 se recoge la implantación del algoritmo de cálculo del combustible adicional al aplicar determinada resolución.

Tabla 4-12 Algoritmo de cálculo del combustible adicional al aplicar determinada resolución

---

```
function [fuel_adicional]=fuel_adicional(tr1_alt,avion1,tr)

% Input: trayectoria 4D resultante de aplicar la desviación temporal
% correspondiente trayectorias del resto de vuelos (tr)
% Output: fuel adicional de la resolución
[fuel_real] = fuel_isa(tr1,avion1);
[fuel_alt] = fuel_isa(tr1_alt,avion1);
fuel_adicional=((fuel_alt-fuel_real)/fuel_real)*100;
```

---

- Posibilidad de aplicar con éxito una resolución específica. Se calcula partiendo de la base de actuaciones de la aeronave. Si la nueva trayectoria no es válida, no se considerará como una resolución a aplicar.

A continuación se recogen los algoritmos implementados para el cálculo de posibilidad de aplicar una determinada resolución temporal (Tabla 4-13) y una determinada resolución vertical (Tabla 4-14).

Tabla 4-13 Algoritmo de cálculo de posibilidad de aplicar una determinada resolución temporal

---

```
function [posible]=posibilidad_resolucion_temporal(tr1_alt,avion1,tr)

% Input: trayectoria 4D resultante de aplicar la desviación temporal
% correspondiente trayectorias del resto de vuelos (tr)
% Output: posibilidad de aplicar la resolución temporal
% Calculamos velocidades de la trayectoria solución
tr1_alt.vel_2d(2:length(tr1_alt.inst),1)=...
    (vdist(tr1_alt.lat(2:end,1),tr1_alt.lon(2:end,1),...
    tr1_alt.lat(1:end-1,1),tr1_alt.lon(1:end-1,1)))./...
    ((tr1_alt.inst(2:end,1)-tr1_alt.inst(1:end-1,1))*(24*60*60));
tr1_alt.fase(find(tr1.vel_z>0))=1; %ascenso
tr1_alt.fase(find(tr1.vel_z==0))=2; %crucero
tr1_alt.fase(find(tr1.vel_z<0))=3; %descenso

%% Buscamos velocidad minima y maxima permitida
```

---

---

```

load(strcat(pwd,sep,'bada_mat',sep','bada_',avion1,'.mat')) %BADA
vmin=conf_cr(2,1)*0.51444444;
vmax=envelope(1,1)*0.51444444;
%% ¿es posible? (la nueva velocidad no puede estar
                %fuera de los rangos de velocidad de BADA)
posible=(max(tr1_alt.vel_2d(min(find(tr1_alt.fase==2)):...
    max(find(tr1_alt.fase==2))))<vmax&...
min(tr1_alt.vel_2d(min(find(tr1_alt.fase==2)):...
    max(find(tr1_alt.fase==2)),6))>vmin)==1;

```

---

*Tabla 4-14 Algoritmo de cálculo de posibilidad de aplicar una determinada resolución vertical*

---

```

function [posible]=posibilidad_resolucion_vertical(tr1_alt,avion1,tr)

% Input: trayectoria 4D resultante de aplicar la desviación temporal
% correspondiente trayectorias del resto de vuelos (tr)
% Output: posibilidad de aplicar la resolución temporal

% Calculamos velocidades de la trayectoria solucion
tr1_alt.vel_2d(2:length(tr1_alt.inst),1)=...
    (vdist(tr1_alt.lat(2:end,1),tr1_alt.lon(2:end,1),...
    tr1_alt.lat(1:end-1,1),tr1_alt.lon(1:end-1,1)))./...
    ((tr1_alt.inst(2:end,1)-tr1_alt.inst(1:end-1,1))*(24*60*60));

tr1_alt.fase(find(tr1.vel_z>0))=1; %ascenso
tr1_alt.fase(find(tr1.vel_z==0))=2; %crucero
tr1_alt.fase(find(tr1.vel_z<0))=3; %descenso

```

---

- Al aplicar el modelo también se comprueba (Tabla 4-15) si la nueva trayectoria propuesta está libre de conflictos con todas las demás aeronaves. De lo contrario, no se considerará como una posible resolución a aplicar.

*Tabla 4-15 Algoritmo de cálculo de conflictos con otros vuelos de una determinada resolución*

---

```

function [solucion]= otros_conflictos(tr1_alt,avion1,tr)

% Input: trayectoria 4D resultante de aplicar la desviación temporal
% correspondiente trayectorias del resto de vuelos (tr)
% Output: la resolución tiene conflictos con otros vuelos?
% ¿soluciona con todas la demás trayectorias del día?
    solucion=true;
    % solo nos quedamos con la parte de crucero
    tr1_alt_cru=crucero(tr1_alt);
    % buscamos conflictos con todos los vuelos del día
    vs=unique(tr.id_vuelo);% id vuelos del día
for j=1:length(vs)
    clear tri
    tri=seleccionar(tr,find(ismember(tr.id_vuelo,vs(j,1))));
    tri=crucero(tri); % sólo el crucero
    if length(tr1_alt_cru.inst)>0&length(tri.inst)>0
        [out] = pairwise(tr1_alt_cru,tri);
        if out==1
            solucion=false;

```

---



```

        end
    end
    clear rutal conf
end
else
    solucionana=false;
    tr1_alt=struct('inst', [], 'fl', [], 'lat', [], 'lon', []);
end

```

En la Figura 4-17 se esquematiza el proceso de detección de las resoluciones alternativas a todos los conflictos detectados en la planificación de un día determinado.

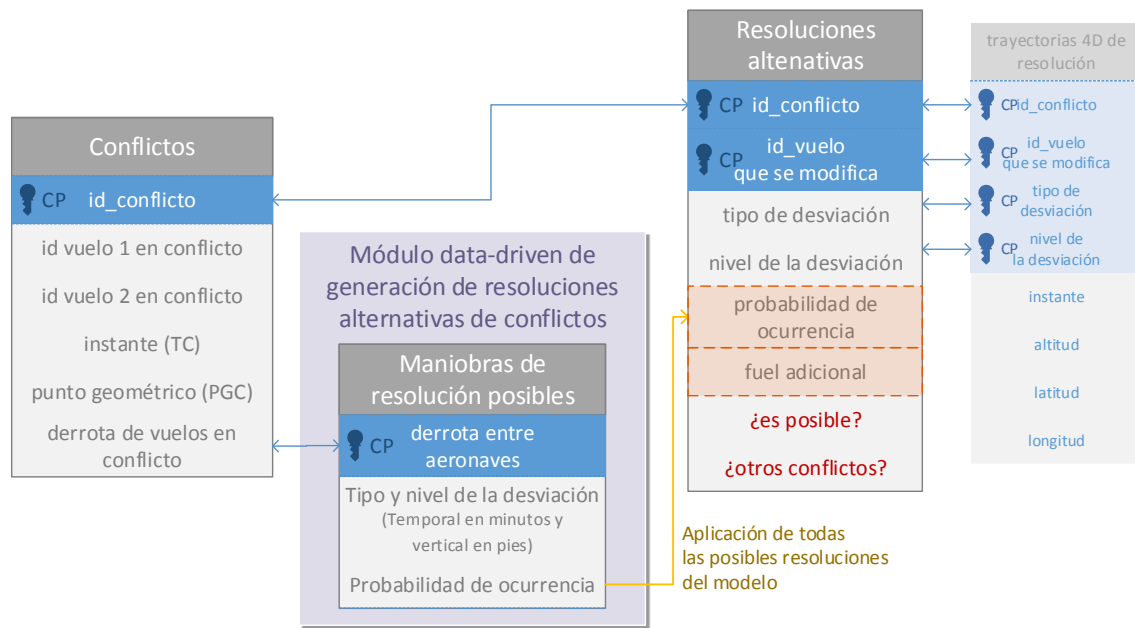


Figura 4-17 Esquema de datos de las resoluciones alternativas a los conflictos detectados la planificación de un día determinado

Con esto se consigue tener un abanico de soluciones. Sin embargo, será necesario examinar las diferentes alternativas para identificar la solución óptima. Para ello, se utilizarán los datos de: i) probabilidad de aplicación de la resolución; y ii) conflictos posibles de la nueva trayectoria resolución con otros vuelos del escenario, para filtrar las resoluciones entre la que se buscará la solución óptima. Es decir, si la nueva trayectoria no es válida o presenta nuevos conflictos, no se considerará como una resolución potencialmente óptima.

Una vez filtradas las resoluciones válidas, la búsqueda de la solución óptima se a llevará a cabo teniendo en cuenta por un lado la minimización del consumo de combustible, y por otro, la probabilidad de que la maniobra de resolución sea aplicada por los controladores. Esto llevará a un problema que debe equilibrar estos objetivos contrapuestos, el cual se afrontará a continuación en la sección 4.3.

### 4.3 Módulo de búsqueda de la resolución óptima

Las resoluciones alternativas son evaluadas en este proceso final de optimización multiobjetivo, dando lugar a un plan óptimo sin conflictos, que toma en consideración el consumo de combustible y la probabilidad de que la resolución sea aplicada por el controlador.

La solución óptima identificada puede no haber sido la mejor solución teórica. Sin embargo, pertenece al conjunto de soluciones propuesto por el modelo de resolución de conflictos y es, por lo tanto, una solución eficaz que los controladores de tráfico aéreo son susceptibles de aplicar.

Cada una de las posibles resoluciones a un conflicto tiene que equilibrar una serie de objetivos contrapuestos. Por un lado, existe el deseo de minimizar el consumo de combustible (que es de interés para las compañías aéreas), y por otro existe el interés en maximizar la probabilidad de que la maniobra de resolución de conflictos propuesta se parezca a la maniobra que los controladores hubieran aplicado en caso de producirse el conflicto.

Con la maximización de la probabilidad de que la maniobra de resolución de conflictos propuesta fuera aplicada por los controladores se obtendrá una distribución de flujos más homogénea y, al mismo tiempo, se mejorará el equilibrio de demanda y capacidad que es de interés para el proveedor de servicios de navegación aérea. Una suposición razonable que subyace en esta argumentación es que los controladores ATC son altamente competentes y eficaces en la resolución de conflictos durante la fase táctica.

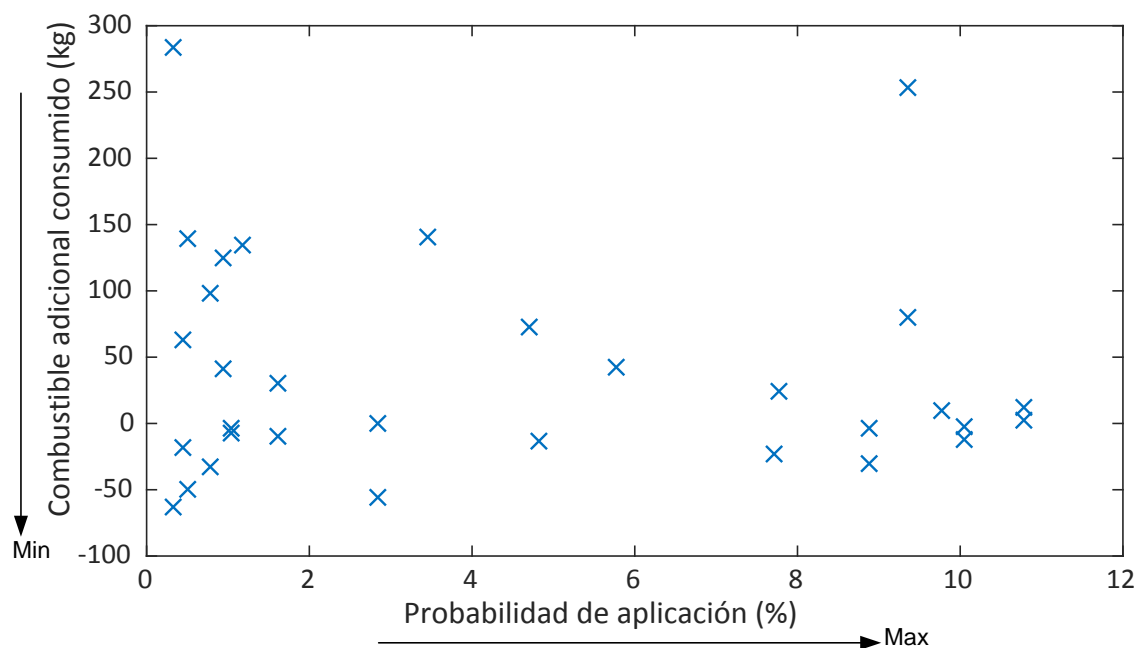


Figura 4-18 Posibles resoluciones propuestas para un conflicto individual

En la Figura 4-18 se muestran, a modo de ejemplo, todas las posibles resoluciones temporales y verticales, propuestas por el modelo, para un conflicto individual. El eje  $y$  indica el combustible adicional consumido por cada resolución, mientras que el eje  $x$  da el porcentaje de probabilidad de que la resolución sea aplicada por el controlador, a la que se denominará "probabilidad de aplicación (%)". La solución óptima es aquella que maximiza el valor de  $x$  minimizando el de  $y$ .

Por lo tanto, puesto que hay más de una función objetivo a ser optimizada simultáneamente, se trata de un problema de optimización multiobjetivo [112][114].

#### 4.3.1 Solución óptima de Pareto. Método de las restricciones $\varepsilon$

Si en un problema de optimización multiobjetivo no existe una solución única que optimice simultáneamente cada objetivo, entonces se dice que las funciones objetivo son conflictivas. Como ya se ha visto previamente, una solución es óptima de Pareto si ninguna de las funciones objetivo puede ser mejorada en valor sin degradar algunos de los otros valores objetivos. Sin información adicional sobre las preferencias, todas las soluciones óptimas de Pareto se consideran igualmente buenas.

Según Van Veldhuizen y Lamont [156] la solución final de un problema multiobjetivo es el resultado de dos procesos: la optimización y la decisión. Dependiendo de la fase de decisión en que el decisor exprese su preferencia, los métodos multiobjetivo pueden clasificarse como "a priori", "interactivos" o "a posteriori".

Para la resolución del problema que se aborda en esta sección, se ha utilizado un método a posteriori, ya que dichos métodos informan al decisor sobre el contexto de cualquier alternativa antes de tomar la decisión final. Este tipo de método requiere mucha computación, con la ventaja de que el decisor sólo necesita participar en la fase de decisión.

El método específico utilizado será el método de las *restricciones  $\varepsilon$*  [105][123], adelantado en la sección 2.2.1, que proporciona un subconjunto representativo de las soluciones óptimas de Pareto, o frente de Pareto, para cada conflicto individual. El problema multiobjetivo puede expresarse como:

$$\min_{x \in \Sigma} (f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), \dots, f_M(\bar{x})) \quad (23)$$

donde  $\bar{x}$  es vector de variables de estado;  $f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), \dots, f_M(\bar{x})$  son las  $M$  funciones objetivo; y  $\Sigma$  es el espacio solución, definido como el conjunto de todos los puntos posibles de un problema de optimización que satisface las limitaciones del problema.

En el método de las restricciones  $\varepsilon$ , una de las funciones objetivo se optimiza utilizando las otras funciones objetivas como restricciones. Estas se incorporan a las restricciones del modelo, como se muestra a continuación:

$$\min f_1(\bar{x}) \text{ tal que } f_2(\bar{x}) \geq \varepsilon_i \quad (24)$$

Para encontrar el conjunto de soluciones óptimas de Pareto, el problema se resuelve varias veces seleccionando diferentes valores del vector de restricción  $\varepsilon_i$  con  $i \in (1, 2, \dots, n)$ , donde  $n$  es el número de variables.

En este estudio, la función probabilidad de aplicación de la resolución ( $f_2(\bar{x})$ ) se utiliza como una restricción. La selección de los valores  $\varepsilon_i$  significa que una región específica del espacio objetivo está fuera de los límites. Por lo tanto, la solución óptima (aquella que minimiza el consumo de combustible adicional) debe provenir de las soluciones viables restantes, como se ilustra en la Figura 4-19. Para una restricción específica, se debe encontrar la solución óptima para todos los valores del vector de restricciones,  $\varepsilon_i$ . Esto dará el frente de Pareto para ese conflicto en particular.

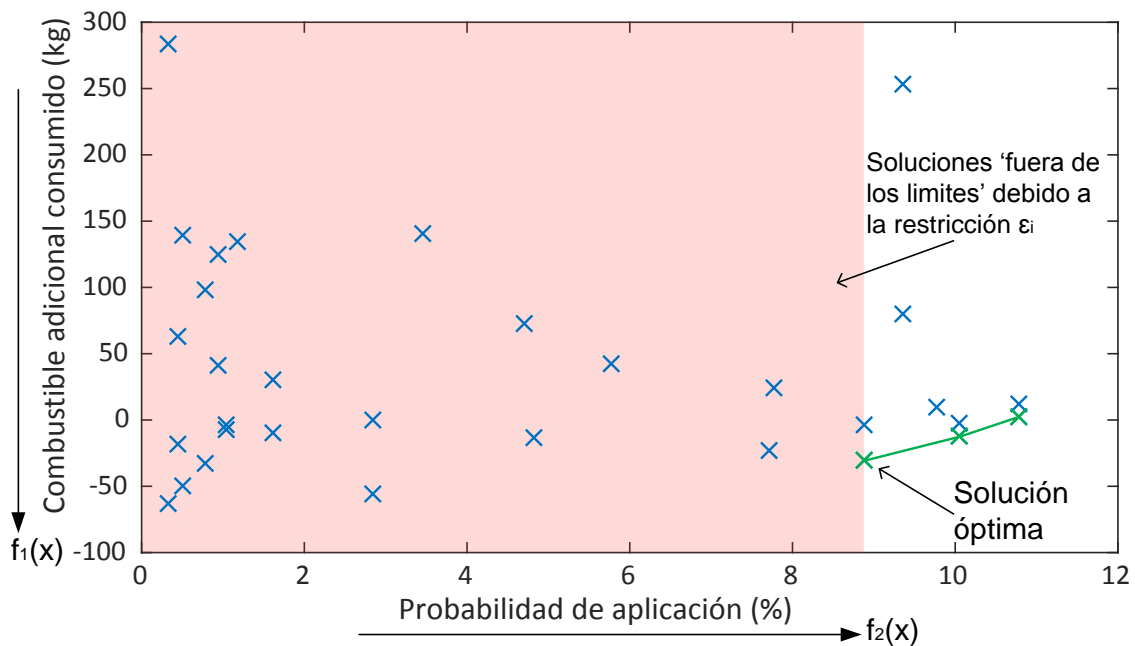


Figura 4-19 Ilustración del método de las restricciones  $\varepsilon$

En la Tabla 4-16 se recoge la implantación del algoritmo de las restricciones  $\varepsilon$ , para el cálculo del frente de Pareto de las resoluciones propuestas para un conflicto individual.

Tabla 4-16 Algoritmo de las restricciones  $\varepsilon$

```
function [pareto]=metodo_restricciones_e(resol)

% Input: propiedades de todas la resoluciones alternativas
% de un conflicto individual
% Output: puntos (fueal adicional y probabilidad) del frente de Pareto

% solo nos quedamos con las resoluciones posibles y libres de
% conflictos con el resto de vuelos

resol=seleccionar(resol,find(resol.posible==1&resol.solucion==1));

% identificamos todos los valores únicos de probabilidad de resolución
```

---

```

pareto=unique(resol.probabilidad);
pareto.probabilidad=sortrows(pareto,-1);

% Aplicamos los valores únicos de probabilidad de resolución como
% restricciones, y para cada uno de estos calculamos su
% correspondiente valor mínimo de fuel adicional

for i=1:length(pareto.probabilidad)

    b=seleccionar(resol,...
        find(resol.probabilidad>=pareto.probabilidad(p,i)));
    pareto.fuel_adicional=min(b.fuel_adicional);
    clear b
end

[~,b,~]=unique(pareto.fuel_adicional,'stable');
pareto=seleccionar(pareto,b);

```

---

Una vez que los frentes de Pareto han sido calculados para todos los conflictos, es necesario analizar las soluciones en cada frente para encontrar la solución óptima global para todos los conflictos.

#### 4.3.2 Diseño de la toma de decisiones

Hay dos pasos principales en el diseño de la toma de decisiones [67]: i) generar el espacio de opciones, es decir, los frentes de Pareto para cada conflicto, y ii) seleccionar la mejor opción. Elegir entre el espacio de opciones no es un asunto trivial, sino más bien una función de compromiso. Se trata de poblar una serie de soluciones a lo largo de los frentes de Pareto de cada conflicto, y luego seleccionar uno basado en los valores de determinados atributos para las soluciones dadas.

En los frentes de Pareto de cada conflicto, así como las soluciones que satisfacen la exigencia de consumo de combustible mínimo y probabilidad de aplicación máxima, también hay soluciones intermedias. Estas soluciones implican diferentes niveles de compensación, en los que un objetivo se satisface en detrimento de otro. La compensación viene dada por la pendiente de la curva,  $\tan \alpha$ , que conecta dos soluciones:

$$\tan \alpha = [f_2(x_j) - f_2(x_i)] / [f_1(x_j) - f_1(x_i)] \quad (25)$$

donde  $f_2(x_i)$  y  $f_2(x_j)$  son el valor de la función probabilidad de aplicación de las soluciones  $i$  y  $j$ ;  $f_1(x_j)$  y  $f_1(x_i)$  son el valor de la función combustible adicional consumido de las soluciones  $i$  y  $j$ .

Un valor pequeño de  $\alpha$  implica que se logra un aumento en la probabilidad de aplicación de la resolución a cambio de un ligero aumento en el consumo de combustible. Por el contrario, un alto valor de  $\alpha$  implica que se requiere un aumento drástico en el consumo de combustible para aumentar la probabilidad de aplicación de la resolución. Se

usan las pendientes de los frentes de Pareto  $\tan \alpha$  para poblar los frentes de cada conflicto con una serie de soluciones óptimas. Esto se hace usando un proceso iterativo:

- Elegir un valor específico de  $\tan \alpha$ .
- Utilizarlo para poblar el frente de Pareto de cada conflicto.
- Seleccionar la solución que dé un consumo mínimo de combustible adicional. Si la pendiente es mayor o igual a  $\tan \alpha$ , esta es la solución óptima.
- De lo contrario, (si la pendiente es menor que el valor  $\tan \alpha$  seleccionado) se elige el siguiente valor del frente de Pareto.
- Se repite el proceso hasta que se hayan encontrado las soluciones óptimas.

Las soluciones con valores pequeños de  $\tan \alpha$  están más cerca de satisfacer el criterio de un consumo de combustible adicional mínimo. Por el contrario, los valores altos de  $\tan \alpha$  están más cerca de satisfacer el criterio de máxima probabilidad de aplicación de la resolución, tal y como se aprecia en la Figura 4-20.

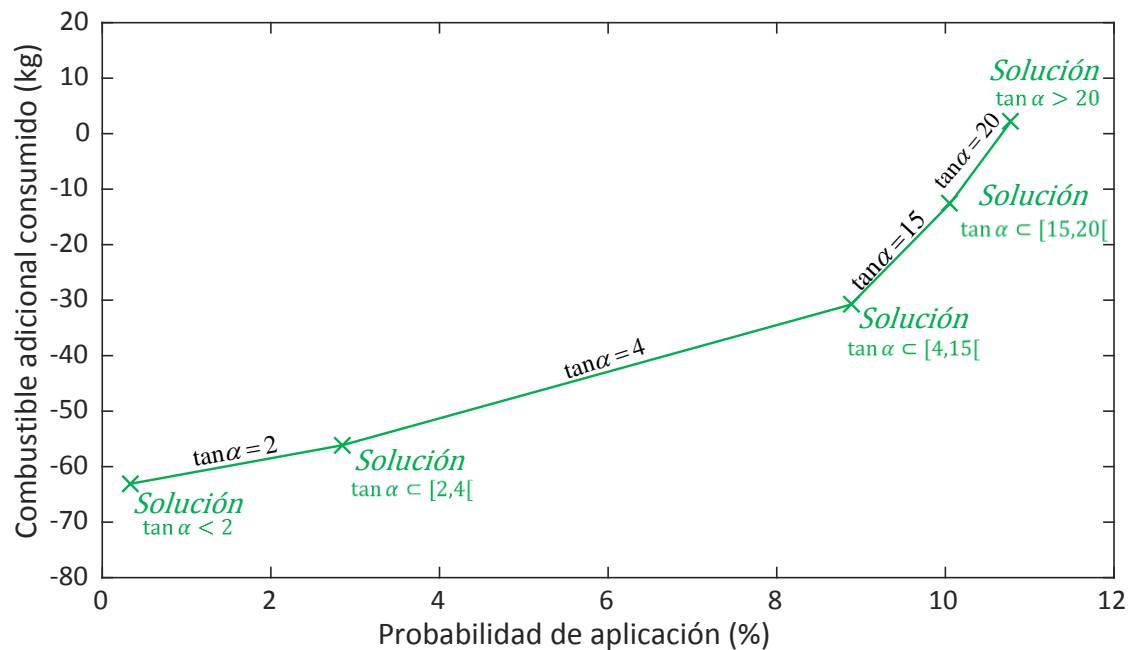


Figura 4-20 Frente de Pareto de las resoluciones a un conflicto individual. Soluciones intermedias como función de  $\tan \alpha$

Para detectar los valores de  $\tan \alpha$  a utilizar en cada planificación, se aplica el algoritmo *k-means* al histograma con las pendientes de los frentes de Pareto para todos los conflictos, el cual se muestra en la Figura 4-21. Los centroides (representados con líneas discontinuas en dicha figura) detectados se utilizaron como los valores de  $\tan \alpha$  para poblar una serie de soluciones intermedias a lo largo de los frentes de Pareto de cada conflicto.

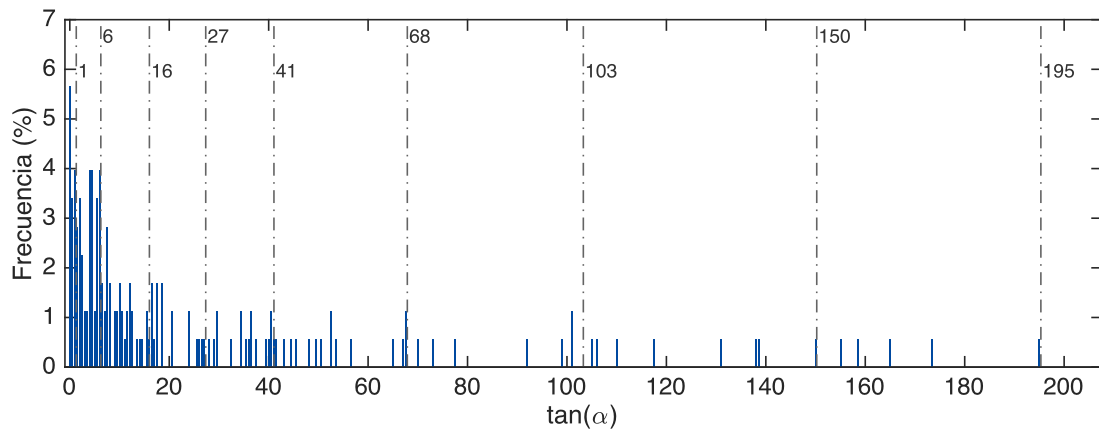


Figura 4-21 Histograma con las pendientes de los frentes de Pareto de todos los conflictos de determinada planificación a optimizar

Al aplicar a todos los conflictos detectados de una planificación los criterios de: i) resolución de mínimo consumo de combustible; ii) resolución de máxima probabilidad de aplicación y; iii) resoluciones intermedias estableciendo los valores de  $\tan \alpha$ , se obtienen diferentes planificaciones libres de conflictos.

Para evaluar la aptitud de cada uno de estos criterios (y la forma particular de cada una de ellas para resolver los conflictos) se calculan:

- El consumo de combustible adicional total de la nueva planificación, sin conflictos, frente a la planificación de partida con conflictos.
- La adherencia a la planificación óptima de partida con conflictos, después de aplicar los criterios antes mencionados para la resolución de los mismos.

Utilizando una gestión óptima de flujos (incorporando prácticas ATC eficaces al modelo de resolución de conflictos), se consigue una mayor adherencia a la planificación de partida. Es seguro asumir que cuanto mayor es la probabilidad de que las resoluciones sean aplicadas por controladores, más homogénea será la distribución de flujos.

## Capítulo 5. VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El objetivo de este capítulo es aplicar la metodología de generación de planificaciones óptimas globales y sin conflictos sobre diferentes escenarios para: i) presentar una aplicación práctica de la metodología desarrollada a lo largo del estudio; y ii) proporcionar los resultados de la validación.

En primer lugar (sección 5.1) se presentarán los escenarios de validación sobre los que se aplicará la metodología desarrollada y las métricas elegidas para ilustrar sus capacidades.

A continuación se muestran los resultados de la aplicación de cada uno de los módulos que conforman el prototipo (Figura 5-1). Estos se recogen en las siguientes secciones:

- Los resultados de la aplicación del módulo 1, de generación de planificaciones alternativas, se recogen en la sección 5.2. En dicha sección también se recogen los resultados intermedios de la creación del modelo *data-driven*, tanto de la preparación de los datos de entrada como la ilustración del modelo en sí.
- Los resultados de la aplicación del módulo 2, de búsqueda de la planificación óptima (aún con conflictos), se recogen en la sección 5.3.
- los resultados de la aplicación del módulo 3, de resolución de conflictos, se recogen en la sección 5.4. Se incluyen los resultados intermedios de la creación del modelo *data-driven* de resolución de conflictos basado en operativa de controlador.
- Los resultados de la aplicación del módulo 4, de búsqueda de la resolución óptima, se recogen en la sección 5.5.

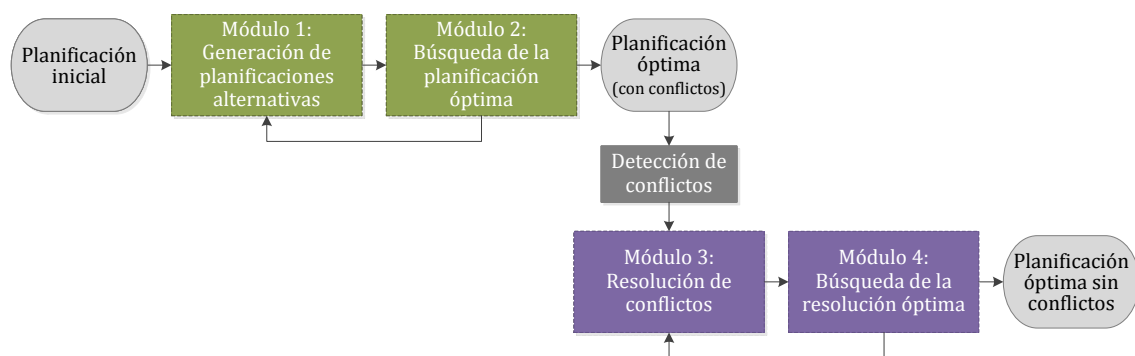


Figura 5-1 Esquema del prototipo de generación de planificaciones óptimas globales y sin conflictos



## 5.1 Presentación de los escenarios de validación

Para la validación de la metodología de generación de planificaciones óptimas globales sin conflictos, esta aplica sobre un total de doce días, cada uno de los cuales constituye un escenario de validación. Estos días están distribuidos a lo largo de un año y en distintos días de la semana, con el objeto de evitar cualquier sesgo debido a una estacionalidad particular.

Las métricas utilizadas para evaluar la metodología desarrollada son:

- Consumo de combustible<sup>29</sup> de todos los vuelos completos.
- Número de desequilibrios entre capacidad y demanda (dentro del FIR España Continental)
- Demora de arribada, frente a lo establecido en la planificación real dada por la compañía.
- Número de conflictos (dentro del FIR España Continental)

En la Tabla 5-1 se muestra el valor de cada una de estas métricas para la planificación real<sup>30</sup>, para cada escenario considerado es decir, aquella a la se aplicará la metodología desarrollada.

Como puede verse en dicha tabla, la selección de los escenarios también está relacionada con una distribución de los valores de las métricas. Se han seleccionado días con valores variados de: i) número de movimientos, ii) consumo de combustible, iii) desequilibrios entre capacidad y demanda; y iv) número de conflictos.

No se ha dado el valor de la demora de arribada, ya que dicho valor es cero para todos los escenarios, al medirse esta demora respecto a la hora de arribada establecida en la propia planificación real.

---

<sup>29</sup> Como ya se explicó en la sección 3.2.5, el consumo de combustible del vuelo completo se ha calculado extrapolando el consumo dentro del FIR España Continental al vuelo completo. Esta simplificación se ha realizado debido a que sólo se cuenta con el consumo de combustible dentro de dicha región puesto que es el tramo de vuelo que se está optimizando. Además dicha extrapolación es necesaria, de lo contrario en el proceso de optimización premiarían a se aquellas trayectorias que tienen menor recorrido dentro del FIR España Continental, pudiendo no ser las más óptimas considerando el consumo de combustible del vuelo completo.

<sup>30</sup> Esta planificación son datos reales extraídos del subsistema de Gestión de Planes de Vuelo (GIPV), correspondientes al mensaje de creación de plan de vuelo de cada vuelo del escenario.

*Tabla 5-1 Métricas de las planificaciones reales de cada escenario de validación*

Escenario	Día de la semana	Número de vuelos	Consumo de combustible (ton)	Número de desequilibrios	Número de conflictos
1	X	2777	24.196	44	126
2	X	2816	24.089	12	118
3	S	4154	36.225	107	311
4	V	4404	34.220	48	288
5	J	4577	34.514	103	308
6	D	5002	36.551	70	365
7	M	4896	38.702	97	305
8	L	5123	38.059	121	406
9	J	4633	33.424	80	258
10	S	4586	38.406	47	384
11	X	3332	27.186	23	171
12	V	3445	28.359	24	176

## 5.2 Resultados de la aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas

En esta sección se recogen, en primer lugar, los resultados de la creación del módulo de generación de planificaciones alternativas, a partir de la muestra de tres años. En particular aquellos que ilustran: i) la organización de los datos de partida (mediante tablas de distribución de frecuencias), en la sección 5.2.1; y ii) las características del modelo obtenido, el cual contiene todas las trayectorias posibles para cada combinación O-D-A, en la sección 5.2.2.

Por último, en la sección 5.2.3, se muestran los resultados tras la aplicación de dicho módulo sobre la planificación real de cada escenario de validación particular.

### 5.2.1 Tablas de distribución de frecuencias

Dado que los datos necesarios de los planes de vuelo de los que se parte para crear el modelo *data-driven* (altitudes, velocidades horizontales y velocidades verticales) presentan una distribución muy dispersa de valores, el primer paso es agrupar estos datos. De esta forma se garantiza que el número de trayectorias posibles que se obtenga para cada combinación O-D-A será una magnitud manejable. Para esto se utilizan tablas de distribución de frecuencias, de acuerdo a lo definido en la sección 3.2.3

Así, para los parámetros de altitud, velocidad horizontal y velocidad vertical de los planes de vuelo de todos los vuelos de la muestra de tres años, se calcula su amplitud de clase, que será la precisión a la que es necesario redondear cada parámetro para conseguir la agrupación buscada. En la Tabla 5-2 se muestran el rango, número de clases, y amplitud de clase de cada una de los parámetros:

Tabla 5-2 Parámetros de distribución de frecuencias de los parámetros que definen un plan de vuelo

	Rango (R)	Número de clases (Nc)	Amplitud de clase (Ac)
Altitud	32.000 pies	26	1000 pies
Velocidad horizontal	144 m/s	26	5 m/s
Velocidad vertical	14 m/s	26	0.5 m/s

A continuación, se muestran los histogramas de altitud (Figura 5-2), velocidad horizontal (Figura 5-3) y velocidad vertical (Figura 5-4) en cada fijo de todos los planes de vuelo (de los tres años de datos utilizados) en los que se basa el modelo *data-driven* implementado. Se muestran dos histogramas para cada una de los parámetros, (a) antes y (b) después de agrupar los datos aplicando distribución de frecuencias. Tras realizar las agrupaciones, se observa como los histogramas resultantes presentan unos patrones similares a los histogramas originales. Por lo tanto, se utilizan los datos agrupados para determinar las trayectorias posibles para cada combinación O-D-A, obteniendo un número manejable de trayectorias por combinación O-D-A.

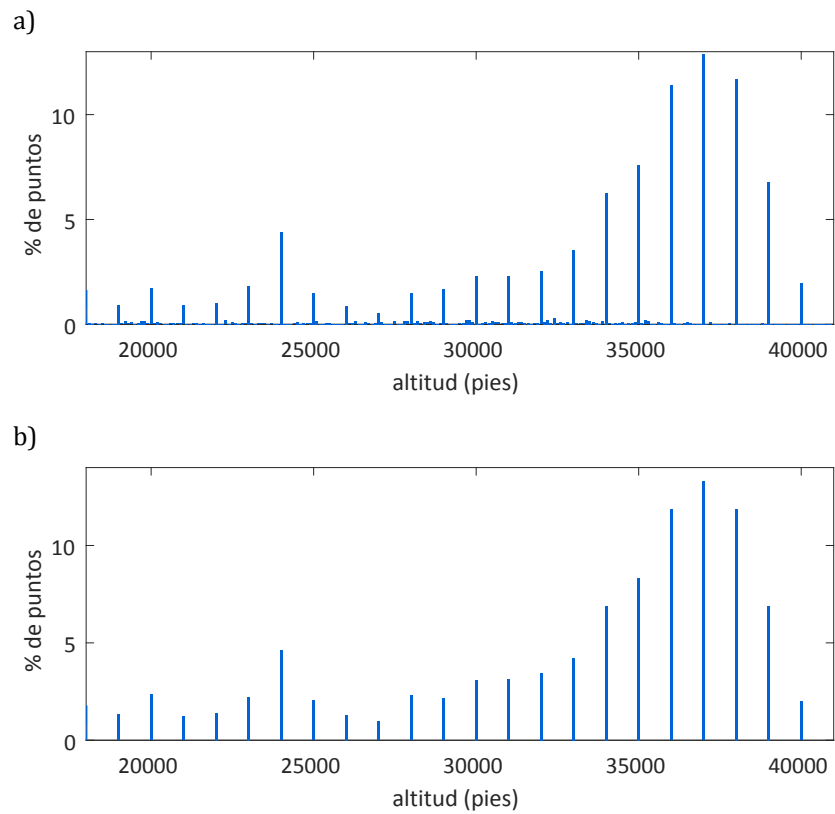


Figura 5-2 Histograma de altitudes; a) antes de aplicar distribución de frecuencias; b) tras aplicar distribución de frecuencias

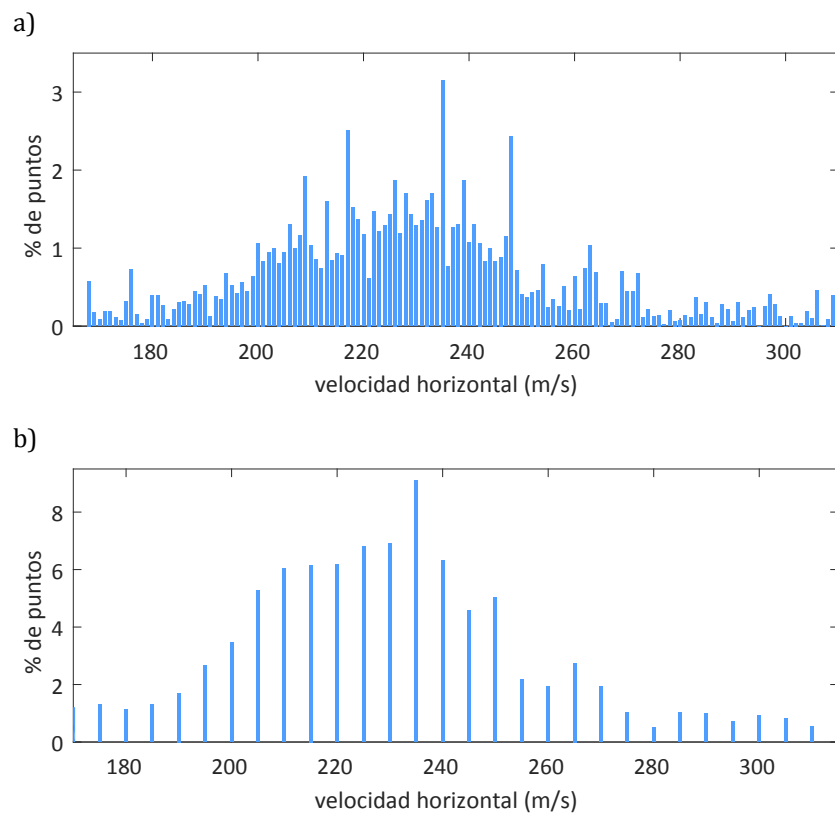


Figura 5-3 Histograma de velocidades horizontales a) antes de aplicar distribución de frecuencias; b) tras aplicar distribución de frecuencias

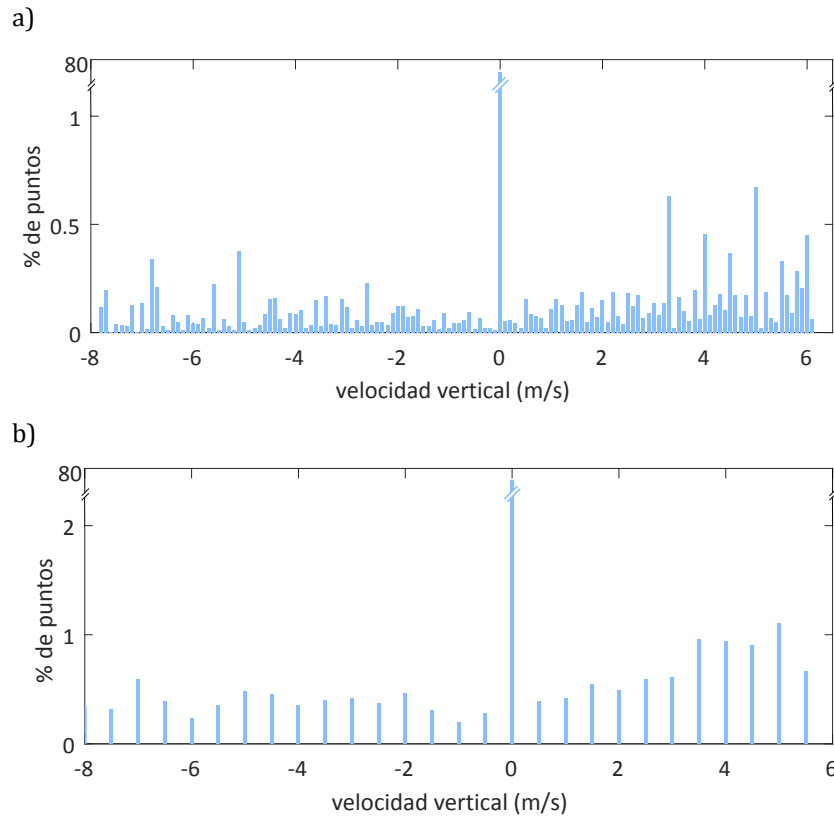


Figura 5-4 Histograma de velocidades verticales a) antes de aplicar distribución de frecuencias; b) tras aplicar distribución de frecuencias

### 5.2.2 Resultados de la creación del modelo

Tras ordenar en clases cada uno de los parámetros que componen todos los planes de vuelo de la muestra utilizada para el desarrollo del modelo *data-driven*, se obtienen todas las trayectorias posibles para cada combinación O-D-A. Para ello se buscan todas las trayectorias posibles (dentro del FIR España Continental), para cada combinación, considerando los campos: i) fijo de paso ii) velocidad vertical iii) velocidad horizontal y iv) altitud, que se dieron en los planes de vuelo de la muestra de vuelos de tres años. Estos resultados corresponden al procedimiento descrito en la sección 3.2.4

En la Figura 5-5 se representa el histograma con el porcentaje de combinaciones O-D-A en función de su número de trayectorias posibles identificadas con el método *data-driven*.

En promedio las combinaciones O-D-A tienen unas 70 trayectorias posibles. Además, menos del 0,2% de las combinaciones cuentan con tan sólo una trayectoria posible, y menos del 1% de las combinaciones tienen más de 350<sup>31</sup> trayectorias posibles.

<sup>31</sup> Número de trayectorias posibles correspondiente al percentil  $P_{99}$  del histograma de la Figura 5-5.

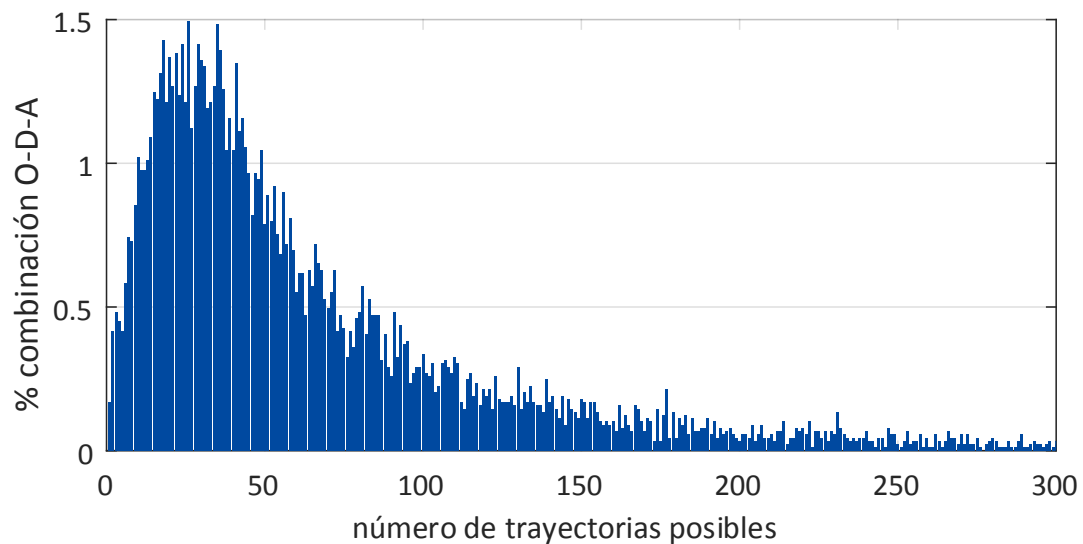


Figura 5-5 Histograma del porcentaje de combinaciones O-D-A en función del número de trayectorias posibles

A continuación se representan gráficamente ejemplos de las trayectorias posibles para dos de las combinaciones O-D-A. A modo de ejemplo, en la Figura 5-6 se representan las trayectorias posibles para una combinación de vuelos internos al FIR España Continental (vuelos con origen el aeropuerto de Bilbao -LEBB-, destino Valencia -LEVC- con una aeronave Bombardier CRJ100).

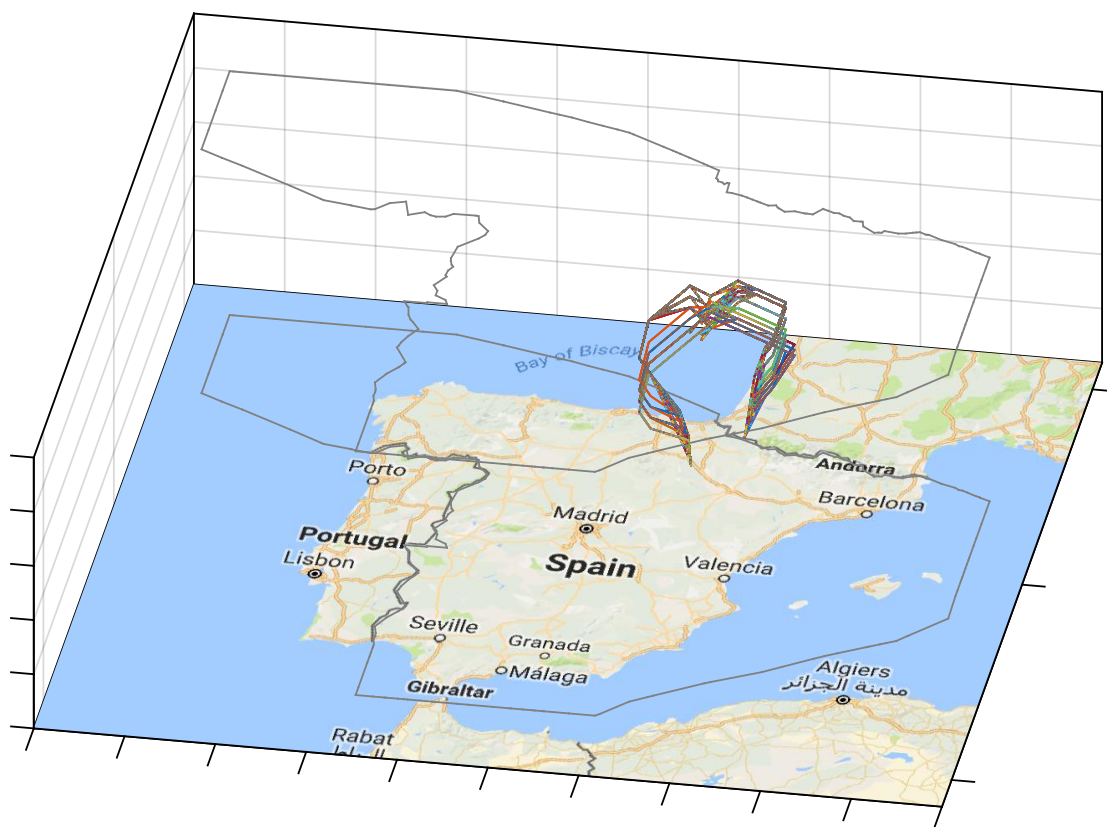


Figura 5-6 Representación de las trayectorias posibles para la combinación LEBB-LEVC-CRJ1

En la Figura 5-7 se representan las trayectorias posibles para una combinación de sobrevuelos del FIR España Continental (vuelos con origen el aeropuerto de Marrakech-Menara -GMMX-, destino París-Orly -LFPO-, con una aeronave Boeing 737-800).

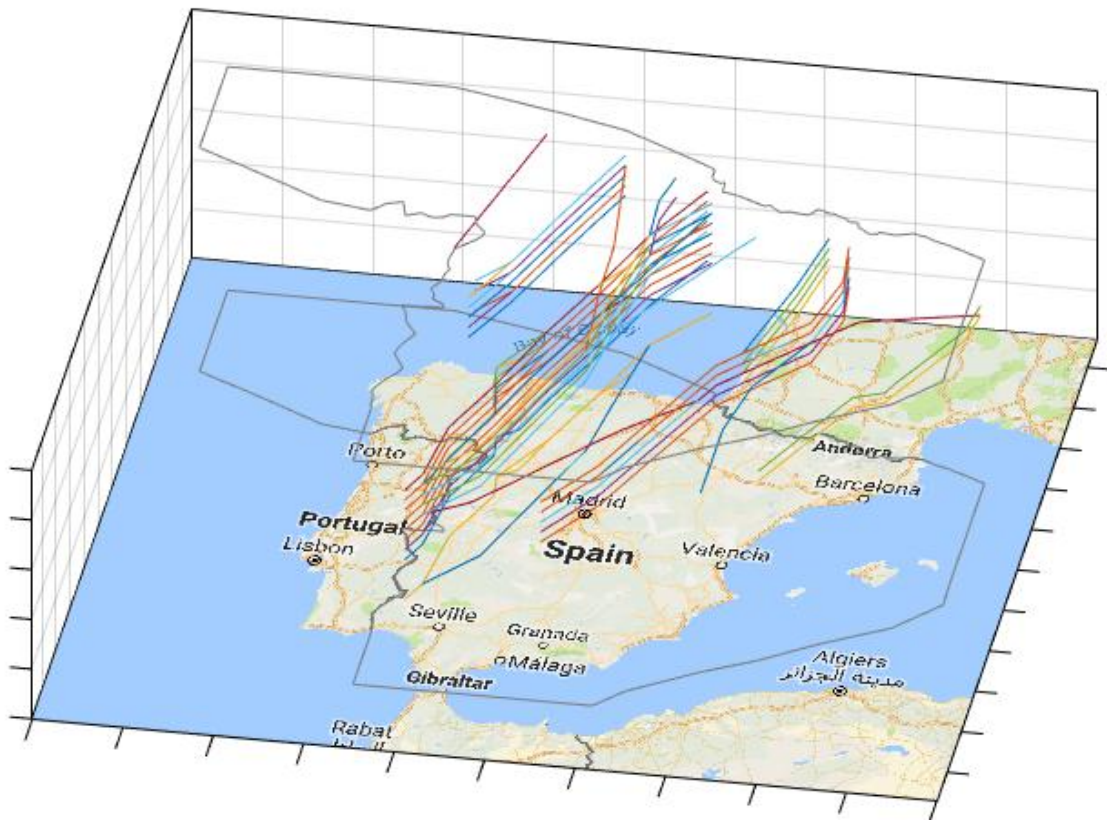


Figura 5-7 Representación de las trayectorias posibles para la combinación GMMX-LFPO-B738

### 5.2.3 Aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas sobre los escenarios de validación

La aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas consiste en crear  $n$  planificaciones alternativas (del tramo interno al FIR España Continental) a la planificación real para cada uno de los escenarios de validación. Esto se realiza tomando, aleatoriamente, para cada vuelo una trayectoria de entre todas las posibles obtenidas en el modelo *data-driven*. Cada una de estas planificaciones alternativas constituye un individuo solución de la población inicial ( $P_0$ ) que es necesario generar para comenzar la búsqueda de la planificación óptima, que se llevará a cabo en el módulo 2.

Para cada planificación alternativa de la población inicial, con el fin de obtener su aptitud, es necesario calcular el valor de cada una de las funciones objetivo a optimizar (Figura 5-8).

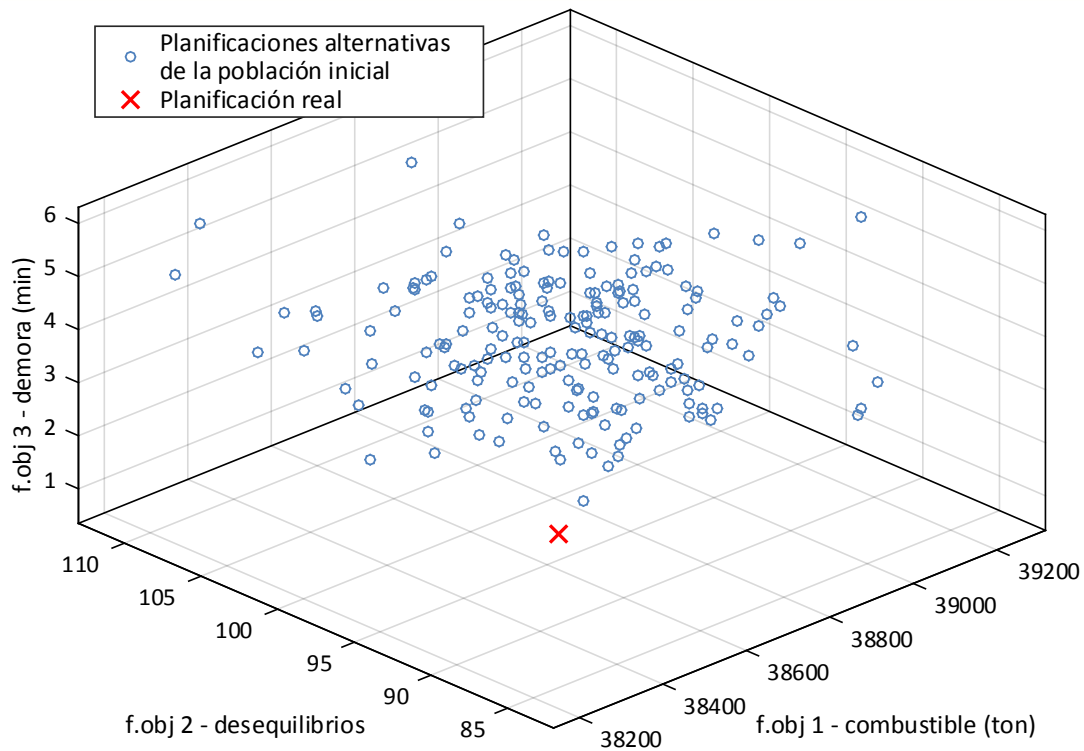


Figura 5-8 Valor de las funciones objetivos para cada individuo solución de la población inicial y de la planificación real (escenario i)

La primera función objetivo de cada planificación alternativa es la suma del consumo de combustibles, para todos los vuelos del escenario. En la Figura 5-9 se representa el histograma del porcentaje de planificaciones de la población inicial, en función del consumo de combustible total para un escenario determinado. También se representa el consumo de combustible de la planificación real de dicho escenario.

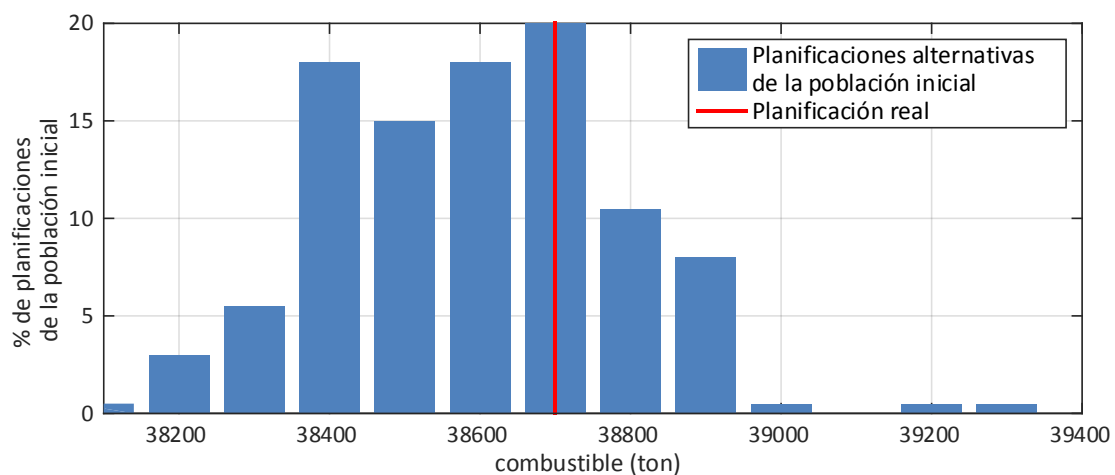


Figura 5-9 Histograma de la función objetivo consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial y de la planificación real (escenario i)

La segunda función objetivo es el recuento de desequilibrios, entendido como la suma de los excesos de demanda frente a la capacidad horaria en cada uno de los sectores operativos de determinado escenario de validación (este cálculo se detalló en la sección



3.2.5). La demanda horaria en cada sector, para cada una de las planificaciones alternativas, se calcula teniendo en cuenta la nueva trayectoria de cada vuelo. En la Figura 5-10 se representa el histograma del porcentaje de planificaciones de la población inicial, en función de los desequilibrios en un escenario particular.

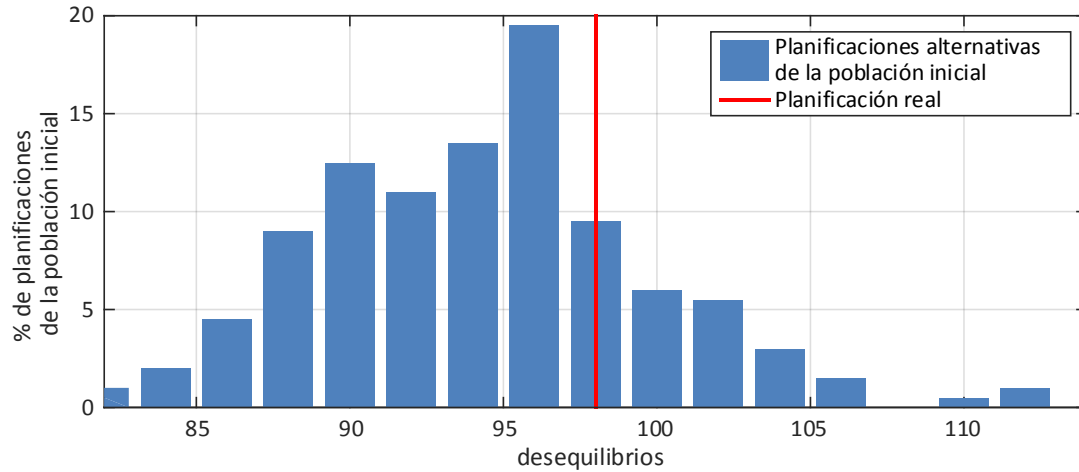


Figura 5-10 Histograma de la función objetivo desequilibrios de las planificaciones de la población inicial y de la planificación real

La tercera función objetivo de cada individuo solución es la demora media de arribada. Dicha demora viene dada por la diferencia entre el tiempo total de vuelo obtenido entre la planificación real y la alternativa. En la Figura 5-11 se representa el histograma del porcentaje de planificaciones de la población inicial, en función de las demoras generadas por las mismas para un escenario concreto.

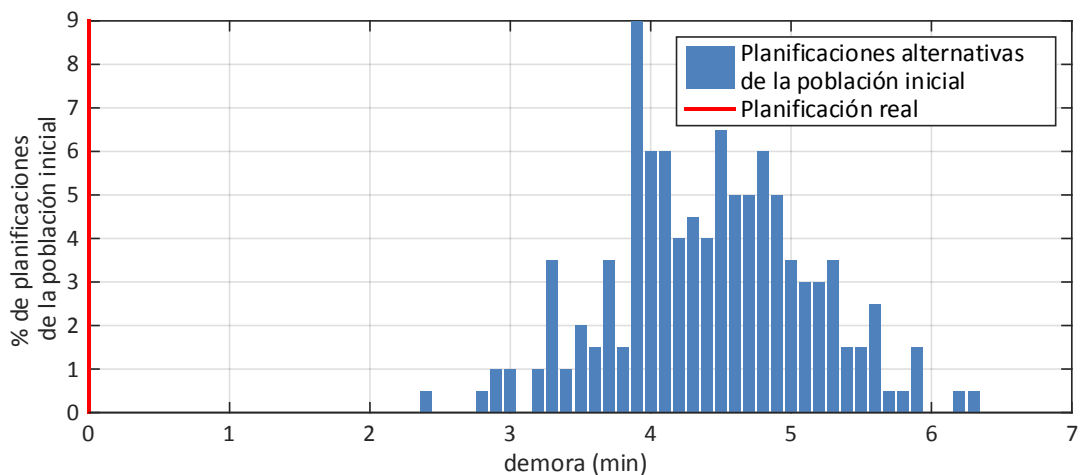


Figura 5-11 Histograma de la función objetivo demora de las planificaciones de la población inicial y de la planificación real

En esta sección se han representado las gráficas (Figura 5-8 a Figura 5-11) con los resultados de un escenario de validación, y así explicar la lógica detrás de las mismas. El Apéndice A muestra dichas gráficas para cada uno de los escenarios de validación mencionados en la sección 5.1.

## 5.3 Resultados de la aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima

Tras la obtención de una población inicial  $P_0$  de planificaciones alternativas y el cálculo del valor de las funciones objetivo de cada una de ellas, a continuación se comienza el proceso iterativo de optimización multiobjetivo para el que se utiliza el algoritmo NSGA-II (detallado en la sección 3.3.3).

En esta sección se recogen los resultados de la aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima (aún con conflictos). En particular, se muestran los resultados de: i) la restricción establecida sobre la función objetivo demora media de arribada; ii) la selección del número de individuos de la población inicial; y iii) la selección de la planificación óptima de compromiso en el frente de Pareto de la última iteración del algoritmo NSGA-II.

Por último se muestran los resultados tras la aplicación de dicho módulo sobre las planificaciones alternativas de la población inicial de un escenario de validación particular.

### 5.3.1 Restricción en la función objetivo de demora de arribada

Como ya se ha dicho, en el problema multiobjetivo que el presente estudio aborda, se consideran tres funciones objetivo: i) consumo total de combustible, ii) desequilibrios entre capacidad y demanda, y iii) demora media de arribada. En la Figura 5-12 se representan las funciones objetivo de cada individuo solución<sup>32</sup> de una población intermedia  $P_l$ , obtenida tras realizar  $l$  iteraciones del algoritmo NSGA-II. Como puede observarse dicha población se ha dividido en dos: aquellos individuos solución con una demora media inferior o igual a 5 minutos, y aquellos en que es superior a 5 minutos. Es decir, se aplica una restricción sobre los individuos de la población de soluciones, de forma que sólo se consideran válidos aquellos que tienen una demora media inferior o igual a 5 minutos.

Esta restricción está basada en el plan maestro de SESAR (ATM *Master Plan* [142]), donde se establece que más del 70 % de los vuelos llega a su destino dentro de una ventana temporal de 5 minutos.

La restricción de demora media inferior o igual a 5 minutos se tiene en cuenta a la hora de evaluar los individuos de determinada población después de la ejecución del algoritmo NSGA-II. En ningún caso se considera dicha restricción en la ejecución del algoritmo.

---

<sup>32</sup> Cada individuo solución corresponde a una planificación alternativa, de una población intermedia particular, obtenida en el desarrollo del algoritmo NSGA-II.

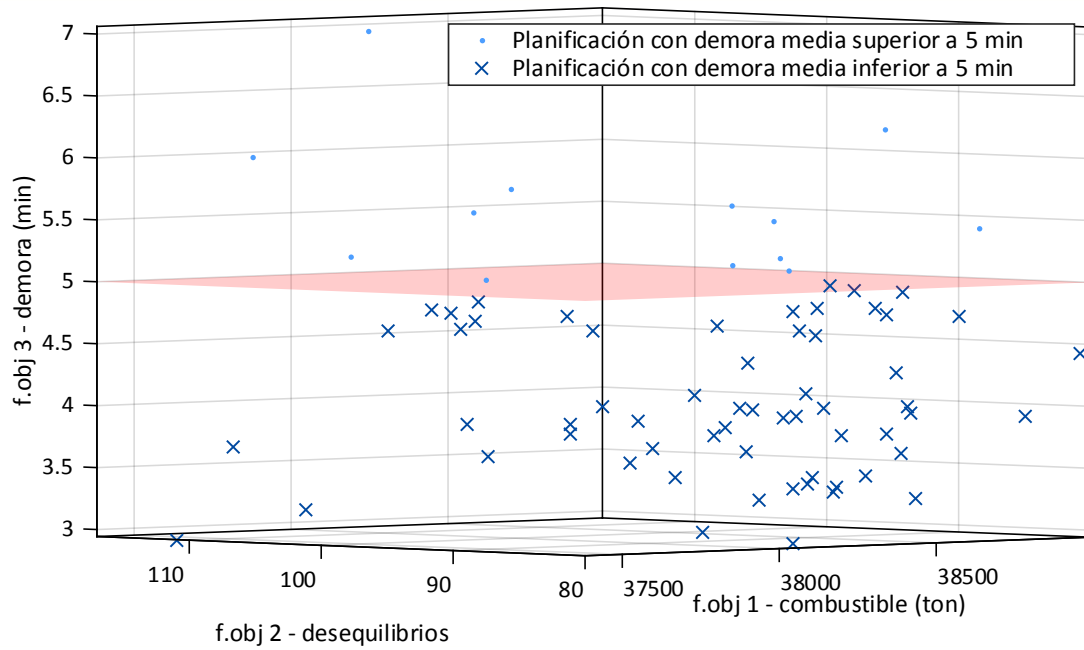


Figura 5-12 Valor de las funciones objetivo de cada individuo solución de determinada población  $P_l$ . Restricción en la función objetivo demora media de arribada

Tras seleccionar únicamente los individuos que tienen una demora media inferior o igual a 5 minutos, en la Figura 5-13 se muestra el consumo de combustible y los disequilibrios de cada individuo solución de determinada población  $P_l$ . El conjunto de individuos del frente de Pareto (aquellos con el mejor compromiso entre consumo de combustible y disequilibrios) están representados por la línea continua.

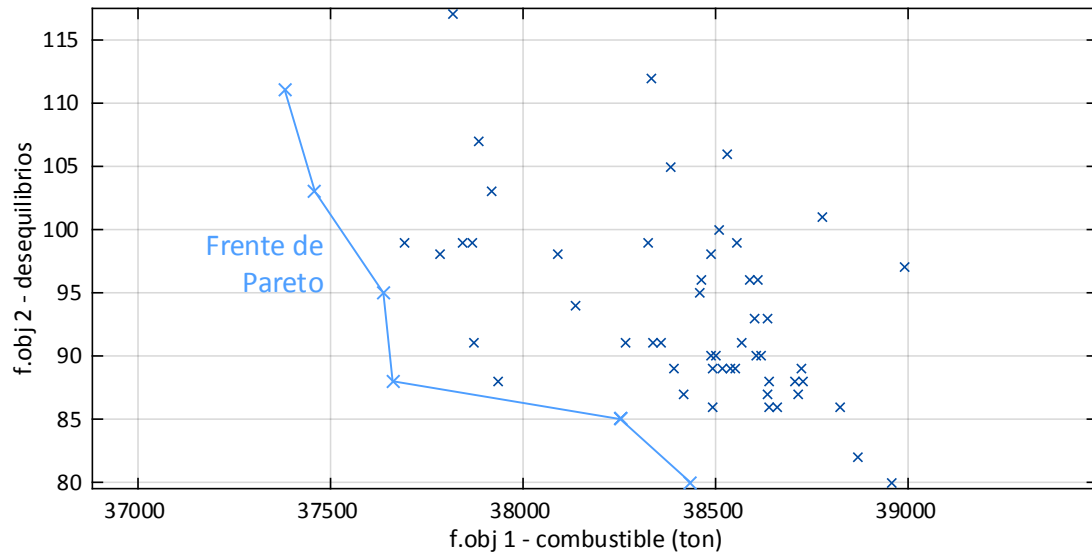


Figura 5-13 Consumo de combustible y disequilibrios de cada individuo solución de una determinada población  $P_l$ , tras seleccionar los individuos con una demora media inferior a 5 minutos

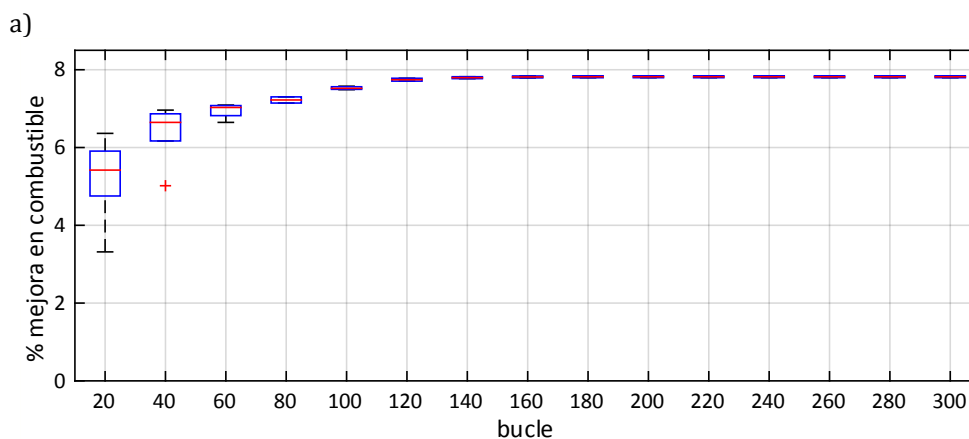
### 5.3.2 Selección del número de individuos de la población inicial

Como ya se comentó en la sección 3.3.3 el tamaño de la población es clave en toda resolución de un problema con Algoritmos Evolutivos. Por ello en este estudio se han realizado tres experimentos, con una población de 50, 100 y 200 individuos.

A continuación, se representan diagramas de cajas para cada experimento (Figura 5-14 a Figura 5-16), representando tanto la mejora<sup>33</sup> en términos de consumo de combustible como la mejora en términos de desequilibrios entre capacidad y demanda. Se usan diagramas de cajas porque en cada iteración se obtiene una población que no tiene un solo individuo óptimo, sino un conjunto de individuos (el frente de Pareto), con los mejores compromisos entre consumo de combustible y desequilibrios.

En el eje horizontal de cada gráfico aparece el número de iteraciones empleadas en el algoritmo NSGA-II. Como puede observarse, se han alcanzado hasta 300 iteraciones en el experimento con una población de 50 individuos, 150 para el experimento de 100 individuos y 75 para el de 200 individuos. El motivo es un tiempo de proceso igual para todos los experimentos. Es decir, se tarda lo mismo en procesar 300 iteraciones para una población de 50 individuos, 150 con una población de 100 individuos; o 75 con una población de 200 individuos.

En el eje vertical de cada gráfica se representa el porcentaje de mejora de cada población respecto a la planificación real, en términos de a) consumo de combustible; y b) desequilibrios entre capacidad y demanda.



<sup>33</sup> Esta mejora, tanto de combustible como del número de desequilibrios, se mide frente al correspondiente valor de la planificación real.

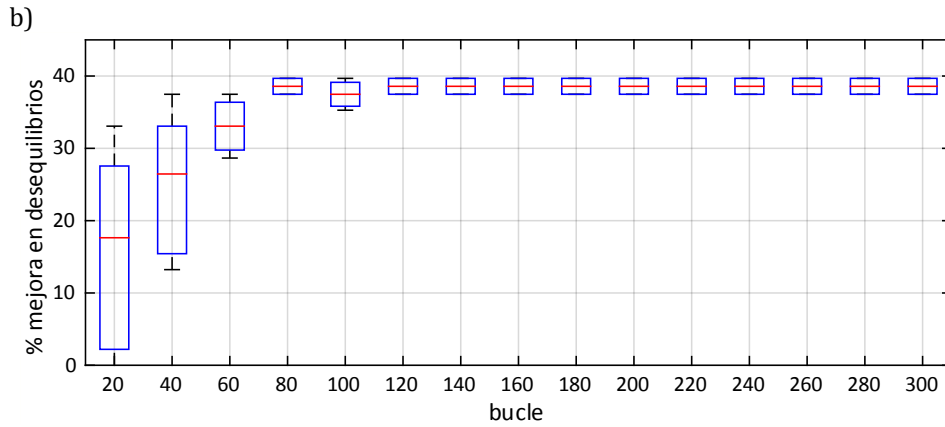


Figura 5-14 Porcentaje de mejora de los individuos del frente de Pareto en función de las iteraciones del algoritmo NSGA-II, con una población de 50 individuos; a) mejora en consumo de combustible; b) mejora en el número de desequilibrios

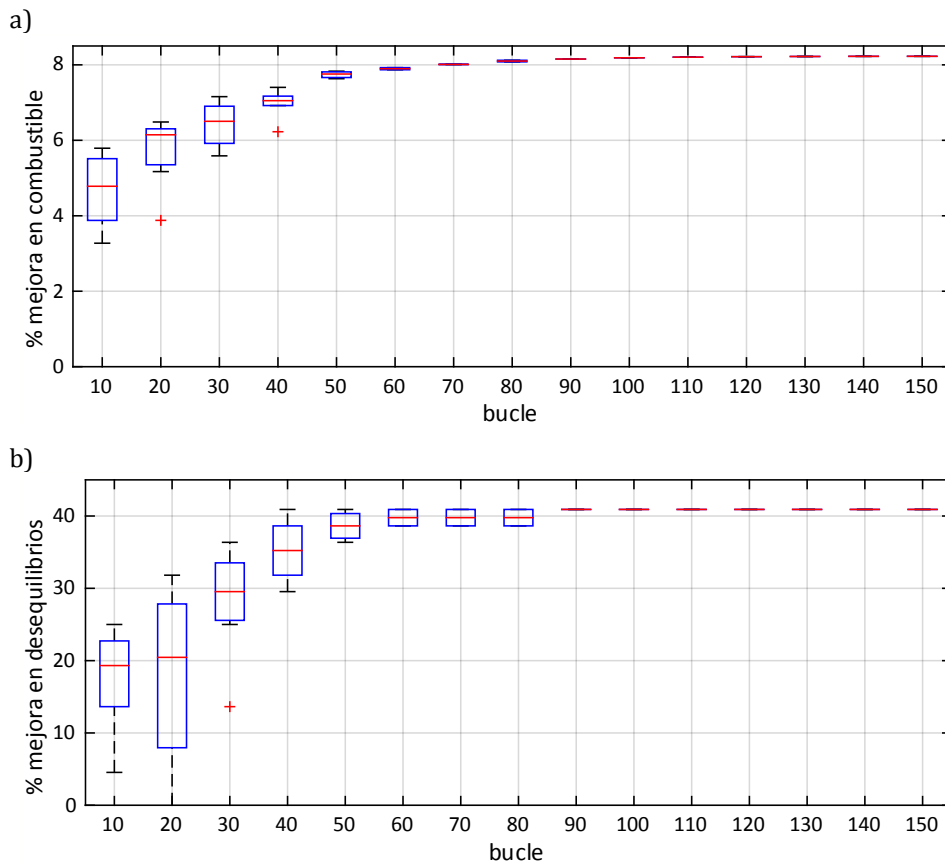


Figura 5-15 Porcentaje de mejora de los individuos del frente de Pareto en función de las iteraciones del algoritmo NSGA-II, con una población de 100 individuos; a) mejora en consumo de combustible; b) mejora en el número de desequilibrios

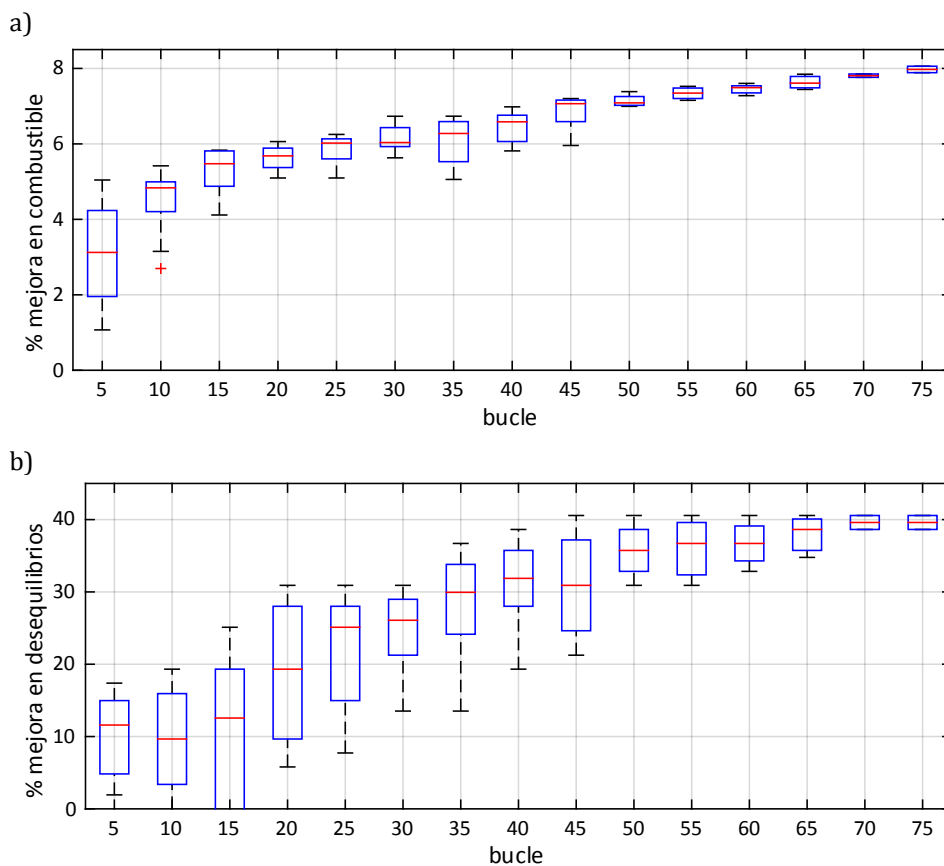


Figura 5-16 Porcentaje de mejora de los individuos del frente de Pareto en función de las iteraciones del algoritmo NSGA-II, con una población de 200 individuos; a) mejora en consumo de combustible; b) mejora en el número de desequilibrios

En las primeras iteraciones la variabilidad de la mejora, tanto en combustible como en número de desequilibrios, de los individuos del frente óptimo de Pareto es mucho mayor que en las últimas iteraciones. Esto es porque a medida que se realizan más iteraciones del algoritmo NSGA-II los individuos del frente de Pareto están más concentrados.

El punto de inflexión de la mejora (en el que la mejora al realizar nuevas iteraciones del algoritmo es apenas apreciable) se alcanza mucho antes cuanto menor sea el número de individuos de la población. Con una población de 50 individuos la mejora final obtenida en dicho experimento, tanto en combustible como de desequilibrios, se alcanza muy pronto; y a partir de dicho punto apenas se consiguen mejoras. Sin embargo, con una población de 200 individuos se consigue una mejora apreciable casi hasta el final del experimento.

El experimento realizado con una población de 100 individuos es el que obtiene los mejores resultados. En cuanto al número de iteraciones, para la población de 100 individuos se puede observar como con 120 iteraciones prácticamente se alcanza la mejora total obtenida al final del experimento. Esta mejora supone un 8% menos de consumo de combustible y un 40% menos de desequilibrios entre capacidad y demanda.

### 5.3.3 Cálculo de la planificación óptima de compromiso del frente de Pareto

Al aplicar el algoritmo NSGA-II sobre las planificaciones alternativas de la población inicial de un escenario de validación particular, en cada iteración se obtienen nuevas planificaciones, las cuales presentan mejores resultados en las métricas indicadas respecto a la planificación real. En la Figura 5-17 se representan los frentes de Pareto en función de la iteración del algoritmo NSGA-II en que se alcanza<sup>34</sup>. Como ya se comentó el frente de Pareto de cada iteración recoge las planificaciones con los mejores compromisos entre consumo de combustible y desequilibrios.

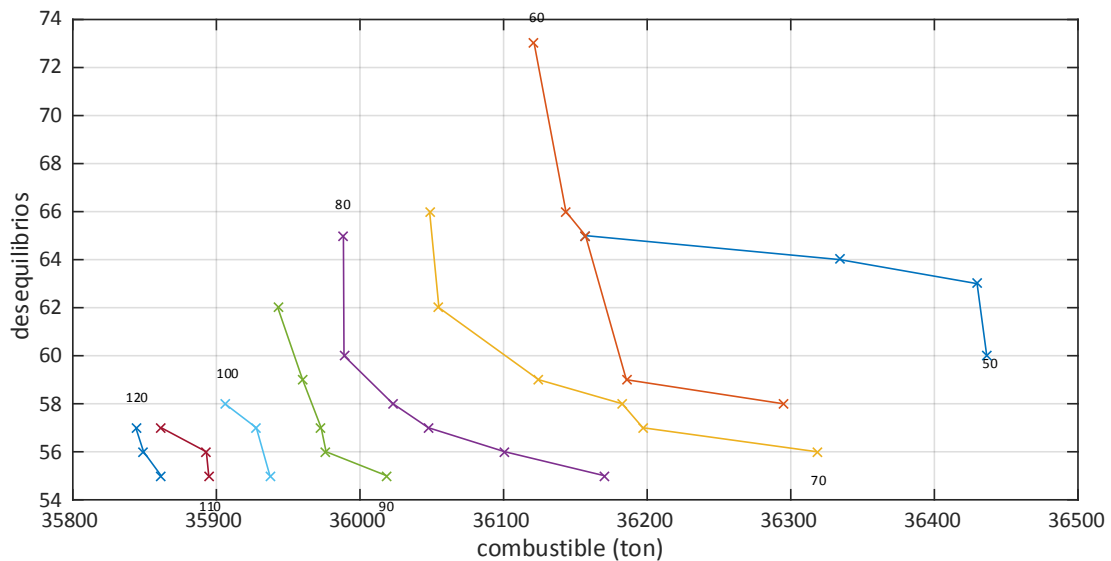


Figura 5-17 Frentes de Pareto en función de la iteración del algoritmo NSGA-II (escenario i)

En la sección anterior se comprobó que con una población de 100 individuos, al realizar 120 iteraciones se conseguía el punto de inflexión de la mejora, por lo que para la aplicación del algoritmo NSGA-II a todos los escenarios de validación se han utilizado 120 iteraciones como criterio de convergencia del algoritmo.

En la Figura 5-18 se representa el frente de Pareto, tras realizar 120 iteraciones del algoritmo NSGA-II, obteniendo las planificaciones con los mejores compromisos en términos de combustible y desequilibrios. Para poder seleccionar una única solución a la que se denomina “óptimo de compromiso”, será necesario convertir cada compromiso a una única unidad. Se ha considerado la monetización de ambos objetivos como una forma adecuada de conseguirlo.

<sup>34</sup> Cada línea corresponde al frente de Pareto obtenido tras  $n$  iteraciones del algoritmo NSGA II, junto a cada línea se indica el número de la iteración a la que pertenece dicho frente.

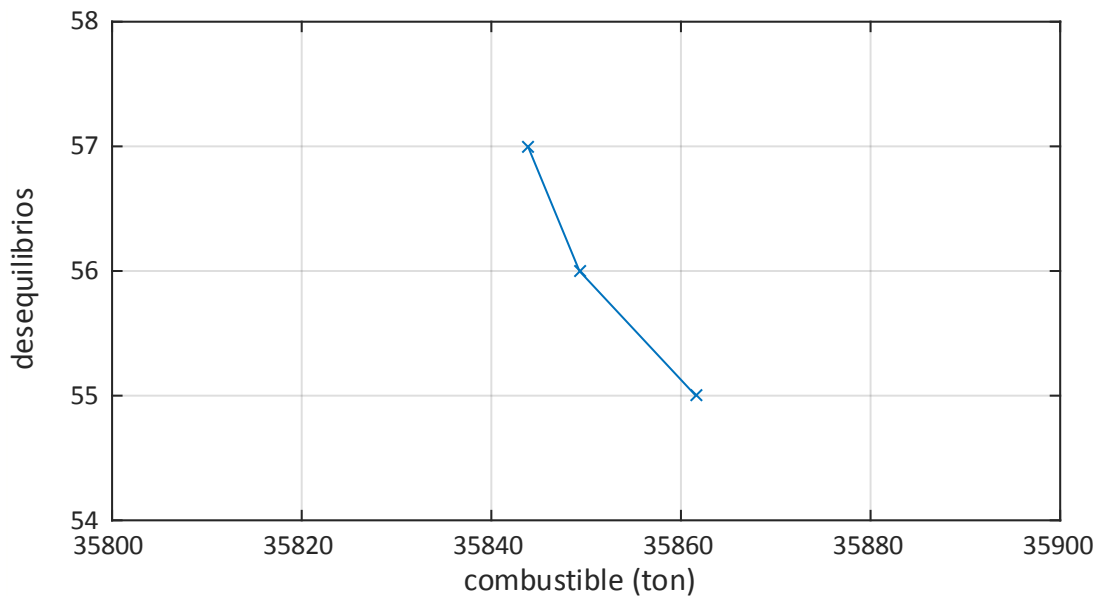


Figura 5-18 Frente de Pareto de la última iteración. Selección del óptimo de compromiso (escenario i)

Para monetizar el consumo de combustible se ha tomado el precio actual del combustible para aviación<sup>35</sup> (0,47 euros por kilogramo), mientras que para monetizar el número de desequilibrios se ha tenido en cuenta que:

- Se considera que cada desequilibrio supone una regulación en el aeropuerto de origen, para adaptar la demanda a la capacidad, con su correspondiente demora.
- La demora ATFCM media en ruta es de 16 minutos por vuelo regulado. Este dato se ha calculado utilizando los datos de regulaciones ATFCM dentro del FIR España Continental en un periodo de tres años, tomando únicamente las regulaciones en ruta y cuya causa de la regulación sean excesos de demanda frente a la capacidad operativa.
- En el estudio realizado por la universidad de Westminster [40], se determina que un minuto de demora ATFCM supone un coste de 81 euros.

Con esta información se establece la simplificación de que cada tonelada de combustible consumida tiene un coste de 470 euros, y que cada desequilibrio tiene un coste aproximado de 1300 euros. Por esto, en las soluciones de la Figura 5-18, se selecciona la solución de mínimo consumo de combustible como la solución óptima de compromiso.

<sup>35</sup> A fecha de publicación de este estudio (Abril 2017) era de 1,45 euros por galón, o lo que es lo mismo 0,47 euros por kilogramo de fuel Jet.



#### 5.3.4 Aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima sobre los escenarios de validación

Tras la obtención de la planificación óptima de determinado escenario de validación, en las siguientes figuras se representan el consumo de combustible (Figura 5-19), los desequilibrios (Figura 5-) y la demora media (Figura 5-20) de dicha planificación frente a la planificación real y las planificaciones alternativas generadas en la población inicial.

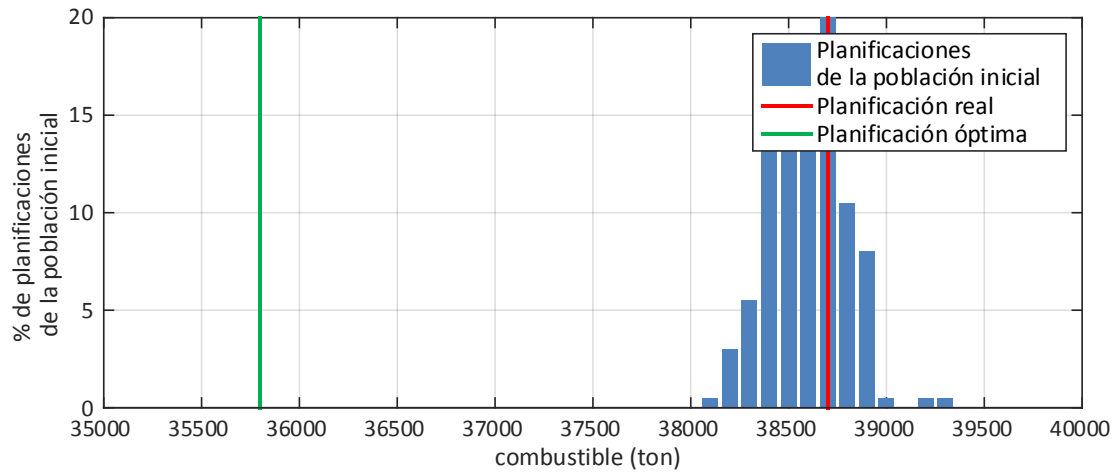


Figura 5-19 Histograma de consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario i)

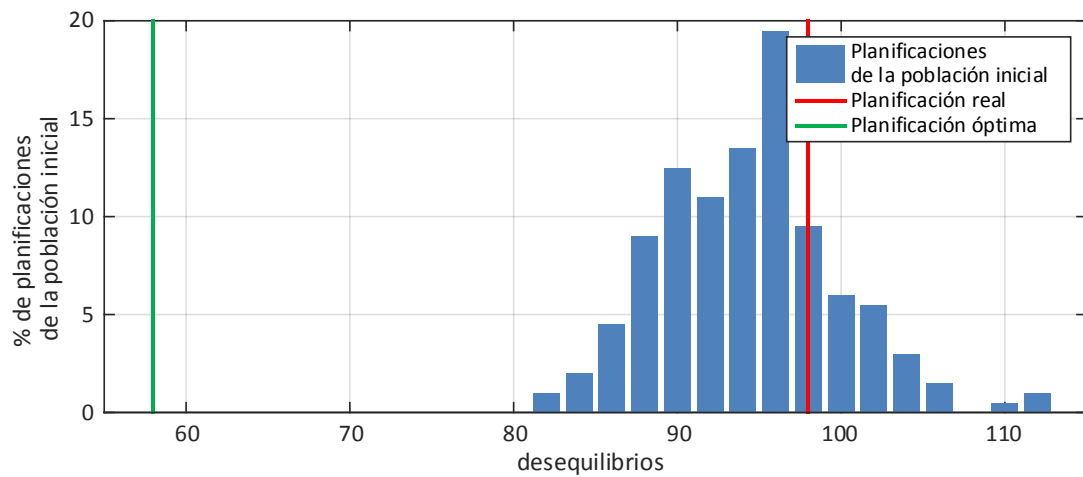


Figura 5- Histograma de desequilibrios de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario i)

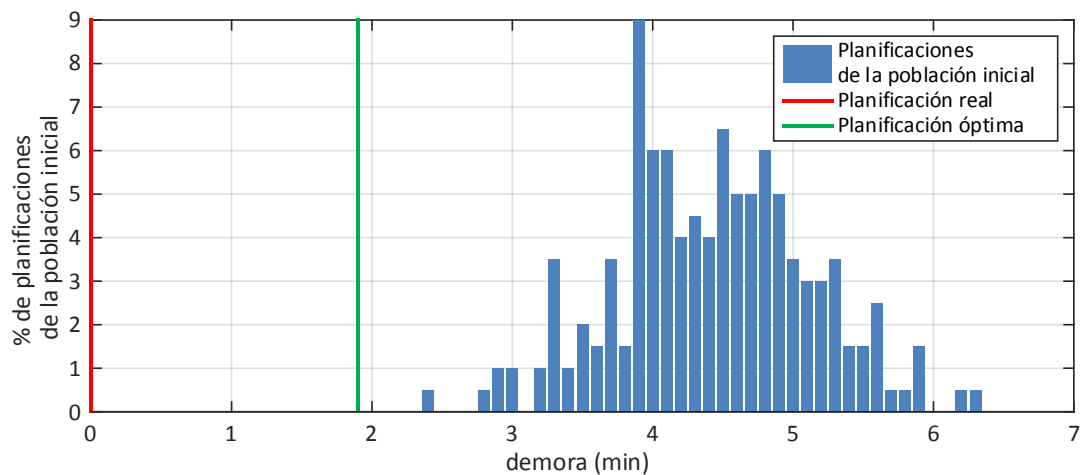


Figura 5-20 Histograma de demoras de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario i)

En esta sección se han representado las gráficas para un escenario particular, pudiendo encontrarse en el Apéndice A las gráficas para cada uno de los escenarios de validación previamente introducidos en la sección 5.1.

En la Tabla 5-3 se muestra el valor de cada una de las métricas definidas en la sección 5.1 para la planificación óptima alcanzada de cada uno de los escenarios de validación. También se recoge el incremento de cada métrica respecto al valor correspondiente de la planificación real.

Tabla 5-3 Métricas de las planificaciones óptimas (con conflictos) de cada uno de los escenarios de validación

día	Consumo de combustible (ton)		Número de desequilibrios		Demora (minutos)		Número de conflictos	
	plan óptimo	Incremento respecto plan real (%)	plan óptimo	Incremento respecto plan real (%)	plan óptimo	Incremento respecto plan real (%)	plan óptimo	Incremento respecto plan real (%)
1	22.208	-8,2%	26	-40,9%	2,61	100%	80	-36,5%
2	22.638	-6,0%	1	-91,7%	2,97	100%	93	-21,2%
3	33.628	-7,2%	75	-29,9%	2,36	100%	300	-3,5%
4	31.886	-6,8%	20	-58,3%	2,37	100%	240	-16,7%
5	32.260	-6,5%	42	-59,2%	2,76	100%	277	-10,1%
6	34.042	-6,9%	33	-52,9%	2,12	100%	263	-27,9%
7	35.844	-7,4%	57	-41,2%	1,89	100%	263	-13,8%
8	35.969	-5,5%	65	-46,3%	1,95	100%	328	-19,2%
9	31.113	-6,9%	42	-47,5%	3,16	100%	195	-24,4%
10	36.465	-5,1%	12	-74,5%	2,02	100%	292	-24,0%
11	24.992	-8,1%	15	-34,8%	2,12	100%	134	-21,6%
12	26.158	-7,8%	5	-79,2%	1,33	100%	142	-19,3%

Como puede observarse, para todos los escenarios se llega a una planificación que consigue reducir el consumo de combustible entre un 5% y un 8% (una media del 6,8%), y el número de desequilibrios entre un 30% y un 90% (una media del 50%).

La mejora en estos dos componentes se consigue a cambio de introducir una demora frente a la hora de arribada establecida en la planificación real dada por la compañía. La demora media de las planificaciones óptimas alcanzadas está entre 1,3 y 3 minutos.

A pesar de que el objetivo de la aplicación de este módulo no es la resolución de conflictos, puede observarse que la planificación resultante consigue reducir los conflictos respecto a la planificación real en todos los casos. Este beneficio está asociado a la mejora del número de desequilibrios entre capacidad y demanda, lo cual genera una mejor distribución de los flujos de tráfico y con ello esta reducción de los conflictos.

### 5.3.5 Planificación de mínimo consumo de combustible

En esta sección se analiza el beneficio de la definición conjunta de la trayectoria de vuelo óptima, por parte de la compañía aérea y el proveedor de servicios, en términos de consumo de combustible, balance entre capacidad y demanda y resolución de conflictos.

Con tal fin se obtiene, para cada uno de los escenarios de validación, la planificación de mínimo consumo de combustible. Esta planificación se consigue seleccionando para cada vuelo la trayectoria de mínimo consumo entre todas las posibles obtenidas en el modelo *data-driven*.

*Tabla 5-4 Métricas de las planificaciones de mínimo consumo de combustible de cada uno de los escenarios de validación*

día	Consumo de combustible (ton)		Número de desequilibrios		Demora (minutos)		Número de conflictos	
	plan óptimo	Incremento respecto plan real (%)	plan óptimo	Incremento respecto plan real (%)	plan óptimo	Incremento respecto plan real (%)	plan óptimo	Incremento respecto plan real (%)
1	19.342	-20,1%	45	2,3%	3,84	100%	114	-9,5%
2	19.959	-17,1%	11	-8,3%	7,06	100%	155	31,4%
3	29.422	-18,8%	107	0,0%	4,99	100%	368	18,3%
4	27.865	-18,6%	44	-8,3%	3,80	100%	297	3,1%
5	28.055	-18,7%	97	-5,8%	6,61	100%	313	1,6%
6	29.557	-19,1%	58	-17,1%	10,21	100%	396	8,5%
7	31.024	-19,8%	87	-10,3%	4,93	100%	348	14,1%
8	31.329	-17,7%	112	-7,4%	5,17	100%	379	-6,7%
9	27.029	-19,1%	69	-13,8%	7,03	100%	266	3,1%
10	31.919	-16,9%	37	-21,3%	4,75	100%	387	0,8%
11	21.719	-20,1%	25	8,7%	4,94	100%	193	12,9%
12	22.856	-19,4%	22	-8,3%	7,95	100%	181	2,8%

Como puede observarse en la Tabla 5-4 la planificación de mínimo consumo consigue reducir el combustible entre un 17% y un 20%, frente al 8% que se llegaba a alcanzar con la planificación óptima global. Sin embargo el beneficio global obtenido al realizar una planificación conjunta que tenga en cuenta, no solo el consumo de combustible, sino también la gestión de los flujos a través de la minimización de los desequilibrios entre capacidad y demanda y la reducción de los conflictos no se consigue con esta planificación.

Frente a la reducción media del 50% del número de desequilibrios y del 20% en el número de conflictos (obtenida incluso antes de aplicar el módulo de resolución de conflictos), con la planificación de mínimo consumo no se consiguen tales beneficios, llegando incluso a empeorar en varios escenarios. Además la demora media de estas planificaciones se ve aumentada frente a la planificación óptima global hasta 8 minutos en algún escenario.

### 5.3.6 Distribución de la demanda

Los gráficos representados en esta sección muestran la mejora obtenida, en términos del balance entre la capacidad y demanda, al aplicar el módulo de búsqueda de la planificación óptima. Para ello se muestra, tanto para la planificación real (Figura 5-21) como para la planificación óptima obtenida (Figura 5-22), una representación de los sectores operativos en función de la carga<sup>36</sup> de los mismos.

En ambas figuras, cada diagrama circular corresponde a un sector operativo del escenario de validación. Estos diagramas tienen el siguiente significado:

- Están posicionados según el centro geográfico del sector al que representan.
- Su tamaño es proporcional al promedio de la carga de dicho sector durante el día del correspondiente escenario.
- Los elementos de cada diagrama corresponden a: i) el porcentaje de periodos horarios en el que la carga del sector es inferior al 70%, en verde; ii) el porcentaje de periodos horarios en el que la carga del sector está entre el 70% y el 100%, en amarillo; y por último iii) el porcentaje de periodos horarios en los que el sector tiene una carga por encima del 100%, es decir, presenta desequilibrios (en color rojo).

Como puede observarse, en la planificación óptima se consigue reducir el número de periodos en los que algunos sectores presentan desequilibrios, que como es una de las funciones objetivo que se logra optimizar al aplicar el algoritmo NSGA-II. También se consigue reducir el número de periodos en los que determinados sectores están por encima del 70% de su capacidad, lo cual se consigue gracias a una mejor distribución de los flujos de tráfico y el aumento de la carga de los sectores infrautilizados.

---

<sup>36</sup> La carga del sector se calcula como la demanda respecto a la capacidad horaria.

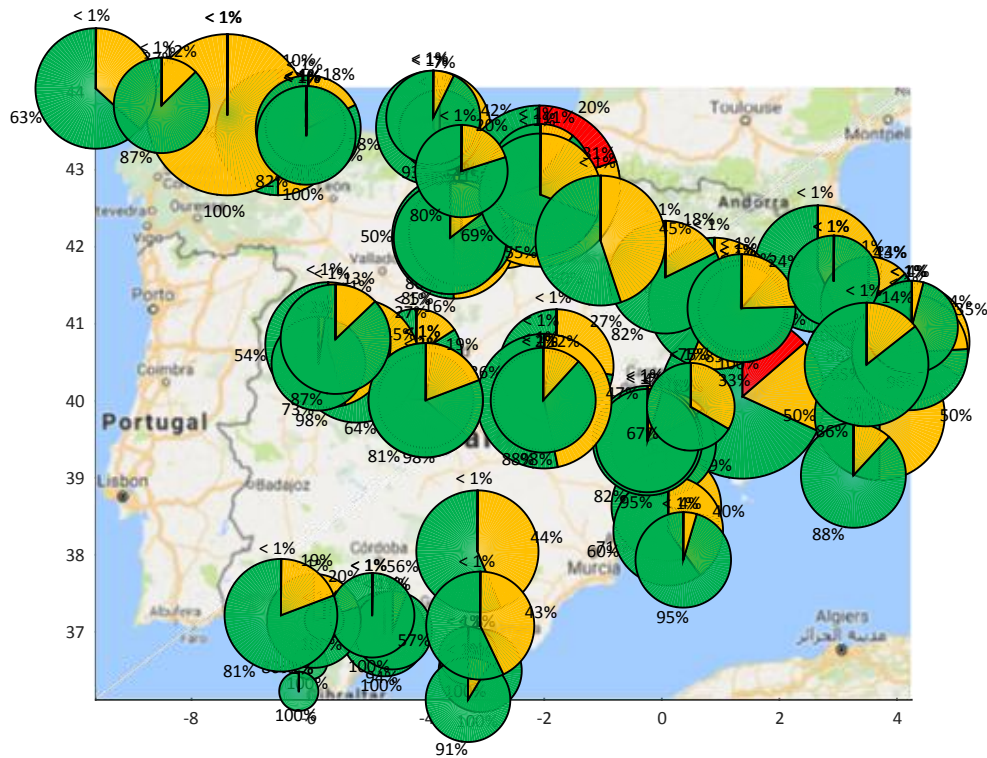


Figura 5-21 Desequilibrios de planificación real (escenario i)

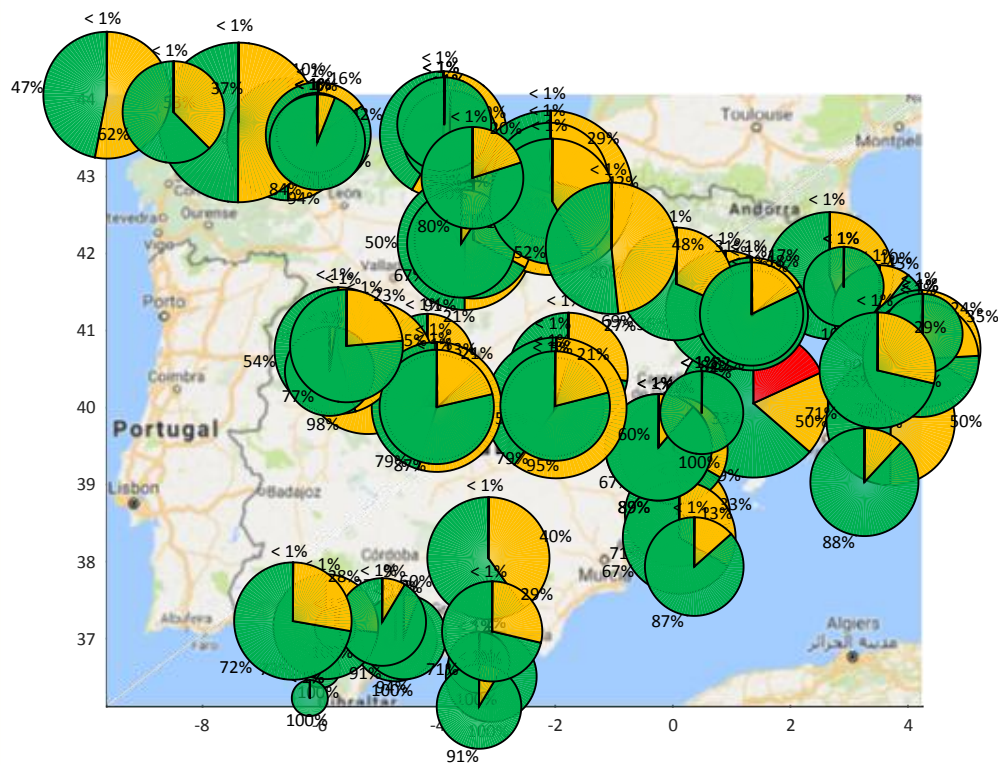


Figura 5-22 Desequilibrios de planificación óptima (escenario i)

## 5.4 Resultados de la aplicación del módulo de resolución de conflictos

En esta sección se recogen los resultados de la aplicación del módulo de resolución de conflictos. En particular, se muestran los resultados de: i) los conflictos detectados en la muestra de datos históricos utilizados para el desarrollo del modelo; ii) el desglose de las maniobras de resolución de conflictos aplicadas, y que se han calculado aplicando la metodología definida en la sección 4.2.3 y; iii) los valores del modelo *data-driven* de resolución de conflictos implementado.

### 5.4.1 Detección de conflictos a partir de datos históricos de planes de vuelo

Para llevar cabo la detección de conflictos de toda la muestra de datos históricos disponible, primero se genera la trayectoria 4D de cada vuelo mediante la extrapolación de los puntos del plan de vuelo cada 5 segundos, y después se utiliza el algoritmo de detección de conflictos por parejas. En la Tabla 5-5 se muestra el desglose de los conflictos en función de la fase de vuelo de cada aeronave involucrada en el mismo.

*Tabla 5-5 Desglose de conflictos por fase de vuelo*

	Aeronaves en la misma fase			Aeronaves en fase diferente		
	Ascenso	Crucero	Descenso	Ascenso - Crucero	Ascenso - Descenso	Crucero - Descenso
% Conflictos	1.2%	<b>64.3%</b>	19.8%	4.9%	1.4%	8.5%

El estudio se centra en el entorno de crucero, ya que casi dos tercios de los conflictos operacionales reales se produjeron cuando ambos aviones estaban en dicha fase. Al considerar sólo los conflictos en los que ambos aviones estaban en la fase de crucero, se detectó un promedio de 250 conflictos por día. Esto dio un total de 18.000 conflictos durante todo el periodo de muestra utilizado para realizar el modelo de resolución de conflictos *data-driven*.

### 5.4.2 Detección de las maniobras de resolución de conflictos aplicadas

Para identificar la resolución aplicada por los controladores a cada conflicto en el conjunto de datos disponible, en la sección 4.2.3 se definió un conjunto de criterios para evaluar la adherencia de la trayectoria real volada (traza radar) a la trayectoria planificada dada por el plan de vuelo. Estos criterios se utilizan para clasificar las maniobras de resolución de conflictos (temporales o verticales) realizadas por el controlador.

Los histogramas de la Figura 5-23 muestran el desglose de las desviaciones temporales y verticales de los conflictos analizados. Como se explicó, las acciones de resolución de conflictos horizontales no se incluyen en el modelo por su carácter táctico.



Por definición, cualquier conflicto que se quiera resolver con una desviación vertical de  $\pm 1.000$  pies no logrará resolver el conflicto. Por ello estas desviaciones (sombreadas en rojo en la Figura 5-23 b) no han sido consideradas al desarrollar el modelo de resolución de conflictos verticales. Sin embargo, no es fácil determinar la desviación temporal por debajo de la cual un conflicto no se resolverá temporalmente, ya que esto dependerá de la aeronave involucrada en el mismo. Así, a diferencia del modelo de resoluciones de conflictos verticales, todas las desviaciones temporales han sido consideradas al desarrollar el modelo de resolución de conflictos temporales. Sin embargo, como se indicó, si una determinada maniobra temporal no resuelve el conflicto al aplicar el modelo, esta no será considerada en la búsqueda de la resolución óptima.

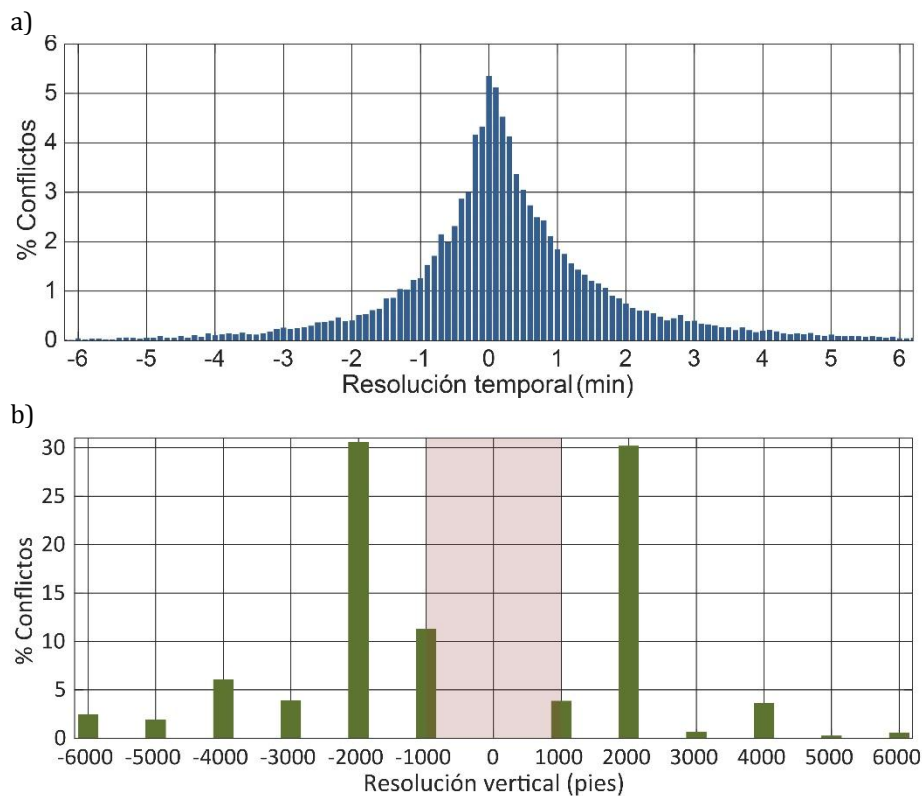


Figura 5-23 Histogramas. a) Desglose de las desviaciones temporales; b) Desglose de las desviaciones verticales

En la Figura 5-23 a), un valor negativo de resolución temporal significa que el vuelo pasa sobre el punto geométrico donde se detectó el conflicto (PGC) después de la hora estimada, mientras que un valor positivo significa que pasa sobre el punto antes de lo previsto. En la Figura 5-23 b), un valor negativo de resolución vertical significa que el vuelo pasa por debajo de lo planificado en el instante en que se detectó el conflicto (TC), mientras que un valor positivo significa que pasa por encima.

#### 5.4.3 Resultados de la creación del modelo

La Figura 5-24 muestra los histogramas de la desviación temporal como una función de la relación entre las trayectorias de las aeronaves involucradas en el conflicto. Las resoluciones temporales más comunes son aquellas con una pequeña desviación temporal.

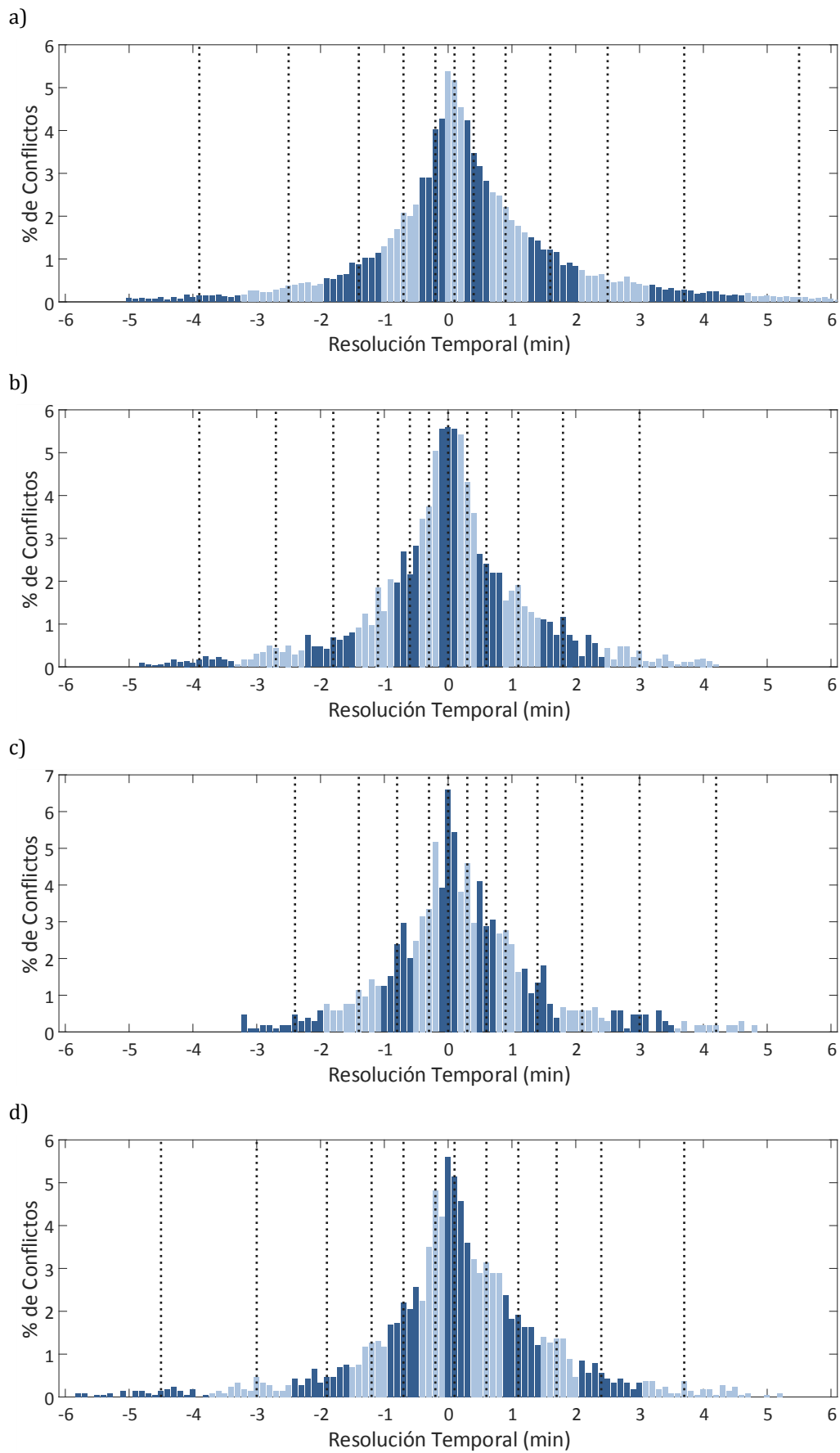


Figura 5-24 Desglose de las desviaciones temporales según aeronaves con a) misma derrota; b) derrota que se cruzan ( $45^\circ$  a  $90^\circ$ ); c) derrota que se cruzan ( $90^\circ$  a  $135^\circ$ ); d) derrota opuestas



Se aplica el algoritmo *k-means* a los histogramas, con el fin de detectar los *clusters*. Los centroides de cada *cluster* se indican en la Figura 5-24, los cuales reflejan las regiones de mayor densidad.

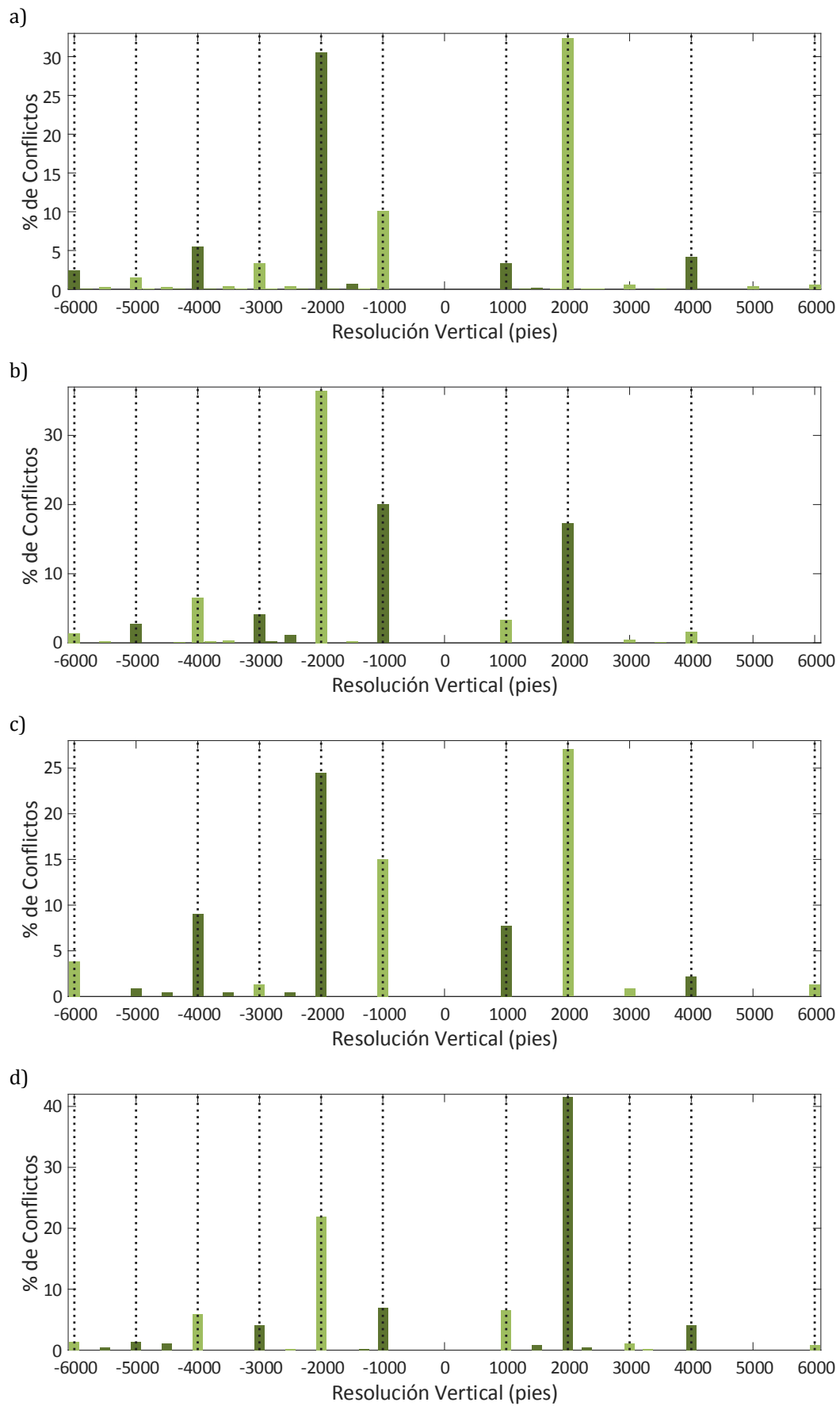
La Tabla 5-6 muestra el desglose de la desviación temporal dada para la resolución de conflictos en función de la derrota de las aeronaves involucradas en dichos conflictos. El modelo proporciona un número discreto de resoluciones temporales con la probabilidad de que estas se produzcan, en base al comportamiento real del controlador<sup>37</sup>. El número discreto de resoluciones temporales es igual al número de centroides.

*Tabla 5-6 Desglose de la desviación temporal para resolver los conflictos en función de la derrota entre las aeronaves involucradas*

Misma derrota		Derrotas que se cruzan (45°-90°)		Derrotas que se cruzan (90°-135°)		Derrotas opuestas	
minutos	probabilidad	minutos	probabilidad	minutos	probabilidad	minutos	probabilidad
-3,8	1,7%	-3,9	1,3%	-2,3	3,1%	-4,5	1,9%
-2,3	3,0%	-2,7	2,3%	-1,4	5,3%	-3,0	2,1%
-1,4	4,8%	-1,8	3,3%	-0,8	7,3%	-1,9	3,2%
-0,7	7,7%	-1,1	5,6%	-0,3	10,1%	-1,2	4,6%
-0,2	10,1%	-0,6	6,4%	0,0	11,4%	-0,7	7,4%
0,1	10,8%	-0,3	8,2%	0,3	8,2%	-0,2	10,7%
0,4	9,8%	0,0	11,2%	0,6	7,2%	0,1	11,1%
0,9	7,8%	0,3	8,9%	0,9	6,8%	0,4	9,3%
1,4	5,8%	0,6	6,3%	1,4	5,1%	0,9	9,8%
2,1	4,7%	1,1	6,0%	2,1	3,1%	1,6	6,6%
3,3	3,5%	1,8	4,8%	3,0	2,7%	2,3	3,5%
5,2	1,9%	3,0	2,6%	4,2	1,4%	3,7	2,6%

La Figura 5-25 muestra la desviación vertical como una función de la relación entre las trayectorias de las aeronaves involucradas en el conflicto.

<sup>37</sup> Cálculado como el porcentaje de veces que se dio dicha resolución sobre el total de resoluciones históricas de la muestra.



Aplicamos el algoritmo *k-means* a los histogramas y, una vez más, se muestran los centroides. El modelo de resolución de conflictos verticales (Tabla 5-7) proporciona un número discreto de resoluciones verticales y la probabilidad de que estas se produzcan (calculado como el porcentaje de veces que se dio dicha resolución sobre el total de resoluciones históricas de la muestra).

*Tabla 5-7 Desglose de la desviación vertical para resolver los conflictos en función de la derrota entre las aeronaves involucradas*

Misma derrota		Derrotas que se cruzan (45°-90°)		Derrotas que se cruzan (90°-135°)		Derrotas opuestas	
pies	probabilidad	pies	probabilidad	pies	probabilidad	pies	probabilidad
-10.000	0,3%	-11.000	0,4%	-7.000	0,7%	-7.000	0,2%
-7.000	0,5%	-9.000	0,5%	-6.000	1,1%	-6.000	0,4%
-6.000	0,8%	-7.000	0,4%	-4.000	3,0%	-5.000	0,8%
-5.000	0,4%	-6.000	0,5%	-3.000	0,5%	-4.000	1,6%
-4.000	1,6%	-5.000	1,0%	-2.000	6,8%	-3.000	1,1%
-3.000	1,0%	-4.000	2,4%	-1.000	4,2%	-2.000	6,0%
-2.000	8,9%	-3.000	1,8%	1.000	2,2%	-1.000	2,0%
-1.000	2,8%	-2.000	12,0%	2.000	7,8%	1.000	1,8%
1.000	0,9%	-1.000	6,7%	4.000	0,6%	2.000	11,7%
2.000	9,4%	1.000	1,1%	6.000	0,4%	3.000	0,4%
4.000	1,2%	2.000	5,8%	13.000	0,4%	4.000	1,1%
6.000	0,3%	4.000	0,6%	14.000	0,4%	6.000	0,2%

La Tabla 5-6 y la Tabla 5-7 constituyen el modelo de resolución de conflictos creado. Como puede observarse, este dará, en función de la derrota entre las aeronaves involucradas en el conflicto:

- el tipo y nivel de la desviación a aplicar; y
- la probabilidad de que se produzca cada tipo de desviación para resolver el conflicto.

Dicho modelo se aplicará sobre los conflictos detectados en las planificaciones óptimas (de cada escenario de validación) obtenidas tras la aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima (con conflictos).

Con esto se consigue tener un abanico de soluciones, que sin embargo será necesario examinar para identificar la solución óptima. Para ello, en primer lugar se utilizan los datos de: i) posibilidad de aplicación de la resolución; y ii) conflictos posibles de la nueva trayectoria resolución con otros vuelos del escenario, para filtrar las resoluciones entre la que buscaremos la solución óptima. Es decir, si la nueva trayectoria no es válida o presenta nuevos conflictos, no se considerará como una resolución potencialmente óptima.

## 5.5 Resultados de la aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima

La búsqueda de la resolución óptima se trata como un problema multiobjetivo, que tiene en cuenta por un lado la minimización del consumo de combustible, y por otro, la maximización de la probabilidad de que la maniobra de resolución sea aplicada por los controladores.

En esta sección se recogen los resultados de la aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima de conflictos.

### 5.5.1 Aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima sobre los escenarios de validación

El primer paso para abordar el problema multiobjetivo de búsqueda de las resoluciones óptimas de conflictos, es aplicar el método de las restricciones  $\varepsilon$  para detectar las resoluciones del frente de Pareto<sup>38</sup> para cada conflicto particular.

El siguiente paso es poblar una serie de resoluciones óptimas a lo largo del frente de Pareto de cada conflicto, para encontrar aquellas resoluciones óptimas globales para todos los conflictos. Como se menciona en la sección 4.3.2, hay resoluciones intermedias entre aquellas que satisfacen la exigencia de mínimo consumo de combustible y de máxima probabilidad de aplicación. Se utilizan las pendientes de los frentes de Pareto,  $\tan \alpha$ , para poblar las soluciones intermedias.

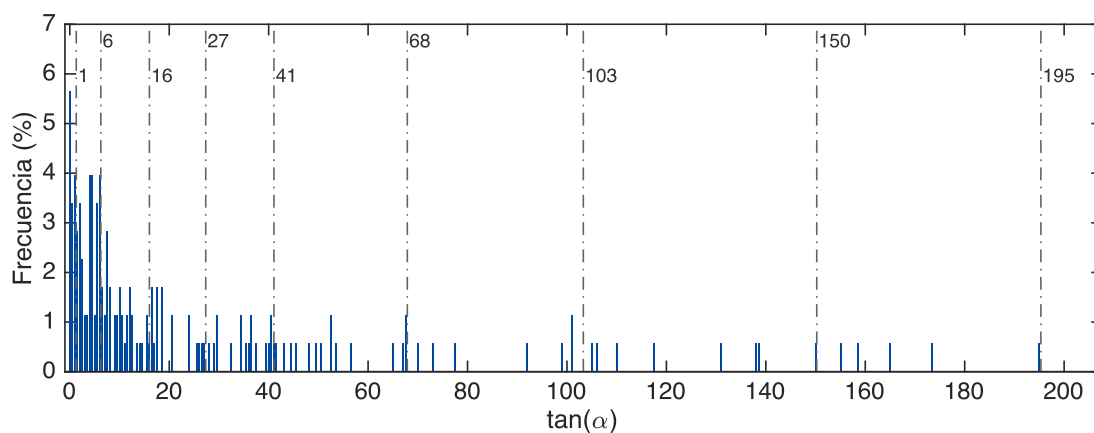


Figura 5-26 Histograma con las pendientes de los frentes de Pareto de todos los conflictos del escenario  $i$

<sup>38</sup> El frente de Pareto está formado por aquellas resoluciones, de cada conflicto particular, con los mejores compromisos entre consumo de combustible y probabilidad de que la maniobra sea aplicada por los controladores.

La Figura 5-26 muestra el histograma con las pendientes de los frentes de Pareto para todos los conflictos de un determinado escenario de validación. Esto permite elegir los valores de  $\tan \alpha$  utilizados este día para poblar una serie de soluciones intermedias a lo largo de los frentes de Pareto de todos los conflictos. Al aplicar el algoritmo *k-means* al histograma, los centroides detectados se utilizan como los valores de  $\tan \alpha$  para poblar las soluciones intermedias.

A continuación, se seleccionan para todos los conflictos de un escenario: i) las resoluciones de mínimo consumo de combustible; ii) las resoluciones de máxima probabilidad de aplicación y iii) las resoluciones intermedias obtenidas con los valores de  $\tan \alpha$ . La bondad de los resultados después de aplicar cada criterio se representa en la Figura 5-27 y en la Figura 5-28.

Así, la Figura 5-27 muestra el combustible adicional consumido, frente al consumo de combustible de la planificación con conflictos, después de aplicar los criterios antes mencionados para resolver los conflictos.

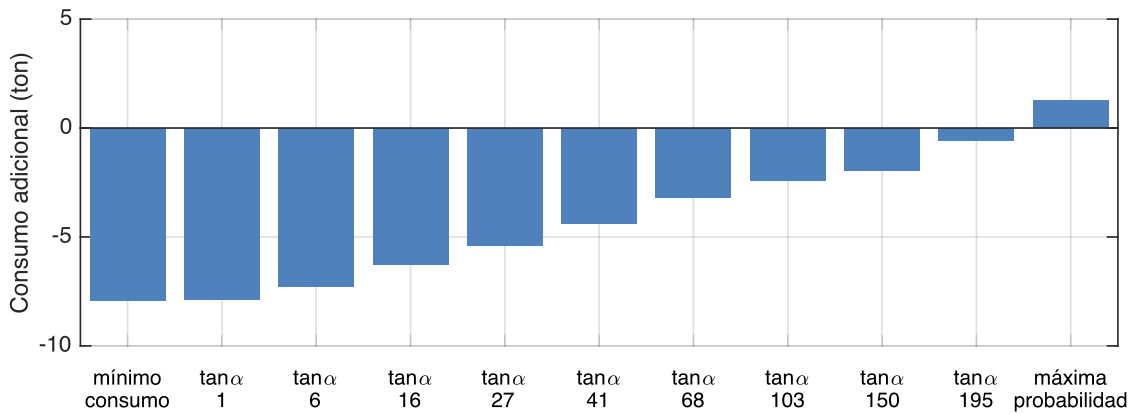


Figura 5-27 Combustible adicional del escenario i para cada criterio de resolución de conflictos

La Figura 5-28 muestra la adherencia a la planificación de partida con conflictos, después de aplicar los criterios antes mencionados para la resolución de los mismos.

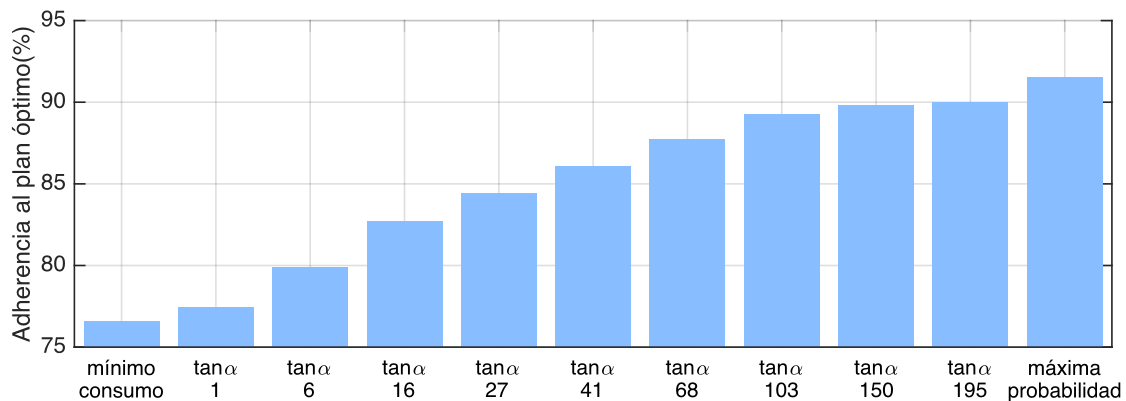


Figura 5-28 Adherencia al plan óptimo del escenario i para cada criterio de resolución de conflictos

La adherencia al plan se ha calculado normalizando los valores del modelo *data-driven* de resolución de conflictos representados en la Tabla 5-6 y en la Tabla 5-7. Para ello se considera que las máximas desviaciones, tanto verticales como temporales, suponen un 0% de adherencia al plan, mientras que si no hubiera desviación sería un 100 % de adherencia al plan, pero en dicho caso no se resolvería el conflicto.

Como puede observarse, cuanto mayor es la probabilidad de que los conflictos se resuelvan siguiendo las maniobras utilizadas por los controladores, se tiene una mayor adherencia al plan.

Los controladores de tráfico aéreo están particularmente preocupados por la resolución de conflictos de forma panorámica y trabajan para crear flujos de tráfico que estén libres de conflictos durante largos periodos. Esto se debe a que siempre tienen varios aviones y múltiples potenciales conflictos bajo su supervisión, por lo que la gestión de su propia carga de trabajo tiene una alta prioridad para ellos. Por tanto puede plantearse la hipótesis de que los controladores implementarán resoluciones de conflictos con bastante antelación y que mantendrán flujos ordenados de tráfico aéreo.

A la hora de seleccionar el mejor criterio<sup>39</sup> para resolver los conflictos, hay que considerar que:

- El criterio de mínimo consumo de combustible supone un ahorro de combustible, intrínseco a la propia selección del criterio. Cuantitativamente supone un ahorro del 0.05% del consumo de combustible total de cada escenario de validación.
- Sin embargo, el beneficio que supone el criterio de máxima probabilidad de aplicación de la resolución es una mayor adherencia al plan. Este beneficio lleva asociado un aumento de la predictibilidad, que a pesar de no ser directamente cuantificable, es sumamente importante para poder cumplir la planificación óptima y sin conflictos que finalmente se consigue tras la aplicación completa de la metodología desarrollada en este estudio.

Por ello, dada la pequeña mejora que supone seleccionar la resolución de conflictos de mínimo consumo de combustible, se considera que la mejor opción es resolver los conflictos maximizando la probabilidad de que dicha resolución sea aplicada por los controladores. Además con dicha resolución se consigue incrementar la predictibilidad y flujos de tráfico más ordenados, lo que a pesar de no ser cuantificable es inherente a la competencia de los controladores a la hora de resolver conflictos en fase táctica.

En esta sección se han representado las gráficas con los resultados de un escenario de validación, y así explicar la lógica detrás de las mismas. El Apéndice A muestra dichas gráficas para cada uno de los escenarios de validación mencionados en la sección 5.1.

---

<sup>39</sup> Estos criterios pueden ser de: i) mínimo consumo de combustible, ii) máxima probabilidad de aplicación de la resolución por el controlador; o iii) intermedio entre los dos anteriores y dado por los valores de  $\tan \alpha$ .

## Capítulo 6. CONCLUSIONES

---

En este estudio se proporciona una metodología para obtener la planificación óptima global y sin conflictos de un conjunto de vuelos, en fase estratégica.

Esta metodología se divide en cuatro procesos. En el primer proceso se obtienen todas las trayectorias posibles para cada vuelo del conjunto a planificar, a través de un modelo *data-driven*. A continuación, se identifica la planificación óptima para el conjunto de vuelos, aún sin resolver los conflictos, usando algoritmos evolutivos multiobjetivo. Posteriormente, se desarrolla un modelo, también *data-driven*, de resolución de conflictos basado en la operativa de los controladores, que se aplica al conjunto de conflictos detectados en la planificación óptima previamente obtenida, obteniendo un abanico de resoluciones posibles. Finalmente se busca la resolución óptima global de los conflictos, en un proceso de optimización multiobjetivo.

Para la construcción de los modelos *data-driven* se ha contado con tres años de datos operacionales. Para el desarrollo del primer modelo, de búsqueda de las trayectorias posibles, se ha utilizado la información del plan de vuelo (de más de cuatro millones y medio de vuelos) que generan las compañías aéreas, y que presenta la intención de estas para minimizar sus costes operativos directos. Para el desarrollo del segundo modelo, de resolución de conflictos, se ha utilizado información de las acciones de resolución de conflictos, en la fase táctica (de más de trescientos mil vuelos), tomadas por los controladores de tráfico aéreo.

Los dos modelos *data-driven* permiten incorporar por un lado la intención de las compañías aéreas a la hora de planificar los vuelos (en el modelo de generación de planificaciones alternativas); y por otro la experiencia ATC (en el modelo de resolución de conflictos), evitando la necesidad de algoritmos específicos de resolución de conflictos e incorporando resoluciones prácticas que pueden ser distintas de las determinadas por un modelo basado en reglas. Un beneficio de este enfoque es que los modelos *data-driven* son capaces de incorporar los nuevos criterios tanto de negocio de las compañías como operativos, simplemente recalculando con los datos más recientes, debido a que están intrínsecamente contenidos dentro de los datos operativos utilizados para generar o actualizar los modelos.

El uso de una metodología común de planificación de vuelos (tanto desde el punto de vista de las compañías aéreas como del proveedor de servicios) que tenga en cuenta no

sólo los factores que afectan al coste de cada vuelo individual sino el tráfico real (y por tanto la influencia de unas trayectorias en otras) se considera, como hipótesis de partida, beneficiaría al sistema ATM, al tratar a este desde un punto de vista holístico.

En el estudio se consigue equilibrar las necesidades, a veces contrapuestas, de los diferentes actores del sistema ATM. En particular, se proporciona una gestión de flujos más eficiente en beneficio del gestor de tráfico aéreo, disminuyendo los desequilibrios entre capacidad y demanda y eliminando los conflictos durante la fase estratégica. Este beneficio tiene un impacto positivo en términos de puntualidad, predictibilidad y seguridad. También se tiene en cuenta la perspectiva de la aerolínea en consideración, a través del ahorro de combustible, beneficiando así la eficiencia del vuelo.

Como se ha descrito en la sección de resultados, se consigue una reducción media del 50% en el número de desequilibrios de demanda frente a la capacidad disponible, comparando con el plan de vuelo inicial. Además, al aplicar el modelo de resolución de conflictos en fase estratégica, se logra una reducción superior al 99% de los conflictos en comparación con el plan de vuelo inicial. En los sectores de ruta del FIR España Continental, algunos estudios de carga de trabajo basados en operativa real muestran que del 15% al 30% de las acciones de control se deben a la resolución de conflictos. Por lo tanto, es una hipótesis plausible el considerar que mediante el uso de un plan en el que los conflictos prácticamente se eliminan es esperable un aumento efectivo de la capacidad. En otras palabras, habrá menos acciones de resolución táctica y un aumento de actividades menos intensas como es la monitorización.

El ahorro de combustible también se ha mostrado en la sección de resultados, con una planificación óptima que puede llegar a ahorrar del orden de un 6,8% de combustible, frente al plan de vuelo inicial. Considerando que el consumo medio por vuelo en Europa [142] es de 4,800 kg de combustible, esto supondría un ahorro de 320 kg de combustible por vuelo.

Como también se mostró en el capítulo de resultados, la mejora en términos de desequilibrios, conflictos y consumo de combustible, se consigue a cambio de introducir una demora en la hora de aterrizaje, frente a la hora establecida en la planificación inicial dada por la compañía. La demora media introducida por las planificaciones óptimas está entre 1,3 y 3 minutos.

La incorporación de criterios multiobjetivo en la fase de planificación es un paso importante en la implementación de las operaciones basadas en trayectorias (TBO) dentro de un escenario RBT/SBT, puesto que el proceso de toma de decisiones colaborativa es clave para el desarrollo de las trayectorias de negocio. En esta tesis se han mostrado los beneficios de la definición conjunta de la trayectoria de vuelo óptima, por parte de los usuarios del espacio aéreo y los proveedores de servicio a través de un proceso de colaboración, tanto en términos de consumo de combustible, balance entre capacidad y demanda y resolución de conflictos.



# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Abdelkhalik, O. & Gad, A., 2012. Dynamic-Size Multiple Populations Genetic Algorithm for Multigravity-Assist Trajectory Optimization. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 35, No. 2, pp. 520-529.
- [2] Abidom M. A. & Elazouni, A. M., 2011. Multiobjective Evolutionary Finance-Based Scheduling: Entire Projects' Portfolio. *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 25, No. 1, pp. 85-97.
- [3] Abubaker, A., Baharum, A. & Alrefaei, M., 2015. Automatic Clustering Using Multi-Objective Particle Swarm and Simulated Annealing. *Plos One*, Vol. 10, No. 7.
- [4] Adham, A. M., Mohd-Ghazali, N. & Ahmad, R., 2015. Performance optimization of a microchannel heat sink using the Improved Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA2). *Journal of Engineering Thermophysics*, Vol. 24, No. 1, pp. 86-100.
- [5] Agrawal, N., Rangaiah, G. P., Ray, A. K. & Gupta, S. K., 2006. Multi-Objective Optimization of the Operation of an Industrial Low-Density Polyethylene Tubular Reactor Using Genetic Algorithm and Its Jumping Gene Adaptations. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 45, pp. 3182-3199.
- [6] Allmendinger, R. A., Simaria, S. & Farid, S. S., 2014. Multiobjective evolutionary optimization in antibody purification process design. *Biochemical Engineering Journal*, Vol. 91, pp. 250-264.
- [7] Altus, S., 2007. Flight planning – the forgotten field in airline operations. *AGIFORS Airline Operations 2007*.
- [8] Auger, A., Bader, J., Brockhoff, D. & Zitzler, E., 2012. Hypervolume-based Multiobjective Optimization: Theoretical Foundations and Practical Implications. *Theoretical Computer Science*, Vol. 425, pp. 75-103.
- [9] Banos, R., Ortega, J., Gil, C., Fernandez, A. & De Toro, F., 2013. A Simulated Annealing-based parallel multi-objective approach to vehicle routing problems with time windows. *Expert Systems with Applications*, Vol. 40, No. 5, pp. 1696-1707.
- [10] Barman, J. F. & Erzberger, H., 1976. Fixed-Range Optimum Trajectories for Short-Haul Aircraft. *Journal of Aircraft*, Vol. 13, No. 10, pp 748-754.
- [11] Barnier, N. & Allignol, C., 2009. 4D - trajectory deconfliction through departure time adjustment. *ATM 2009, the 8th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*, Napa, California.
- [12] Bartholomew-Biggs, M., Parkhurst, S., & Wilson, S., 2002. Using DIRECT to solve an aircraft routing problem. *Computational Optimization and Applications*, Vol. 21, Issue 3, pp. 311–323.

- [13] Bartholomew-Biggs, M., Parkhurst, S., & Wilson, S., 2003. Global optimization approaches to an aircraft routing problem. *European Journal of Operational Research*, Vol 146, Issue 2 pp. 417–431.
- [14] Batterson, J. G. & Klein, V., 1989. Partitioning of flight data for aerodynamic modeling of aircraft at high angles of attack. *Journal of Aircraft*, Vol. 26, No. 4, pp. 334-339.
- [15] Beiranvand, V., Mobasher-Kashani, M. & Bakar, A. A., 2014. Multi-Objective PSO Algorithm for Mining Numerical Association Rules Without a Priori Discretization. *Expert Systems with Applications*, Vol. 41, No. 9, pp. 4259-4273.
- [16] Berkhin, P., 2009. A Survey of Clustering Data Mining Techniques. Jacob Kogan, Charles Nicholas, Marc Teboulle (Eds.), *Grouping Multidimensional Data*. Springer. pp. 25-71.
- [17] Berrocal-Plaza, V., Vega-Rodriguez, M. A. & Sanchez-Perez, J. M., 2014. On the use of multiobjective optimization for solving the Location Areas strategy with different paging procedures in a realistic mobile network. *Applied Soft Computing*, Vol. 18, pp. 146-157.
- [18] Betts, J. T. & Cramer, E. J., 1995. Application of Direct Transcription to Commercial Aircraft Trajectory Optimization. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 18, No. 1, pp. 151-159.
- [19] Betts, J. T. & Cramer, E. J., 1995. Application of direct transcription to commercial aircraft trajectory optimization. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 18, No. 1, pp. 151–159.
- [20] Brownlee, A. E. I. & Wright, J. A., 2015. Constrained, mixed-integer and multi-objective optimisation of building designs by NSGA-II with fitness approximation. *Applied Soft Computing*, Vol. 33, pp. 114-126.
- [21] Bryson, A. E. Jr & Ho, Y. C., 1975. *Applied Optimal Control: Optimization, Estimation and Control*. Hemisphere Publishin Corp.
- [22] Burrows, J. W., 1982. Fuel Optimal Trajectory Computation. *Journal of Aircraft*, Vol. 19, No. 4, pp 324-329.
- [23] Burrows, J. W., 1983. Fuel-Optimal Aircraft Trajectories with Fixed Arrival Times. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 6, No. 1, pp. 14-19.
- [24] Cervante, L., Xue, B., Shang, L. & Zhang M., 2013. A Multi-objective Feature Selection Approach Based on Binary PSO and Rough Set Theory. Martin Middendorf and Christian Blum (editors), *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization*, 13th European Conference, EvoCOP 2013, pp. 25-36, Springer. Lecture Notes in Computer Science Vol. 7832, Vienna, Austria.
- [25] Charnes, A. & Cooper, W. W., 1961. *Management Models and Industrial Applications of Linear Programming*, Vol. 1, John Wiley and sons, New York.
- [26] Chen, D., Zou, F. & Wang, J., 2011. A Multi-objective Endocrine PSO Algorithm and Application. *Applied Soft Computing*, Vol. 11, No. 8, pp. 4508-4520.
- [27] Chen, R. H. & Speyer, J. L., 2007. Improved Endurance of Optimal Periodic Flight. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 30, No. 4, pp. 1123-1133.
- [28] Cheng, H., Chiang, T. & Fu, L., 2011. A Two-stage Hybrid Memetic Algorithm for Multiobjective Job Shop Scheduling. *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, No. 9, pp. 10983-10998.

- [29] Clarke, J. B., Ho, N. T., Ren, L., Brown, J. A., Elmer, K. R., Katherine Zou, Hunting, C., McGregor, D. L., Shivashankara, B. N., Tong, K., Warren, A. W. & Wat, J. K., 2004. Continuous Descent Approach: Design and Flight Test for Louisville International Airport. *Journal of Aircraft*, Vol. 41, No. 5, pp. 1054–1066.
- [30] Clements, J. C., 2002. Optimal Simultaneous Pairwise Conflict Resolution Maneuvers in Air Traffic Management. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 25, No. 4, pp. 815-818.
- [31] Coelho, R. F., 2015. Probabilistic Dominance in Multiobjective Reliability-Based Optimization: Theory and Implementation. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 19, Issue 2, pp. 214-224.
- [32] Coello Coello C. A., 2006. Evolutionary Multiobjective Optimization: A Historical View of the Field. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, pp. 28-36.
- [33] Coello Coello C. A., 1999. A Comprehensive Survey of Evolutionary-Based Multiobjective Optimization Techniques. *Knowledge and information systems*, pp. 269-308.
- [34] Coello Coello, C. A., 1996. An Empirical Study of Evolutionary Techniques for Multiobjective Optimization in Engineering Design. PhD thesis, Department of Computer Science, Tulane University, New Orleans, LA.
- [35] Coello Coello, C. A., Van Veldhuizen, D. A. & Lamont, G. B., 2002. *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. Kluwer Academic Publishers, New York.
- [36] Collette, Y. & Siarry, P., 2003. *Multiobjective Optimization. Principles and Case Studies*. Springer.
- [37] Deb, K., 2001. *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, John Wiley and Sons, Chichester, UK.
- [38] Deb, K., Agrawal, S., Pratab, A. & Meyarivan, T., 2000. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. *Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature VI Conference*, pp. 849–858, Paris, France.
- [39] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. & Meyarivan, T., 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 6, Issue 2, pp. 182–197.
- [40] Department of Transport Studies, University of Westminster, 2013. European airline delay cost reference values.
- [41] Diaz-Gomez, P.A. & Hougen, D. F., 2007. Initial Population for Genetic Algorithms: A metric Approach. *Proceedings of the 2007 International Conference on Genetic and Evolutionary Methods*.
- [42] Dijkstra, E., 1959. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, Vol. 1, Issue 1, pp. 269–271.
- [43] Dodge, Y., 2010. *The Concise Encyclopedia of Statistics*. Springer, pp. 209–211. New York.
- [44] Dong, J., Wang, G. & Li, D. 2003. Optimal pilot interval design for the dedicated pilot channel. *Communications, Computers and signal Processing. PACRIM. IEEE Pacific Rim Conference*.
- [45] Duarte, N. M., Ruano, A. E., Fonseca, C. M. & Fleming, P. J., 2000. Accelerating Multi-Objective Control System Design Using a Neuro-Genetic Approach.

- Proceedings of the 2000 Conference on Evolutionary Computation, Piscataway, New Jersey.
- [46] Ducheyne, E. I., De Wulf, R. R. & De Baets, B., 2001. Bi-objective genetic algorithm for forest management: a comparative study. Proceedings of the 2001 Genetic and Evolutionary Computation Conference. San Francisco, California.
- [47] Durand, N. & Barnier, N., 2015. Does ATM Need Centralized Coordination? Autonomous Conflict Resolution Analysis in a Constrained Speed Environment. *Air Traffic Control Quarterly*, Vol. 23, No. 4, pp. 325-346.
- [48] Durand, N. & Gotteland, J. B., 2006. Genetic algorithms applied to air traffic management. *Metaheuristics for Hard Optimization*, pp 277 -306. Springer.
- [49] Edgeworth, F.Y., 1881. *Mathematical Physics*, P. Keagan, London, England.
- [50] Elmer, K., Wat, J., Shivashankara, B., McGregor D. & Lambert, D., 2002. A Continuous Descent Approach Study Using Ames B747-400 Flight Simulator. AIAA's Aircraft Technology, Integration, and Operations (ATIO) 2002 Technical Forum, Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conferences.
- [51] Erzberger, H. & Lee, H., 1980. Constrained Optimum Trajectories with Specified Range. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 3, No. 1, pp. 77-85.
- [52] Erzberger, H. & Lee, H., 1980. Constrained Optimum Trajectories with Specified Range. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 3, No. 1, pp. 78-85.
- [53] EUROCONTROL Experimental Centre, 2012. Conflict Detection Tools Impact on Controller Taskload - Fast time study.
- [54] EUROCONTROL, 2009. Strategic Guidance in Support of the Execution of the European ATM Master Plan. Brussels, Belgium.
- [55] EUROCONTROL, 2013. Challenge of Growth 2013 Task 4: European Air Traffic in 2035. Brussels, Belgium.
- [56] European Organisation for the Safety of Air Navigation, 2003. EUROCONTROL Manual for Airspace Planning. Brussels, Belgium.
- [57] FAA, 2015. Instrument Procedures Handbook. Chapter 2. En Route Operations. Oklahoma City.
- [58] Félix Patrón, R. S. & Mihaela Botez, R., 2015. Flight Trajectory Optimization through Genetic Algorithms for Lateral and Vertical Integrated Navigation. *Journal of Aerospace Information Systems*, Vol. 12, No. 8, pp. 533-544.
- [59] Flicker, R. & Fricke, M., 2005. Improvement on the acceptance of a conflict resolution system by air traffic controllers. ATM 2005, the 6th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, Baltimore, Maryland.
- [60] Fonseca, C. M. & Fleming, P. J., 1993. Genetic algorithms for multiobjective Optimization: Formulation, discussion and generalization. Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms, pp. 416-423.
- [61] Frazzoli, E., Mao, Z. H., Oh, J. H. & Feron, E., 2001. Resolution of Conflicts Involving Many Aircraft via Semidefinite Programming. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 24, No. 1, pp. 79-86.
- [62] Gagné, J., Murrieta Mendoza, A., Botez, R. M., & Labour, D., 2013. New method for aircraft fuel saving using Flight Management System and its validation on the L-1011 aircraft. Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, AIAA AVIATION Forum,

- [63] Goldberg D. E., 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts.
- [64] Green, S. & Grace, M., 1999. Conflict-free planning for en route spacing - A concept for integrating conflict probe and miles-in-trail. Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Guidance, Navigation, Control & Co-located Conferences.
- [65] Grimm, W. & Wellt, K. H., 1986. Periodic Control for Minimum-Fuel Aircraft Trajectories. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 9, No. 2, pp. 169-174.
- [66] Hagelauer, P. & Mora-Camino, F., 1998. A soft dynamic programming approach for online aircraft 4d-trajectory optimization. European Journal of Operational Research, Vol. 107, Issue 1, pp. 87-95.
- [67] Hazelrigg, G. A., 1996. Systems Engineering: An Approach to Information-Based Design. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- [68] He, Z., Xu, X. & Deng, S., 2002. Squeezer. An Efficient algorithm for clustering categorical data. Journal of Computer Science and Technology, Vol. 17 Issue 5, Editorial Universitaria de Buenos Aires.
- [69] Hewitt, C., & Broatch, S., 1992. A tactical navigation and routing system for low-level flight. Technical Report, General Electric Company-Marconi Avionics, Rochester, Kent, UK.
- [70] Hoffman, E., Martin, P., Pütz, T., Trzmiel, A. & Zeghal, K., 2007. Airborne Spacing: Flight Deck View of Compatibility with Continuous Descent Approach (CDA). 7th AIAA ATIO Conf, 2nd CEIAT Int'l Conf on Innov and Integr in Aero Sciences, 17th LTA Systems Tech Conf; followed by 2nd TEOS Forum, Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conferences.
- [71] Horn, J., Nafpliotis, N., & Goldberg, D. E., 1994. A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization. Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence, Piscataway, New Jersey.
- [72] Hu, J., Prandini, M., & Sastry, S., 2002. Optimal Coordinated Maneuvers for Three-Dimensional Aircraft Conflict Resolution. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 25, No. 5, pp. 888-900.
- [73] Huang, H. & Tomlin, C., 2009. A Network-Based Approach to En-Route Sector Aircraft Trajectory Planning. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Guidance, Navigation, Control and Co-located Conferences.
- [74] Huntington, G. T. & Rao, A. V., 2008. Optimal Reconfiguration of Spacecraft Formations Using the Gauss Pseudospectral Method. Journal of Guidance Control and Dynamics, Vol. 31, No. 3, pp. 689-698.
- [75] Hyndman, R. J., 1995. The Problem with Sturges Rule for Constructing Histograms. Monash Univ., Australia.
- [76] ICAO, 2005. Global Air Traffic Management Operational Concept. Doc 9854-AN/458. Montreal, Canadá.
- [77] ICAO, 2007. Air Traffic Management. Doc 4444-ATM/501, fifteenth Edition Montreal, Canada.
- [78] ICAO, 2007. Procedures for air navigation services - Air Traffic Management. Doc 9854-ATM/501. Montreal, Canada.
- [79] Ijiri, Y., 1965. Management Goals and Accounting for Control. North-Holland, Amsterdam.

- [80] Irons R. P., Schultz, R. L. & Zagalsky, N. R., 1971. Energy State Approximation and Minimum Fuel Fixed-Range Trajectories. *Journal of Aircraft*, Vol. 8, No. 6, pp. 488-490.
- [81] Isaacson, D. & Robinson, J., 2001. A knowledge-based conflict resolution algorithm for terminal area air traffic control advisory generation. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Guidance, Navigation, and Control and Co-located Conferences*.
- [82] Isaacson, D. R. & Erzberger, H., 1997. Design of a conflict detection algorithm for the Center/TRACON automation system. *Proceedings 16th Digital Avionics Systems Conference, AIAA/IEEE*, pp. 9.3-1-9.3-9 Vol.2.
- [83] Jardin, M. & Bryson, A., 2012. Methods for Computing Minimum-Time Paths in Strong Winds. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 35, No. 1, pp. 165-171.
- [84] Jardin, M., 2008. Analytical Solutions for Minimum-Time Neighboring Optimal Aircraft Guidance in Winds. *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Guidance, Navigation, and Control and Co-located Conferences*.
- [85] Jorris, T. R. & Cobb, R. G., 2008. Multiple method 2-d trajectory optimization satisfying waypoints and no-fly zone constraints. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 31, No. 3, pp. 543-553.
- [86] Kanury, S., & Song, Y. D., 2006. Flight management of multiple aerial vehicles using genetic algorithms. *38th Southeastern Symposium on System Theory*.
- [87] Kent, T. E., & Richards, A. G., 2013. On optimal routing for commercial formation flight. *AIAA Guidance, Navigation, and Control (GNC) Conference, Guidance, Navigation, and Control and Co-located Conferences*.
- [88] Khun, H. W. & Tucher, A. W. 1951. Nonlinear Programming. *Proceeding of the Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, pp. 481-492, Berkeley, California.
- [89] Kita, H., Yabumoto, Y., Mori, N. & Nishikawa, Y., 1996. Multi-objective optimization by means of the thermodynamical genetic algorithm. Hans-Michael Voigt et al., editor, *Parallel Problem Solving from Nature—PPSN IV, Lecture Notes in Computer Science*, pp. 504–512, Berlin, Germany, Springer-Verlag.
- [90] Knowles, J. D. & Corne, D. W., 2000. Approximating the nondominated front using the Pareto archived evolution strategy. *Evolutionary Computation*, Vol. 8, Issue 2, pp. 149–172.
- [91] Kouba, G., 2010. Calcul des trajectoires utilisant les algorithmes genetiques en trois dimensions pour un avion modelise en six dimensions. *Mémoire ou thèse, Ecole de Technologie Superieure, Canada*.
- [92] Kuchar, J. K. & Yang, L. C., 2000. A Review of Conflict Detection and Resolution Modeling Methods. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 1, Issue. 4, pp. 179-189.
- [93] Laumanns, M., Thiele, L., Deb, K. & Zitzler, E., 2002. Combining convergence and diversity in evolutionary multi-objective optimization. *Evolutionary Computation*, Vol. 10, Issue 3, pp. 263–282.
- [94] Li, L., Das, S., Hansman, R. J., Palacios, R., & Srivastava, A. N., 2015. Analysis of Flight Data Using Clustering Techniques for Detecting Abnormal Operations. *Journal of Aerospace Information Systems*, Vol. 12, No. 9, pp. 587-598.



- [95] Liden, S., 1992. Optimum cruise profiles in the presence of winds. Digital Avionics Systems Conference. Proceedings, IEEE/AIAA 11th.
- [96] Liu, J. & Han, D., 2013. On selection of the optimal data time interval for real-time hydrological forecasting. Hydrol. Earth Syst. Sci.
- [97] Lobo, F. G. & Goldberg, D. E., 2004. The parameter less genetic algorithm in practice. Information Sciences-Informatics and Computer Science, Vol. 167, No. 1-4, pp. 217–232.
- [98] Lovegren, J., 2011. Estimation of potential aircraft fuel burn reduction in cruise via speed and altitude optimization strategies. Thesis: S.M., Massachusetts Institute of Technology, Department of Aeronautics and Astronautics.
- [99] Ma, A., Zhong, Y. & Zhang, L., 2015. Adaptive Multiobjective Memetic Fuzzy Clustering Algorithm for Remote Sensing Imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 53, No. 8, pp. 4202-4217.
- [100] Maimon, Od. & Rokach, L., 2010. Data Mining and Knowledge Discovery Handbook. ed. Springer.
- [101] Majumdar, A. & Polak, J.W., 2001. A Framework for the Estimation of European Airspace Capacity using a Model of Controller Workload. Transportation Research Records, pp. 30-43.
- [102] Marceau, G. & Schoenauer, M., 2013. Strategic Planning in Air Traffic Control as a Multi-objective Stochastic Optimization Problem. ATM 2013, the 10th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, Chicago, Illinois.
- [103] Matsuno, Y., Tsuchiya, T. & Matayoshi, N. 2016. Near-Optimal Control for Aircraft Conflict Resolution in the Presence of Uncertainty. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 39, No. 2, pp. 326-338.
- [104] Menon, P. K. A., 1989. Study of Aircraft Cruise. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 12, No. 5, pp. 631-639.
- [105] Messac, A. & Mattson, C. A. 2004. Normal Constraint Method with Guarantee of Even Representation of Complete Pareto Frontier. AIAA Journal, Vol. 42, No. 10, pp. 2101-2111.
- [106] Miele, A., 1962. Flight Mechanics: Theory of Flight Paths. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts.
- [107] Mostaghim, S. & Teich, J., 2003. The role of  $\epsilon$ -dominance in multi objective particle swarm optimization methods. Proceedings of the 2003 Congress on Evolutionary Computation (CEC'2003), Vol. 3, pp. 1764–1771, Canberra, Australia,
- [108] Murrieta Mendoza, A., 2013. Vertical and lateral flight optimization algorithm and missed approach cost calculation. Thesis: M. Eng., Ecole de Technologie Supérieure, Canada.
- [109] Neuman, F. & Kreindler, E., 1985. Minimum-fuel, three-dimensional flight paths for jet transports. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 8, No. 5, pp. 650-657.
- [110] Ng, H. K., Sridhar, B., & Grabbe, S., 2014. Optimizing aircraft trajectories with multiple cruise altitudes in the presence of winds. Journal of Aerospace Information Systems, Vol. 11, No. 1, pp. 35-47.
- [111] Nirmala, A. M & Saravanan, S., 2014 A Study on Clustering Techniques on Matlab. International Journal of Science and Research.

- [112] Nuic, A., 2004. User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA). Rev. 3.6, EUROCONTROL Experimental Centre, EEC Note No. 10/04, Bruxelles.
- [113] Osyczka, A., 1981. An approach to multicriterion optimization for structural design. Proceeding of International Symposium on Optimal Structural Design. Univesity of Arizona.
- [114] Osyczka, A., 1985. Multicriteria Optimization for Engineering Design. En Gero, J. S. (editor): Design Optimization, pp 193–227. Academic Press.
- [115] Osyczka, A., 2002. Evolutionary Algorithms for Single and Multicriteria Design Optimization, Physica Verlag, Germany.
- [116] Pareto, V., 1896. Cours D'Economie Politique, vol. I and II. F. Rouge, Lausanne.
- [117] Pargett, D. M. & Ardema, M. D., 2007. Flight path optimization at constant altitude. Journal of Guidance Control and Dynamics, Vol. 30, No. 4, pp. 1197-1201.
- [118] Pargett, D. M. & Ardema, M. D., 2007. Flight Path Optimization at Constant Altitude. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 30, No. 4, pp. 1197-1201.
- [119] Piszcz, A. & Soule, T., 2006. Genetic programming: Optimal population sizes for varying complexity problems. Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, pp. 953–954.
- [120] Ponsich, A., López Jaimes, A. & Coello Coello, C. A., 2013. A Survey on Multiobjective Evolutionary Algorithms for the Solution of the Portfolio Optimization Problem and Other Finance and Economics Applications. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 17, Issue. 3, pp. 321-344.
- [121] Raghunathan, A. U., Gopal, V., Subramanian, D., Biegler, L. T., & Samad, T., 2004. Dynamic Optimization Strategies for Three-Dimensional Conflict Resolution of Multiple Aircraft. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 27, No. 4, pp. 586-594.
- [122] Rao S., 1986. Game theory approach for multiobjective structure optimization. Computers and Structures, Vol. 25, Issue 1, pp. 119-129.
- [123] Ritzel, B. J., Wayland Eheart, J. & Ranjithan, S., 1994. Using genetic algorithms to solve a multiple objective groundwater pollution containment problem. Water Resources Research, Vol. 30, Issue 5, pp. 1589-1603.
- [124] Rivas, D. & Valenzuela, A., 2009. Compressibility Effects on Maximum Range Cruise at Constant Altitude. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 32, No. 5, pp. 1654-1658.
- [125] Rizvi, F., 2013. Reducing Earth Topography Resolution for SMAP Mission Ground Tracks Using K-Means Clustering. AIAA Infotech@Aerospace (I@A) Conference, Guidance, Navigation, Control and Co-located Conferences.
- [126] Roach, K & Robinson, J. E., 2010. A Terminal Area Analysis of Continuous Ascent Departure Fuel Use at Dallas/Fort Worth International Airport. 10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conferences.
- [127] Roh, W. & Kim, Y., 2002. Trajectory optimization for a multi-stage launch vehicle using time finite element and direct collocation methods. Engineering Optimization, Vol. 34, No. 1, pp. 15–32.
- [128] Rosenthal, S., & Borschbach, M., 2014. Impact of Population Size and Selection within a Customized NSGA-II for Biochemical Optimization Assessed on the Basis of



- the Average Cuboid Volume Indicator. The Sixth International Conference on Bioinformatics, Biocomputational Systems and Biotechnologie.
- [129] Ross, I., D'Souza, C., Fahroo, F. & Ross, J., 2003. A fast approach to multi-stage launch vehicle trajectory optimization. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Guidance, Navigation, and Control and Co-located Conferences.
  - [130] Rudolph, G. & Agapie, A., 2000. Convergence properties of some multi-objective evolutionary algorithms. Proceedings of the 2000 Conference on Evolutionary Computation, Piscataway, New Jersey.
  - [131] Sachs, G. & Mehlhorn, R., 1993. Enhancement of Endurance Performance by Periodic Optimal Camber Control Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 16, No. 3, pp. 572-578.
  - [132] Saéz Nieto, F. J. & Portillo Pérez, Y., 2003. Descubrir la Navegación Aérea. Centro de Documentación y Publicaciones de AENA.
  - [133] Saéz Nieto, F. J., 2013. Navegación Aérea – Posicionamiento, Guiado y Gestión del Tráfico Aéreo. Ibergaceta Publicaciones.
  - [134] Saéz Nieto, F. J., Pérez Sanz, L., & Gómez Comendador, F., 2003. La Navegación Aérea y el Aeropuerto. Fundación AENA.
  - [135] Sammut, C. & Webb G. I., 2010. Encyclopedia of Machine Learning, ed. Springer.
  - [136] Schaffer, J. D., 1985. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms. Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms, pp. 93-100, Lawrence Erlbaum.
  - [137] Schultz, R. L. & Zagalsky, N. R., 1972. Aircraft Performance Optimization. Journal of Aircraft, Vol. 9, No. 2, pp. 108-114.
  - [138] Schultz, R. L., 1974. Fuel Optimality of Cruise. Journal of Aircraft, Vol. 11, No. 9, pp. 586-587.
  - [139] SESAR Consortium, 2007. D3 - ATM Target Concept. Brussels, Belgium.
  - [140] SESAR Consortium, 2007. SESAR Concept of Operations. Brussels, Belgium.
  - [141] SESAR Consortium, 2012. SWIM Concept of Operations. Brussels, Belgium.
  - [142] SESAR Joint Undertaking, 2016. European ATM Master Plan: The Roadmap for Delivering High Performing Aviation for Europe: Executive View: Edition 2015. Bruxelles.
  - [143] SESAR Programme, 2014. P07.06.01-D37 Step 2 V1 Network Performance Monitoring and Management Report.
  - [144] Slater, G. L., 2009. Study on variations in vertical profile for CDA descents. 9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO).
  - [145] Soler, M., Olivares, A. & Staffetti, E., 2010. Hybrid Optimal Control Approach to Commercial Aircraft Trajectory Planning. Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 4 No. 3, pp. 985-991.
  - [146] Solomatine, D. P., & Ostfeld, A., 2008. Data-Driven Modelling: Some Past Experiences and New Approaches. Journal of Hydrodynamics, Vol. 10, No. 1, pp. 3-22.
  - [147] Sorensen, J. A. & Waters M. H., 1981. Airborne Method to Minimize Fuel with Fixed Time-of-Arrival Constraints. Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 4, No. 3, pp. 348-349.

- [148] Speyer J. L., 1973. On the Fuel Optimality of Cruise. *Journal of Aircraft*, Vol. 10, No. 12 (1973), pp. 763-765.
- [149] Speyer J. L., 1976. Nonoptimality of the Steady State Cruise for Aircraft. *AIAA Journal*, Vol. 14, No. 11 pp. 1604-1610.
- [150] Srinivas, N. & Deb, K., 1994. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary Computation*, Vol. 2, Issue 3, pp. 221–248.
- [151] Sturges, H., 1926. The Choice of a Class-Interval. *Journal of American Statistical Association*, Vol. 21, No. 153, pp. 65-66.
- [152] Tan, K. C., Khor, E. F. & Lee, T. H., 2005. *Multiobjective Evolutionary Algorithms and Applications*. Springer-Verlag, London.
- [153] Tseng, C. H. & Lu, T. W., 1990. Minimax multiobjective optimization in structural design. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 30, Issue 6, pp. 1213-1228.
- [154] Turgut, E. T., & Rosen, M. A., 2012. Relationship between fuel consumption and altitude for commercial aircraft during descent: preliminary assessment with a genetic algorithm. *Aerospace Science and Technology*, Vol. 17, Issue 1, pp. 65-73.
- [155] Valenzuela, A. & Rivas, D. 2011. Conflict Resolution in Converging Air Traffic Using Trajectory Patterns. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 34, No. 4, pp. 1172-1189.
- [156] Van Veldhuizen, D. A. & Lamont, G. B., 1998. Multiobjective Evolutionary Algorithm Research: A History and Analysis. Technical Report 98-03, Department of Electrical and Computer Engineering. Air Force Institute of Technology, USA.
- [157] Villalobos-Arias, M. A., Toscano Pulido, G. & Coello Coello, C. A., 2005. A proposal to use stripes to maintain diversity in a multi-objective particle swarm optimizer. 2005 IEEE Swarm Intelligence Symposium (SIS'05), pp. 22–29, Pasadena, California.
- [158] Vormer, F., Mulder, M., Mulder, J. A. & Paassen, R., 2006. Optimization of Flexible Approach Trajectories Using a Genetic Algorithm. *Journal of Aircraft*, Vol. 43, No. 4, pp. 941-952.
- [159] Warren, A. & Tong, K., 2002. Development of continuous descent approach concepts for noise abatement. *The 21st Digital Avionics Systems Conference, Proceedings*.
- [160] Wu, D. & Zhao, Y. J., 2009. Performances and Sensitives of Optimal Trajectory Generation for Air Traffic Control Optimization. *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*.
- [161] Wu, D. & Zhao, Y. J., 2009. Performances and sensitivities of optimal trajectory generation for air traffic control automation. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Guidance, Navigation, and Control and Co-located Conferences*.
- [162] Xiangmin, G., Xuejun, Z., Dong, H., Yanbo, Z., Ji, L. & Jing, S. 2014. A strategic flight conflict avoidance approach based on a memetic algorithm. *Chinese Journal of Aeronautics*. Vol. 27, Issue 1, pp. 93–101.
- [163] Xiao-Bing, H., Shu-Fan, W. & Ju, J., 2004. On-line free-flight path optimization based on improved genetic algorithms. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 17, Issue 8, pp. 897-907.

- 
- [164] Yokoyama, N., 2014. Decentralized Model Predictive Control for Planning Three-Dimensional Conflict-Free Trajectories. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, AIAA SciTech.
- [165] Yuan, Z., Amaya Moreno, L., Maolaaisha, A., Fügenschuh, A., Kaier, A., Mollaysa, A. & Schlobach, S., 2015. Mixed integer second-order cone programming for the horizontal and vertical free-flight planning problem. Applied Mathematics and Optimization Series AMOS#21(2015), Helmut Schmidt University / University of the Federal Armed Forces Hamburg, Germany.
- [166] Zermelo, E., 1930. On the Navigation in the Air as a Problem of the Calculus of Variations. Jahresbericht der Deutschen Mathematiker-Vereinigung, vol. 39, pp. 44-48.
- [167] Zhoua, A., Qub, B., Lic, H., Zhaob, S., Suganthanb, P. N. & Zhangd, Q., 2011. Multiobjective evolutionary algorithms: A survey of the state of the art. Swarm and Evolutionary Computation, Vol 1, Issue 1, pp. 32-49.
- [168] Zitzler, E. & Thiele, L., 1998. Multiobjective optimization using evolutionary algorithms— a comparative study. A.E. Eiben, editor, Parallel Problem Solving from Nature V, pp. 292–301, Amsterdam, Springer-Verlag.
- [169] Zitzler, E., Laumanns, M. & Thiele, L., 2002. SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm. K. Giannakoglou et al., editor, EUROGEN 2001. Evolutionary Methods for Design, Optimization and Control with Applications to Industrial Problems, pp. 95–100, Athens, Greece.

## **Apéndice A. RESULTADOS POR ESCENARIO DE VALIDACIÓN**

---

## A.1 Resultados al Escenario 1

### A.1.1 Aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas

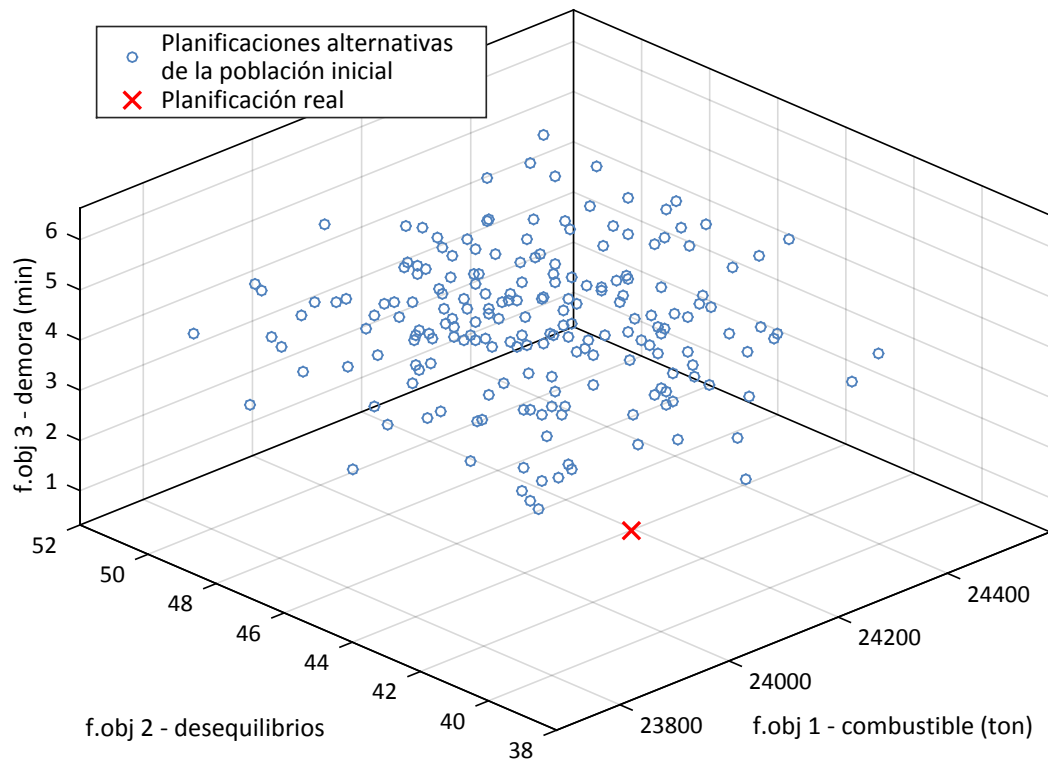


Figura A- 1 Valor de las funciones objetivos para cada individuo solución de la población inicial (escenario 1)

### A.1.2 Aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima

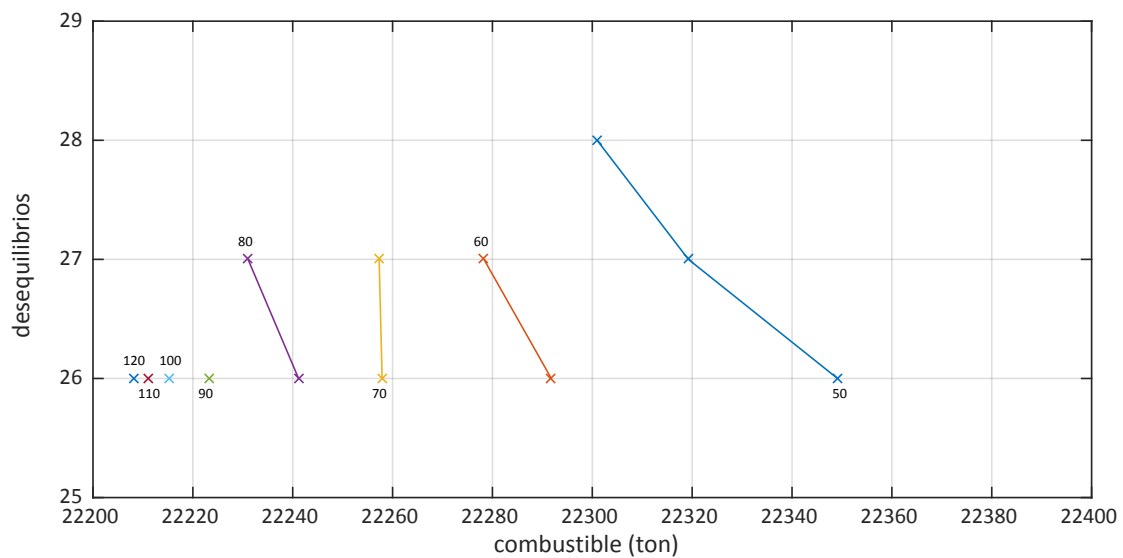


Figura A- 2 Frentes de Pareto y planificación óptima (escenario 1)

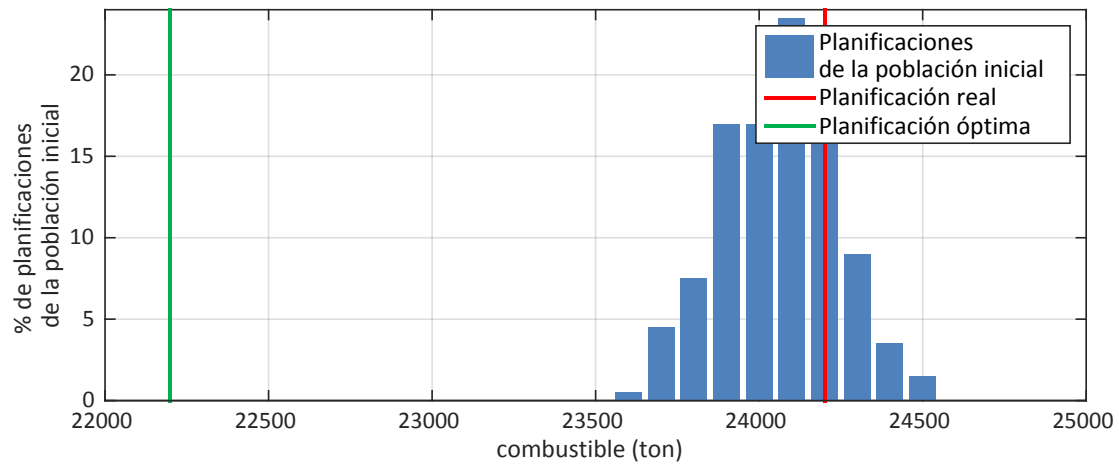


Figura A- 3 Histograma de consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 1)

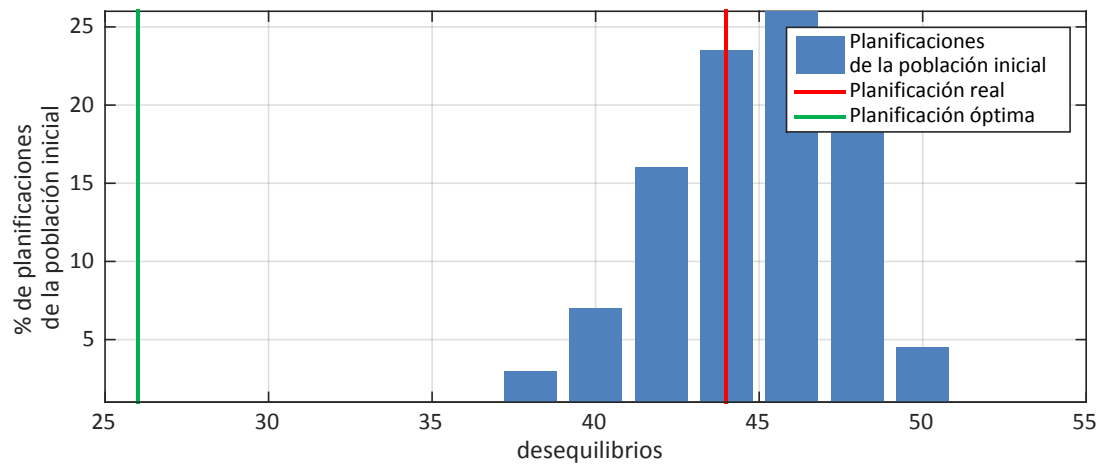


Figura A- 4 Histograma de desequilibrios de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 1)

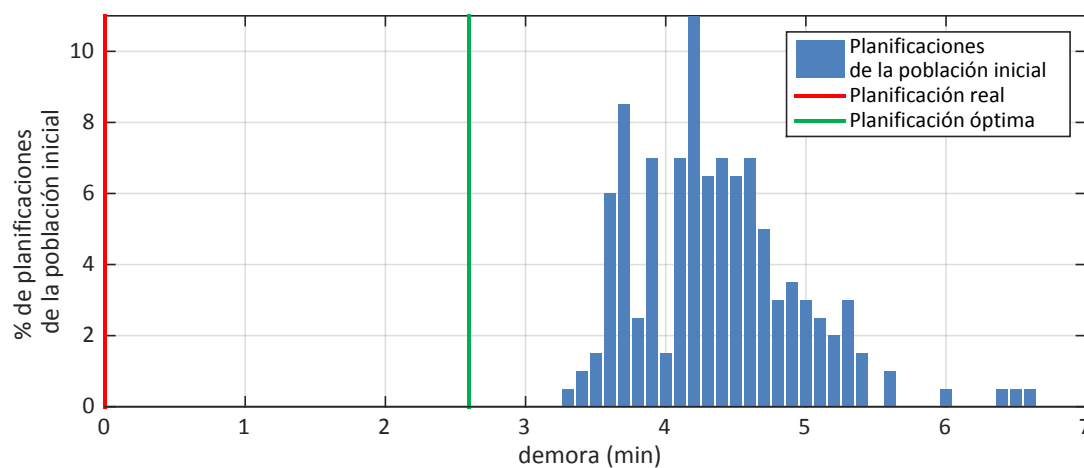


Figura A- 5 Histograma de demoras de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 1)

### A.1.3 Distribución de la demanda

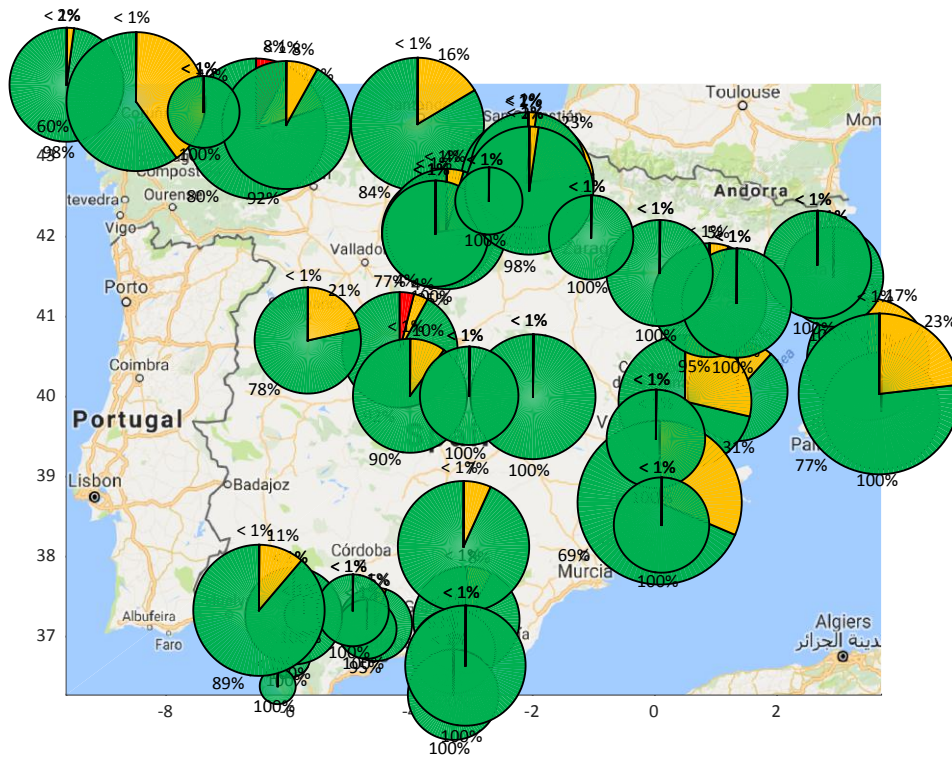


Figura A- 6 Desequilibrios de la planificación real (escenario 1)

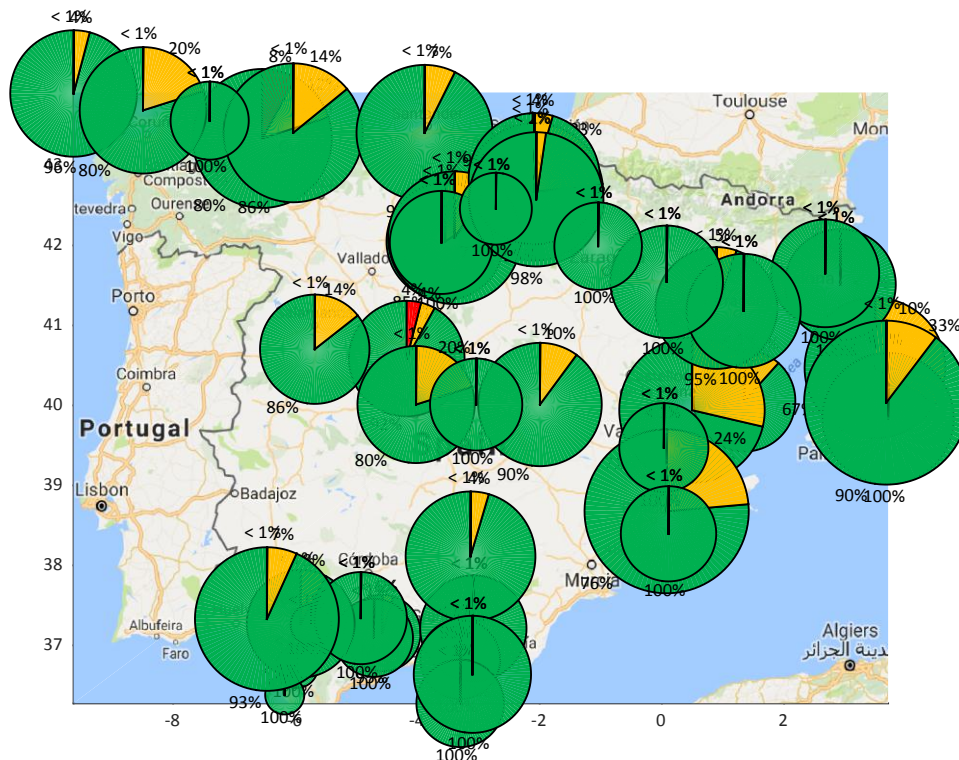


Figura A- 7 Desequilibrios de la planificación óptima (escenario 1)



A.1.4 Aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima

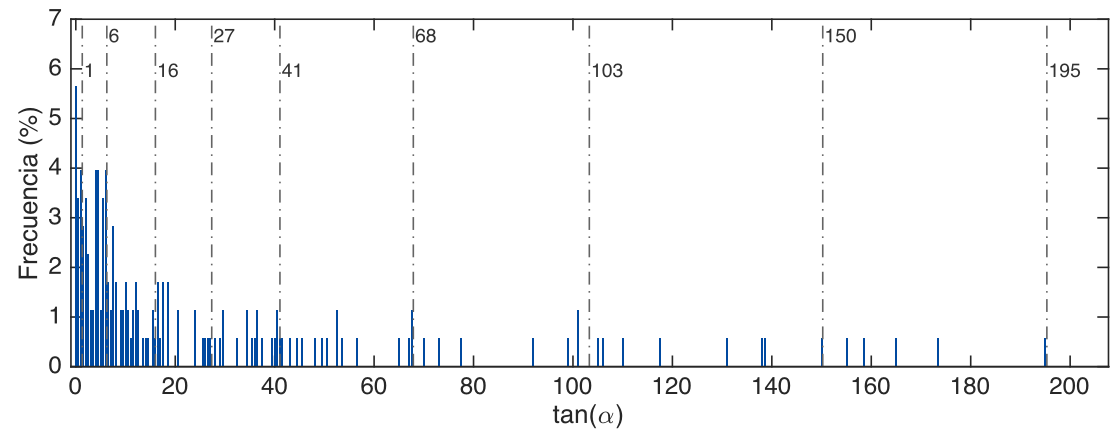


Figura A- 8 Pendientes de los frentes de Pareto de todos los conflictos (escenario 1)

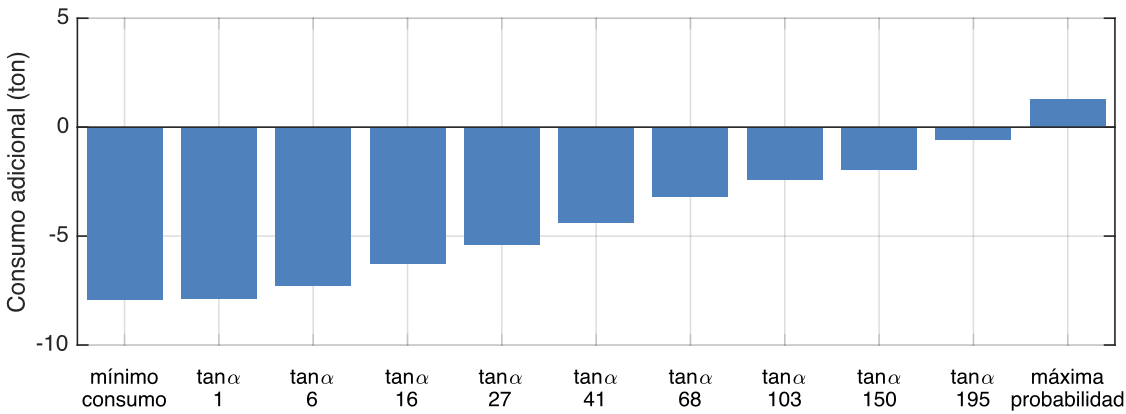


Figura A- 9 Combustible adicional para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 1)

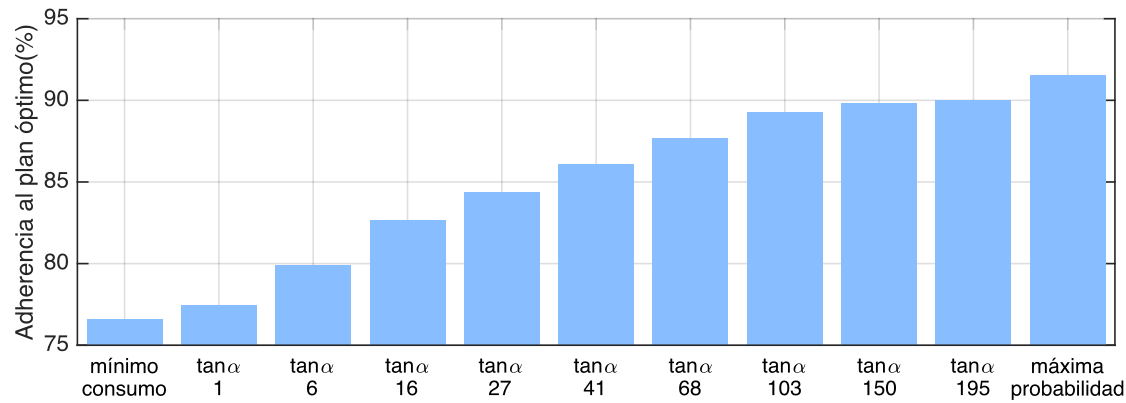


Figura A- 10 Adherencia al plan óptimo para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 1)



## A.2 Resultados al Escenario 2

### A.2.1 Aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas

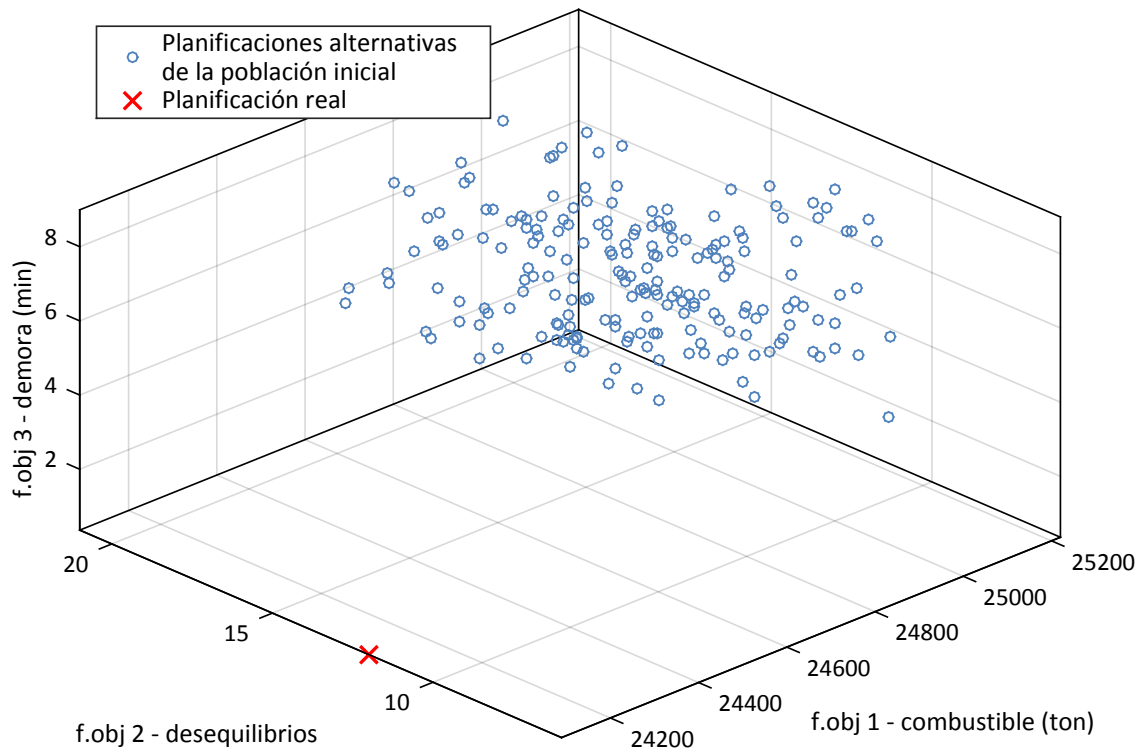


Figura A- 11 Valor de las funciones objetivas para cada individuo solución de la población inicial (escenario 2)

### A.2.2 Aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima

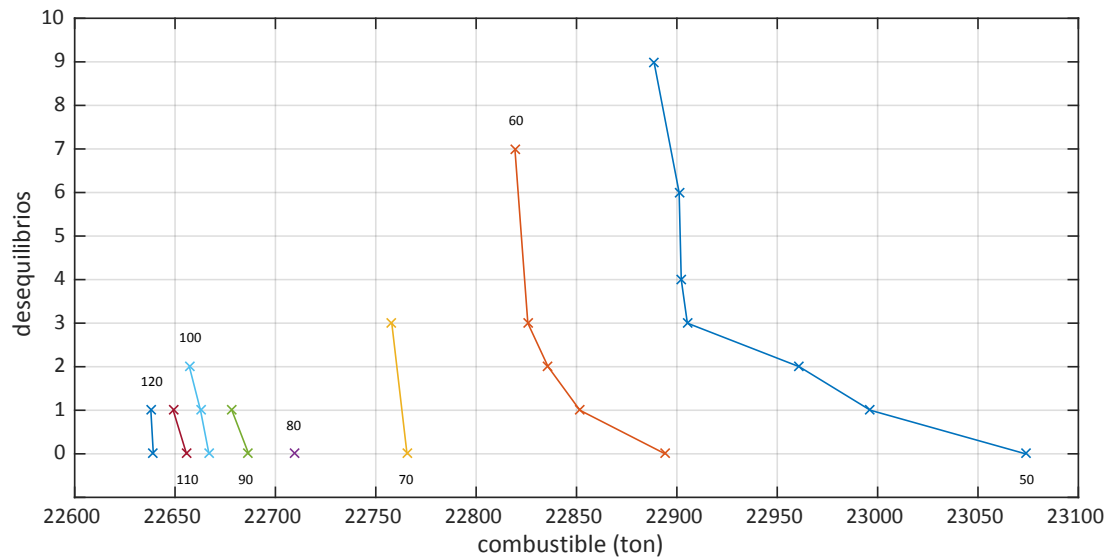


Figura A- 12 Frentes de Pareto y planificación óptima (escenario 2)

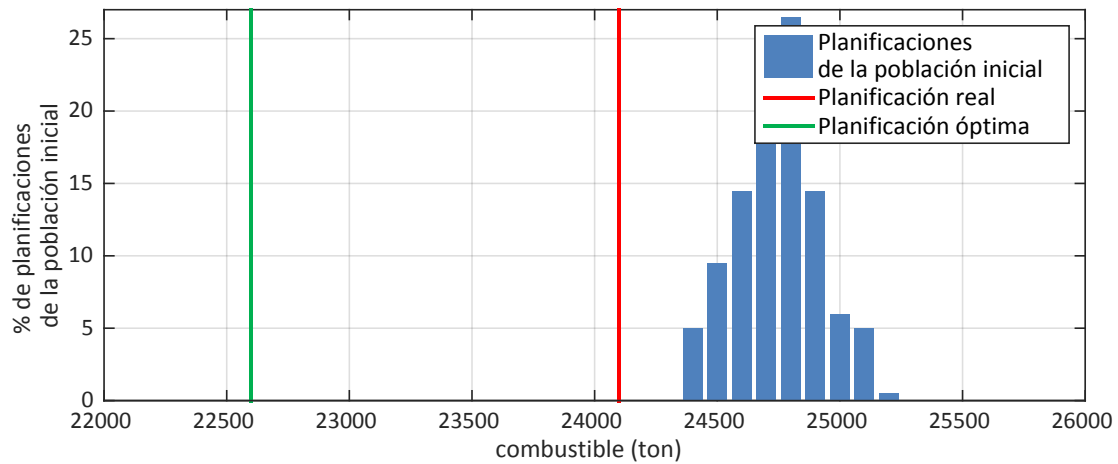


Figura A- 13 Histograma de consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 2)

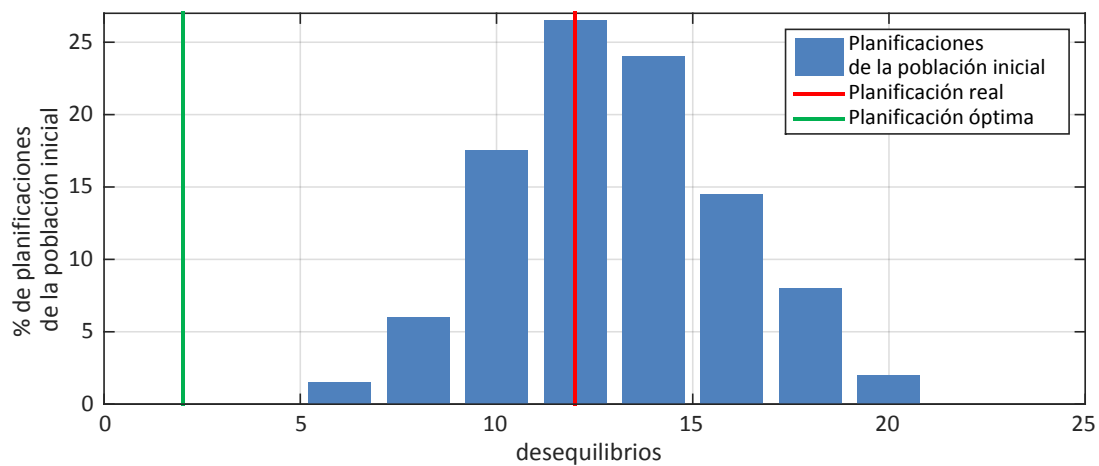


Figura A- 14 Histograma de desequilibrios de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 2)

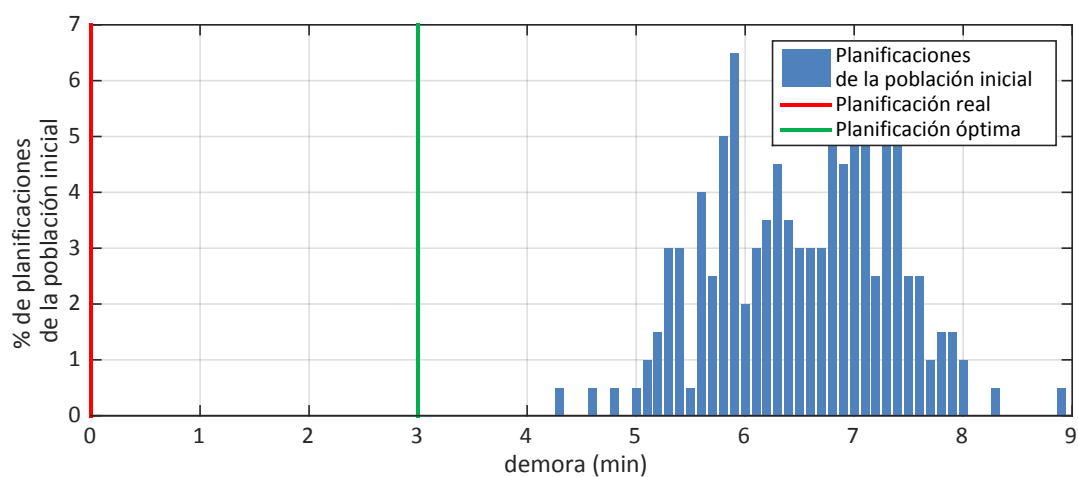


Figura A- 15 Histograma de demoras de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 2)

### A.2.3 Distribución de la demanda

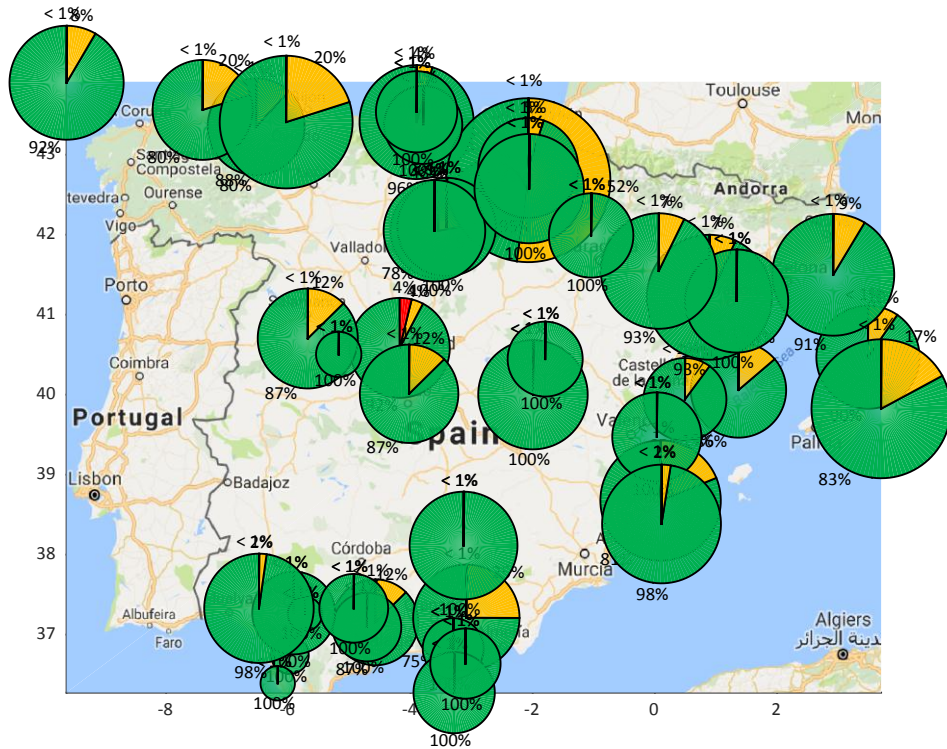


Figura A- 16 Desequilibrios de la planificación real (escenario 2)

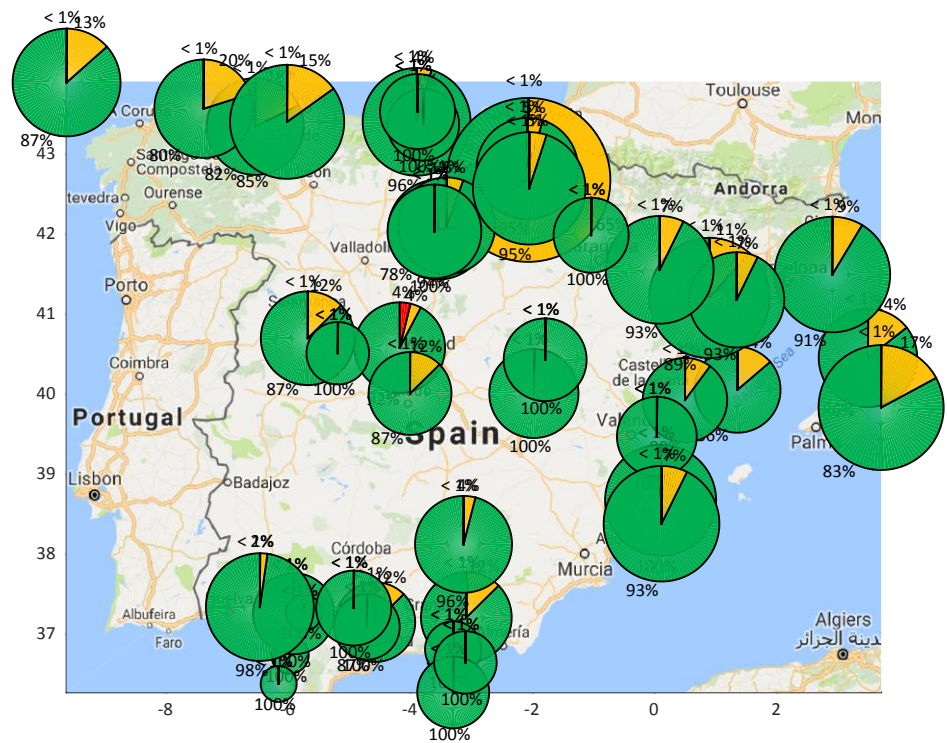


Figura A- 17 Desequilibrios de la planificación óptima (escenario 2)

A.2.4 Aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima

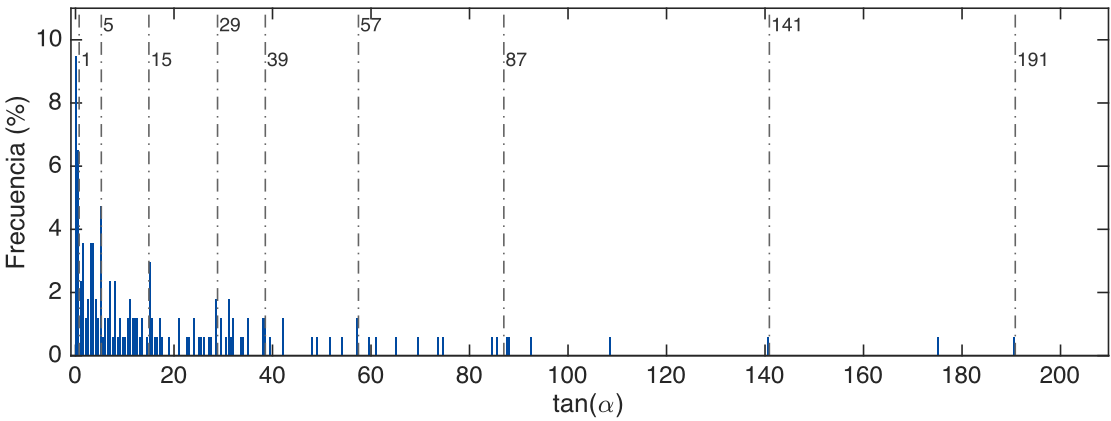


Figura A- 18 Pendientes de los frentes de Pareto de todos los conflictos (escenario 2)

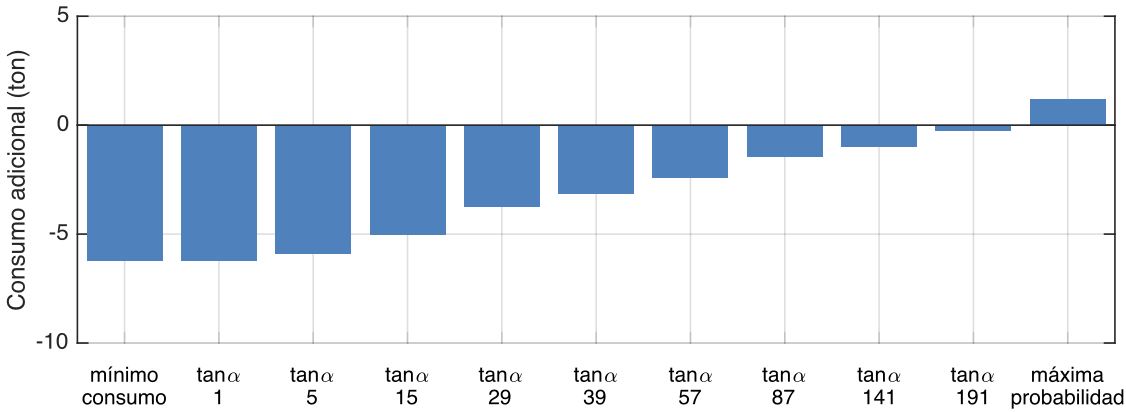


Figura A- 19 Combustible adicional para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 2)

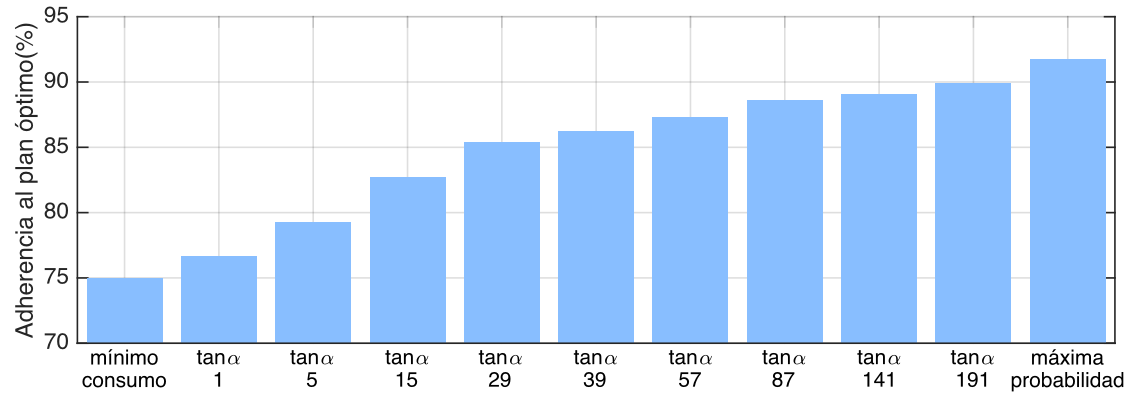


Figura A- 20 Adherencia al plan óptimo para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 2)

## A.3 Resultados al Escenario 3

### A.3.1 Aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas

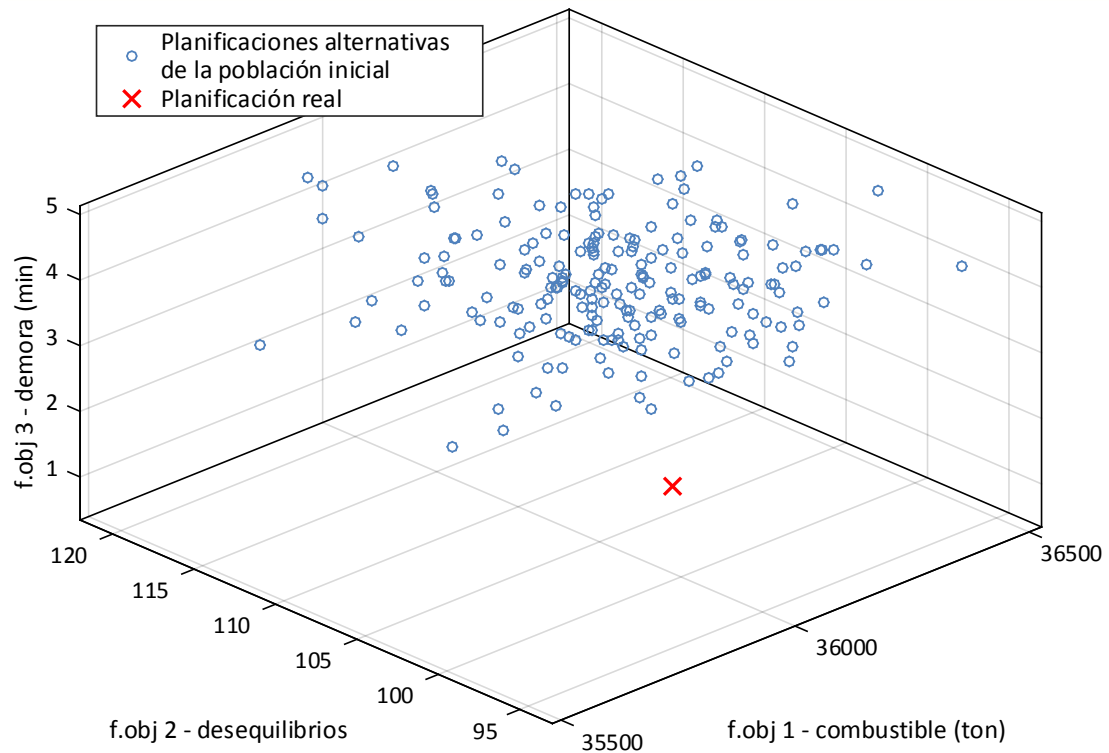


Figura A- 21 Valor de las funciones objetivas para cada individuo solución de la población inicial (escenario 3)

### A.3.2 Aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima

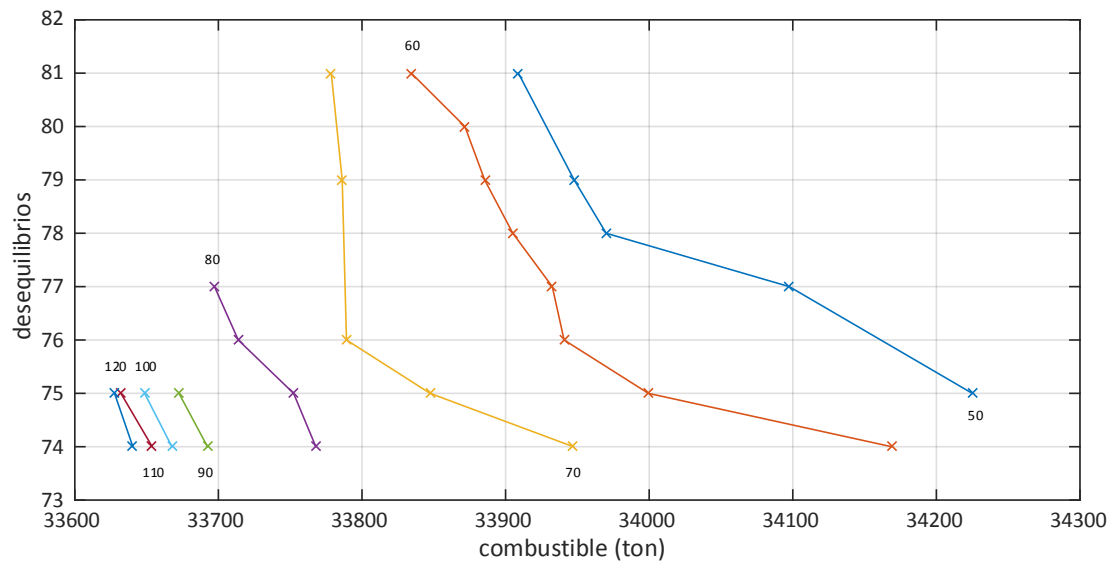


Figura A- 22 Frentes de Pareto y planificación óptima (escenario 3)

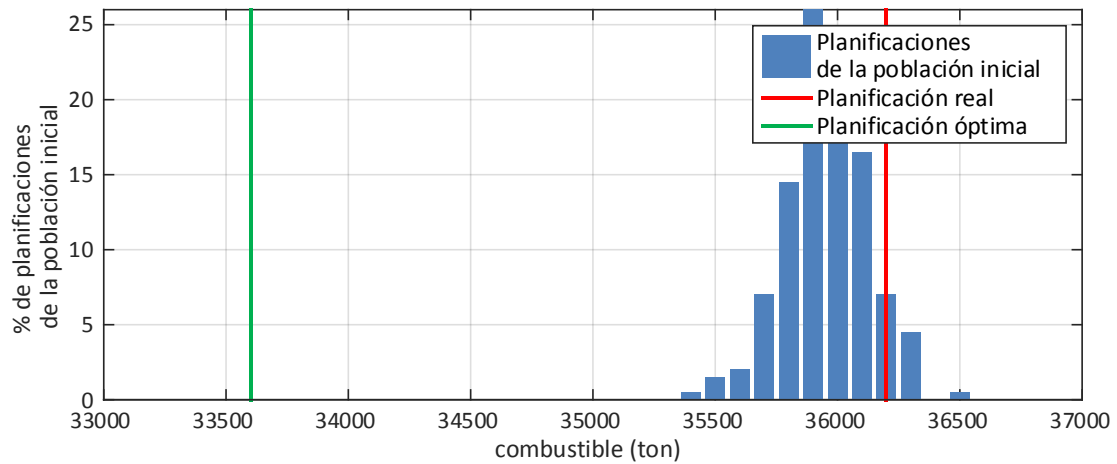


Figura A- 23 Histograma de consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 3)

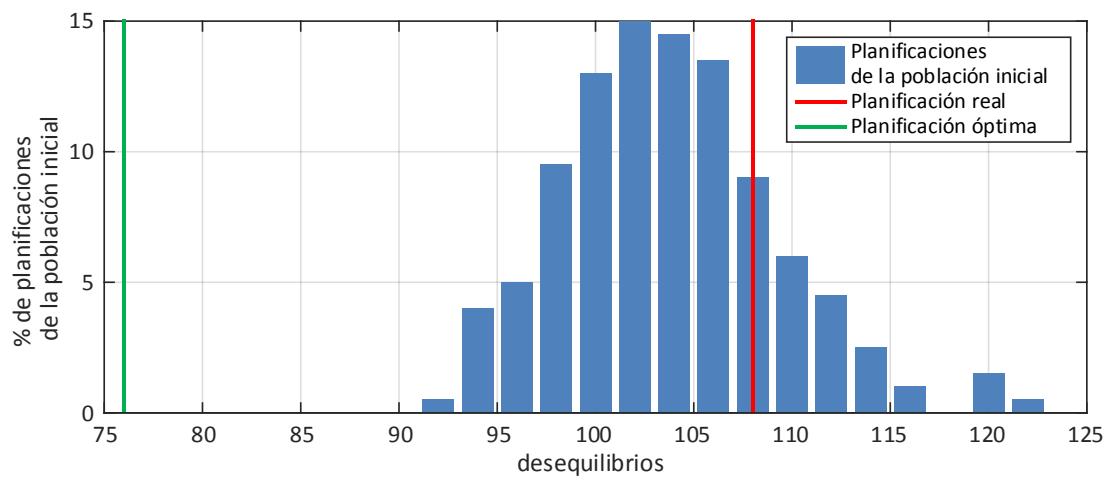


Figura A- 24 Histograma de desequilibrios de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 3)

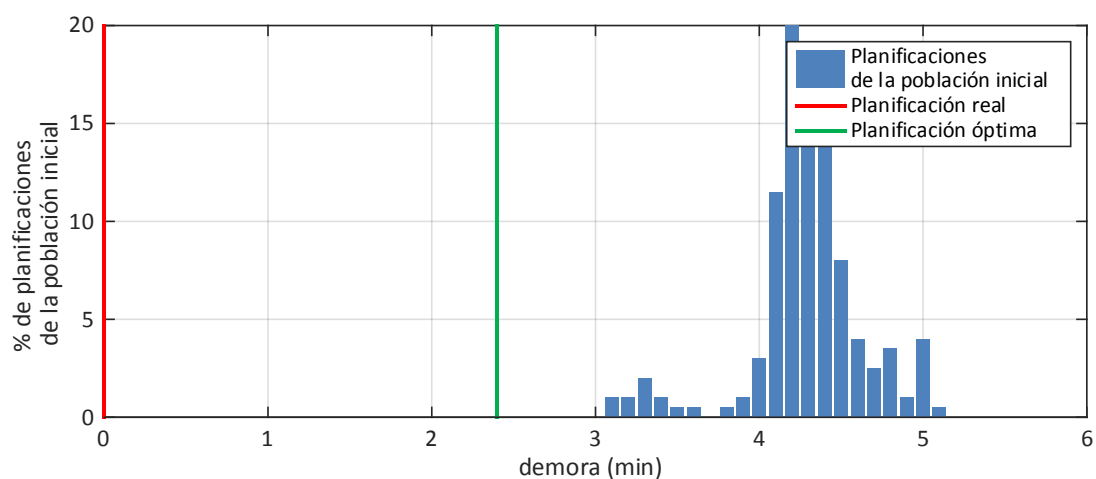


Figura A- 25 Histograma de demoras de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 3)



### A.3.3 Distribución de la demanda

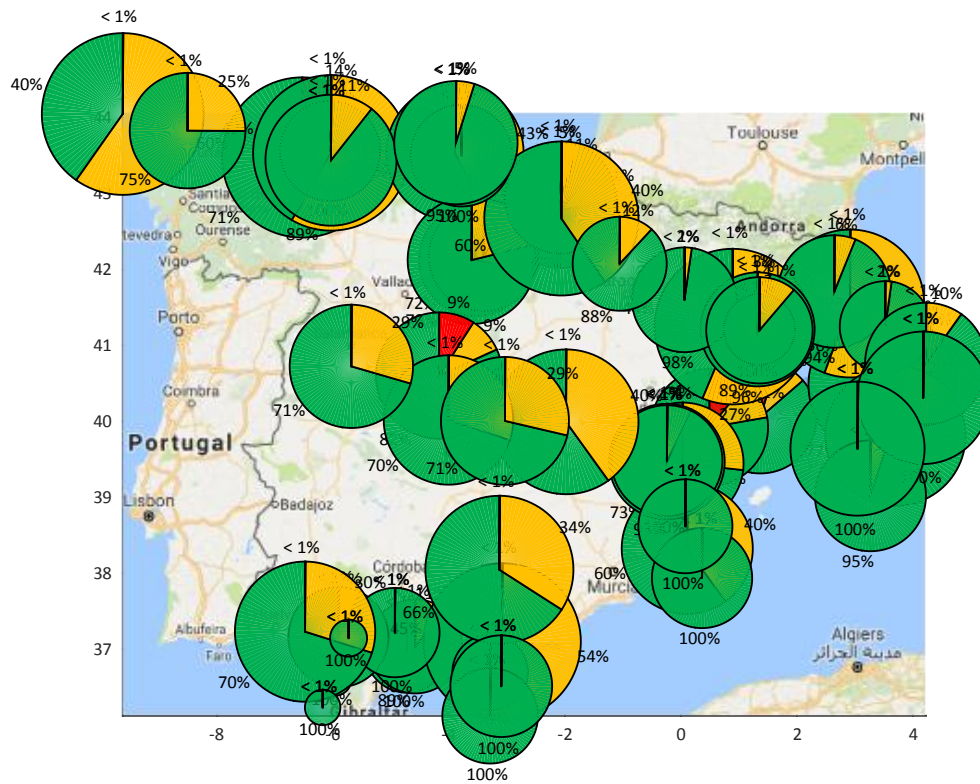


Figura A- 26 Desequilibrios de la planificación real (escenario 3)

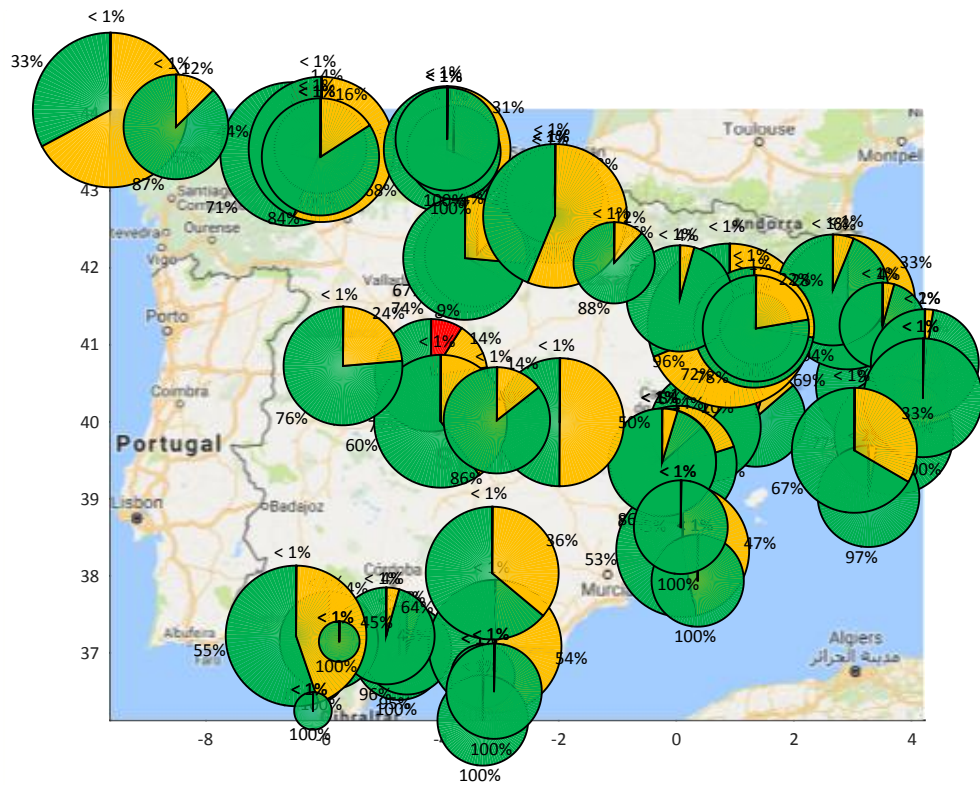


Figura A- 27 Desequilibrios de la planificación óptima (escenario 3)

A.3.4 Aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima

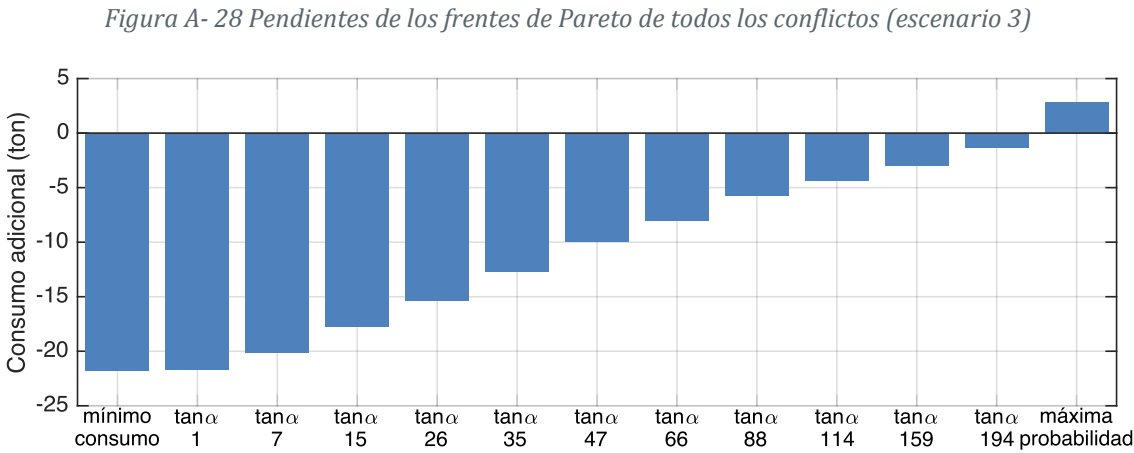
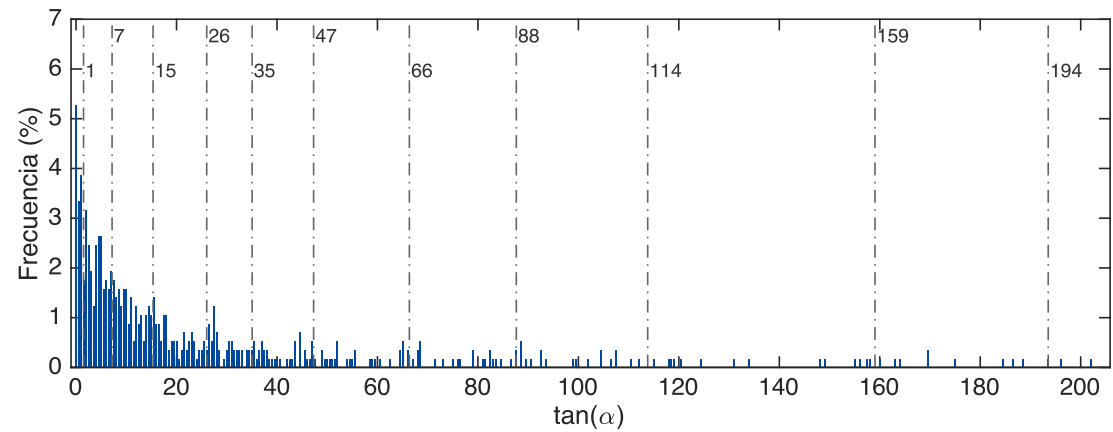


Figura A- 29 Combustible adicional para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 3)

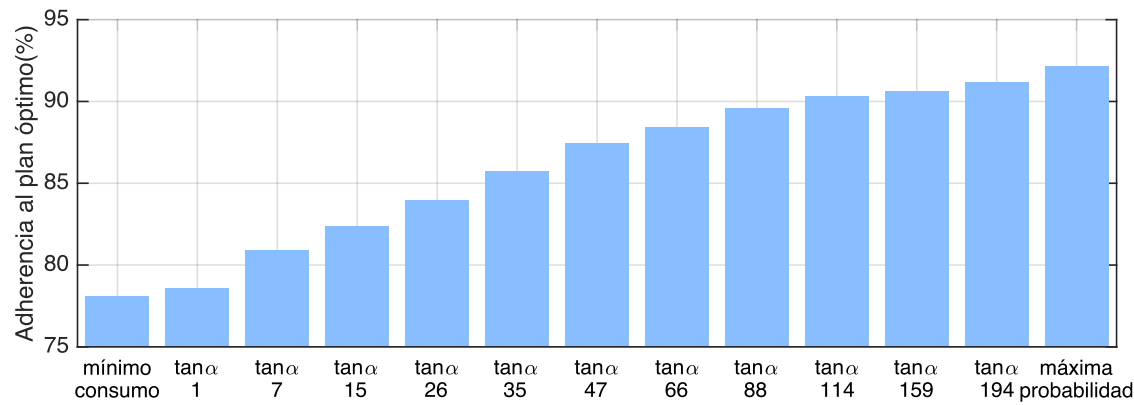


Figura A- 30 Adherencia al plan óptimo para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 3)



## A.4 Resultados al Escenario 4

### A.4.1 Aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas

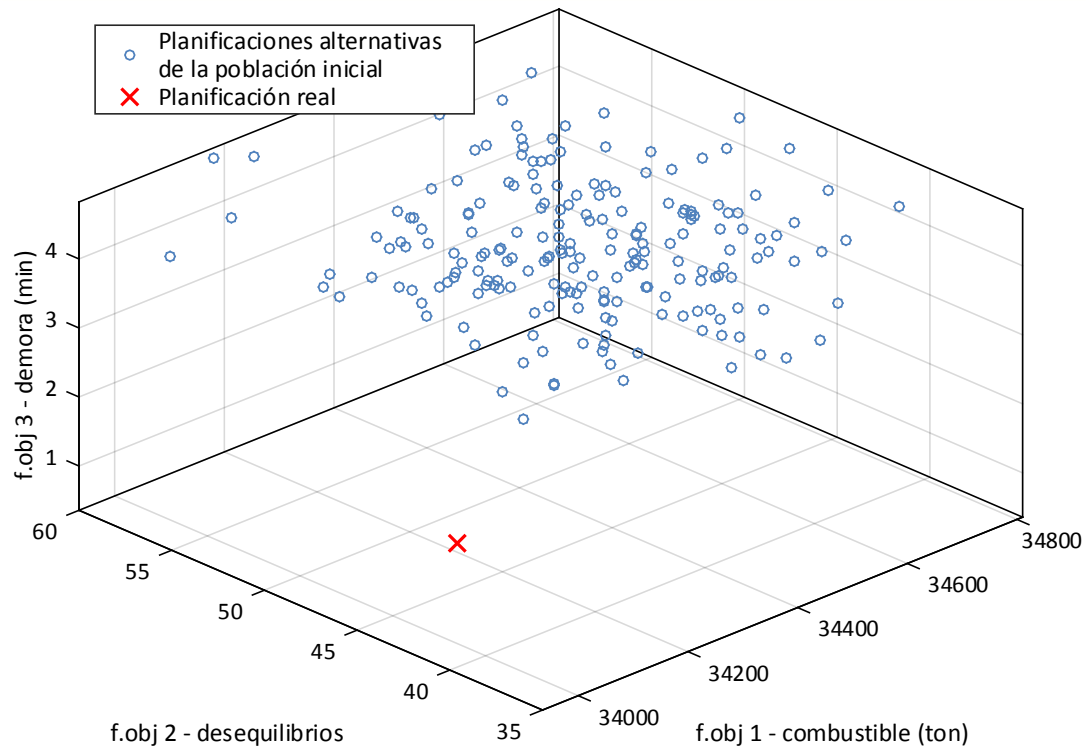


Figura A- 31 Valor de las funciones objetivas para cada individuo solución de la población inicial (escenario 4)

### A.4.2 Aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima

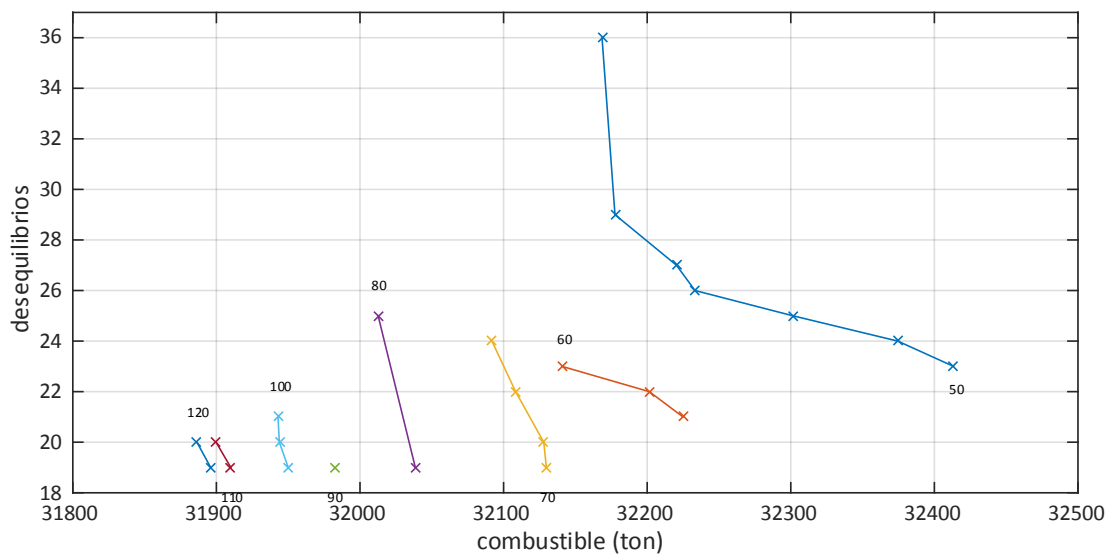


Figura A- 32 Frentes de Pareto y planificación óptima (escenario 4)

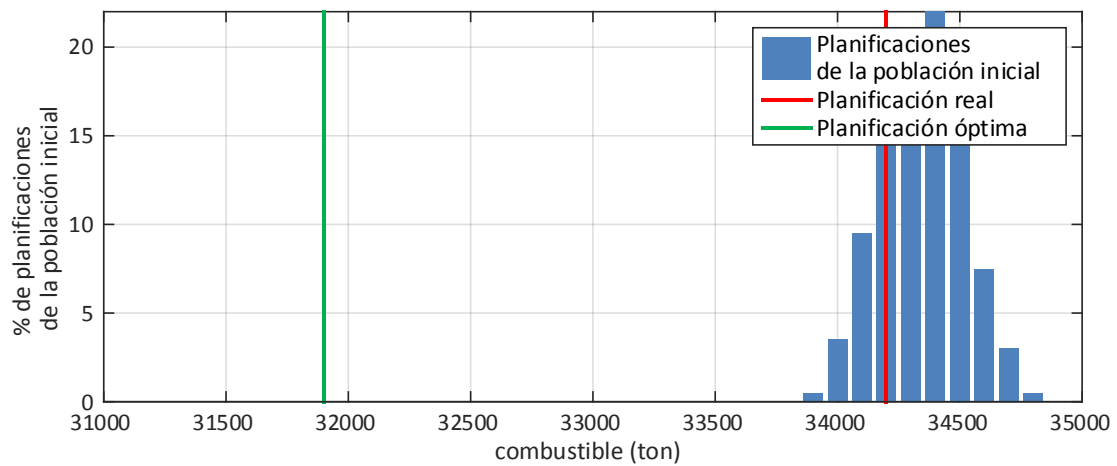


Figura A- 33 Histograma de consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 4)

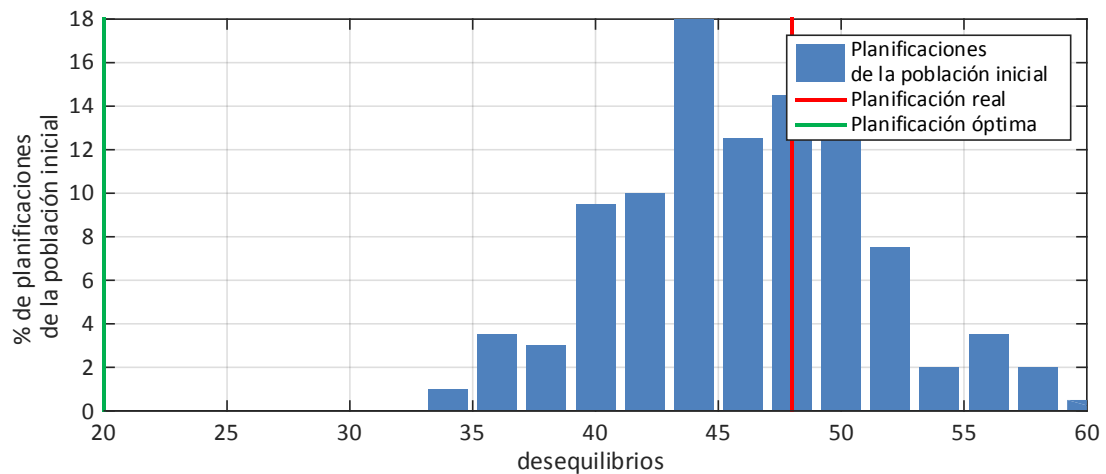


Figura A- 34 Histograma de desequilibrios de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 4)

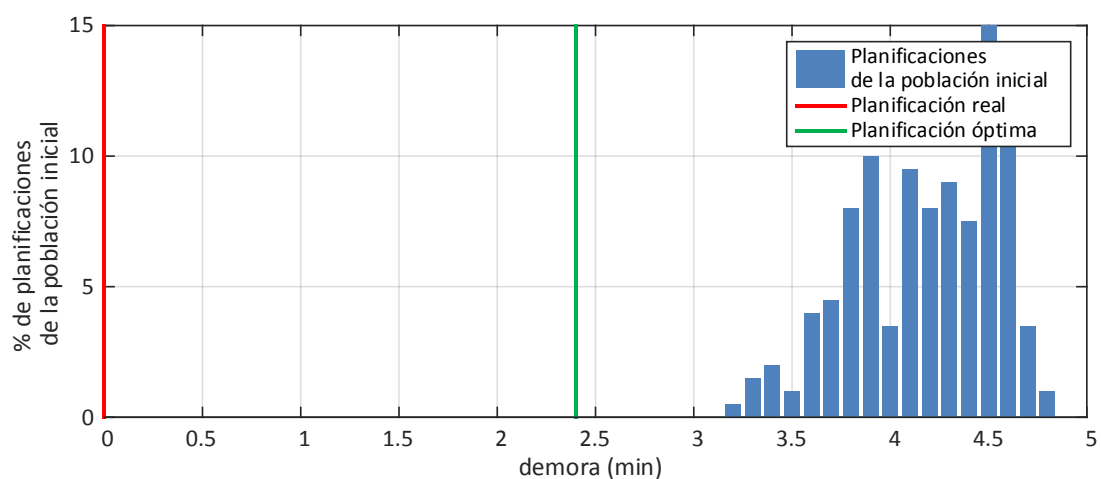


Figura A- 35 Histograma de demoras de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 4)

### A.4.3 Distribución de la demanda

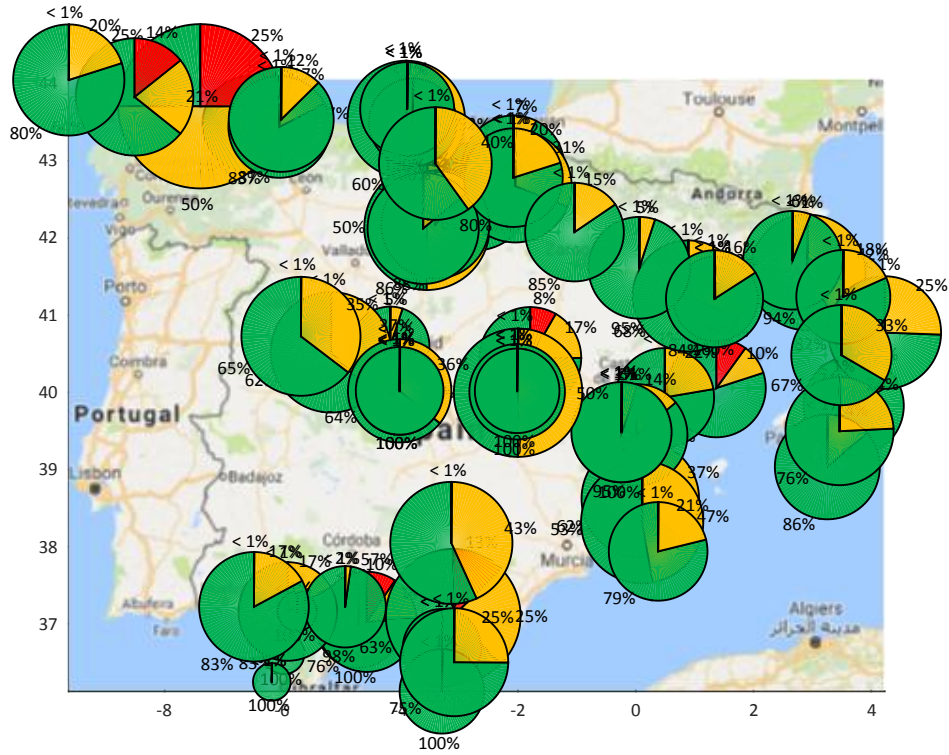


Figura A- 36 Desequilibrios de la planificación real (escenario 4)

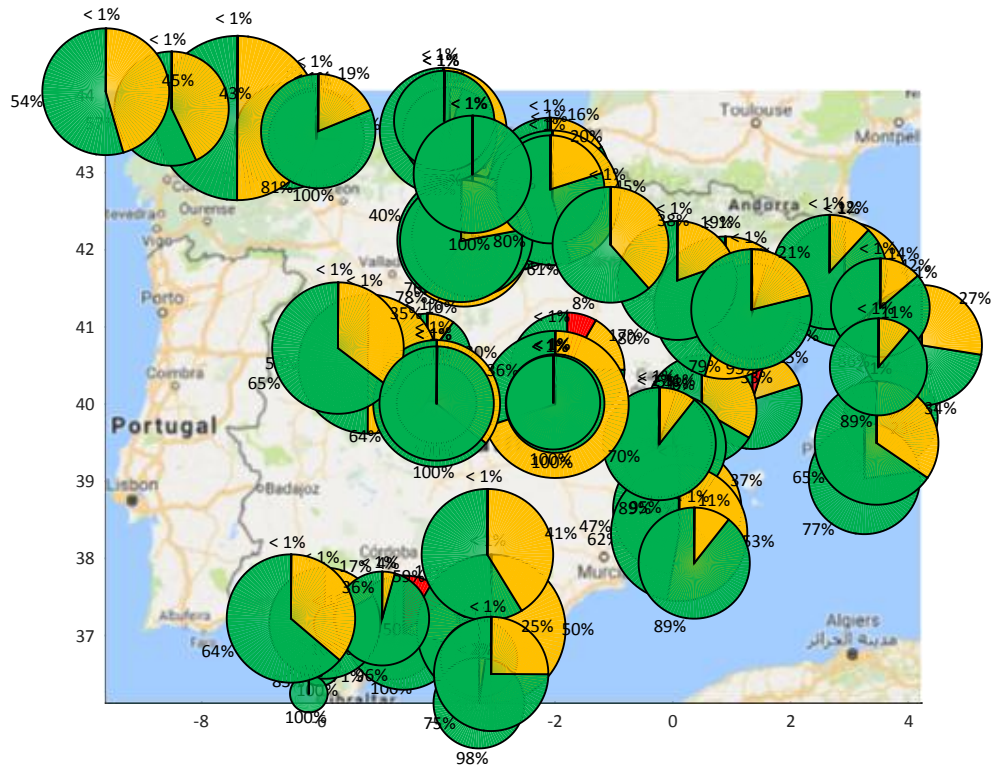


Figura A- 37 Desequilibrios de la planificación óptima (escenario 4)

A.4.4 Aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima

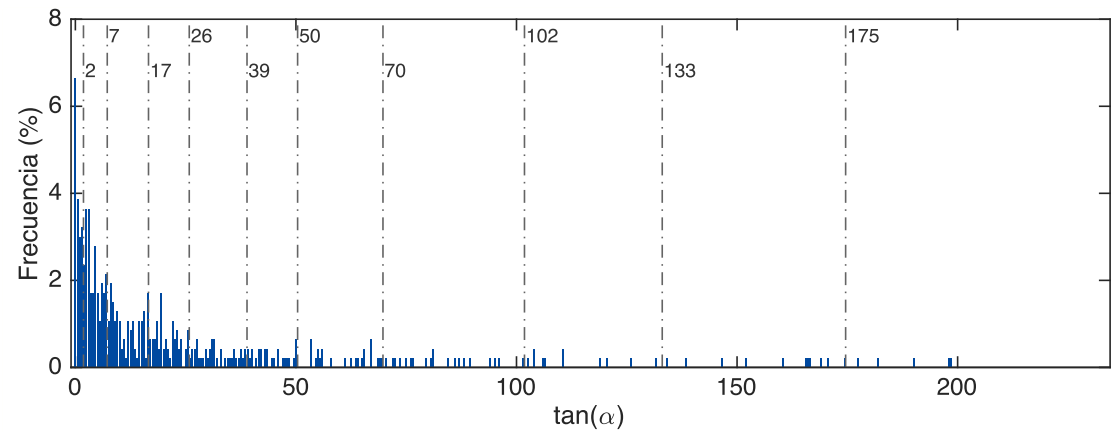


Figura A- 38 Pendientes de los frentes de Pareto de todos los conflictos (escenario 4)

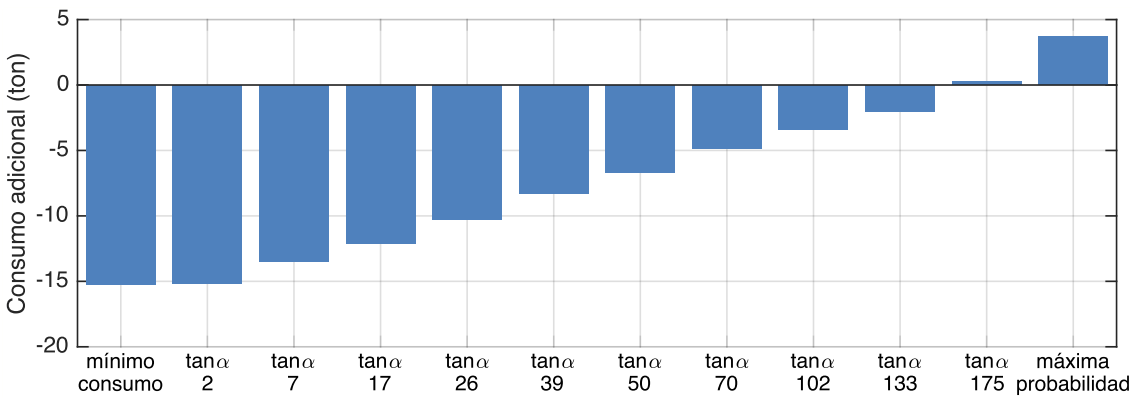


Figura A- 39 Combustible adicional para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 4)

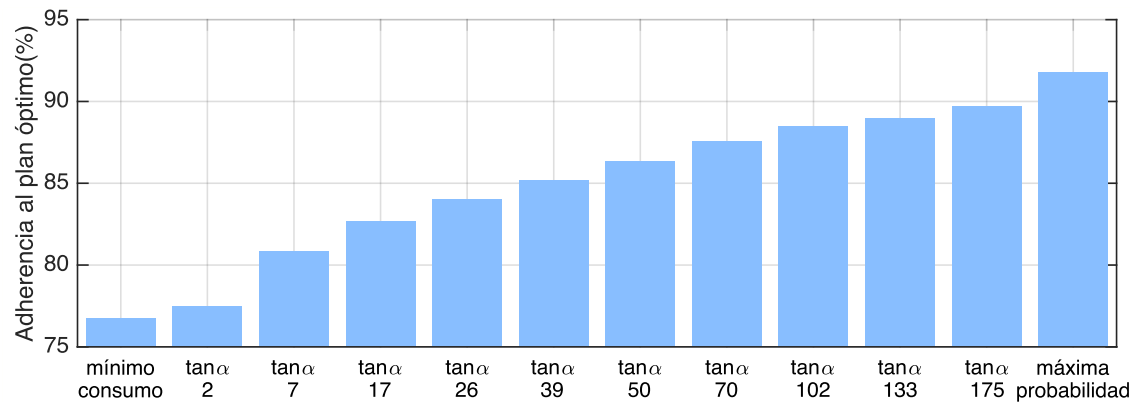


Figura A- 40 Adherencia al plan óptimo para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 4)

## A.5 Resultados al Escenario 5

### A.5.1 Aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas

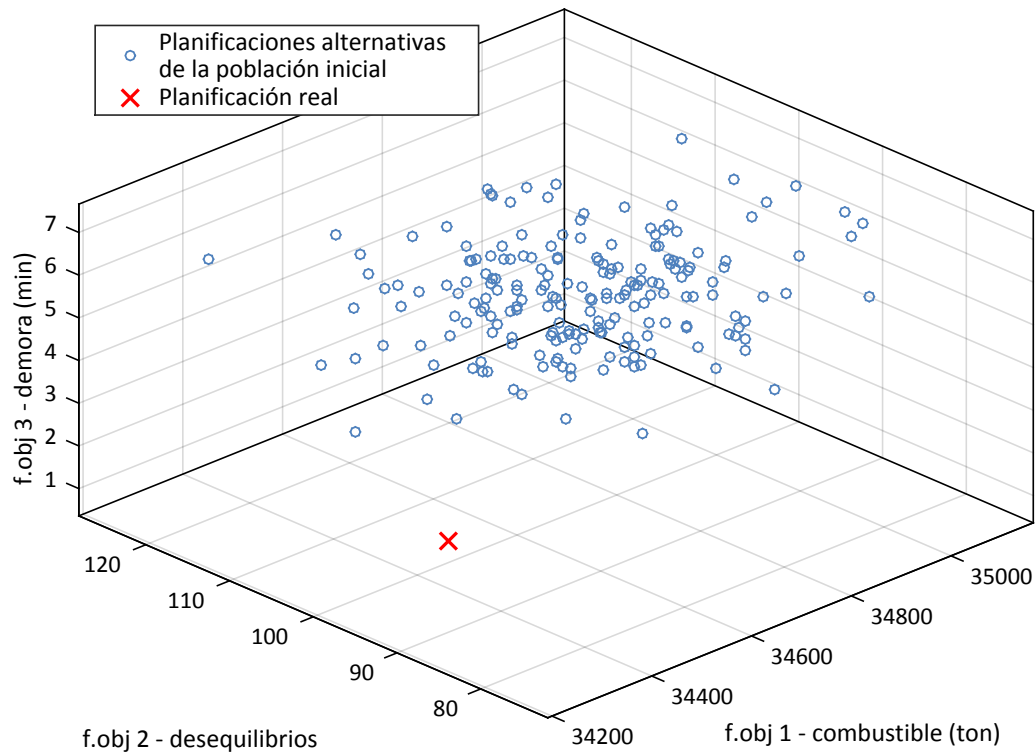


Figura A- 41 Valor de las funciones objetivas para cada individuo solución de la población inicial (escenario 5)

### A.5.2 Aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima

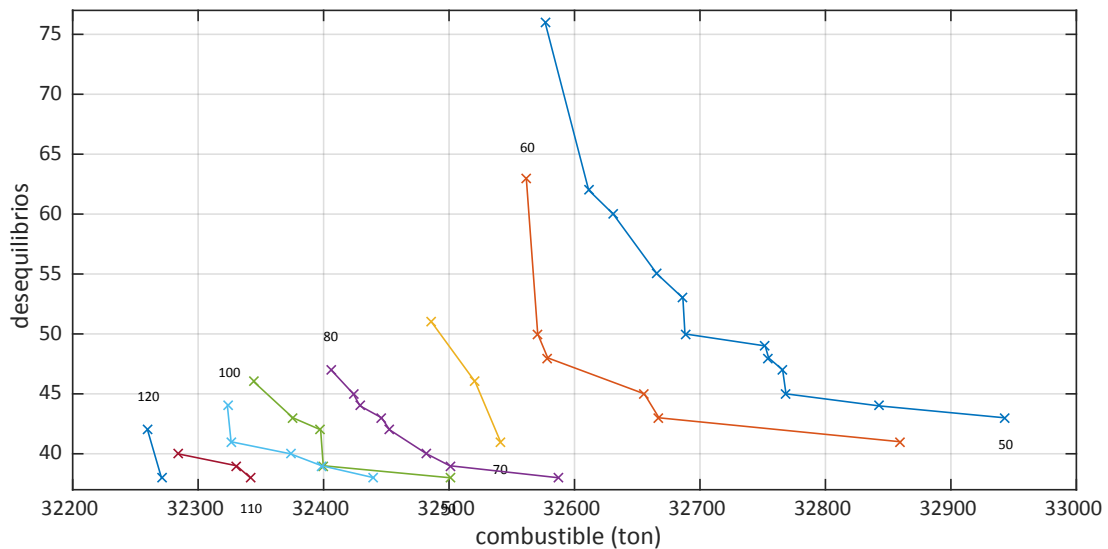


Figura A- 42 Frentes de Pareto y planificación óptima (escenario 5)

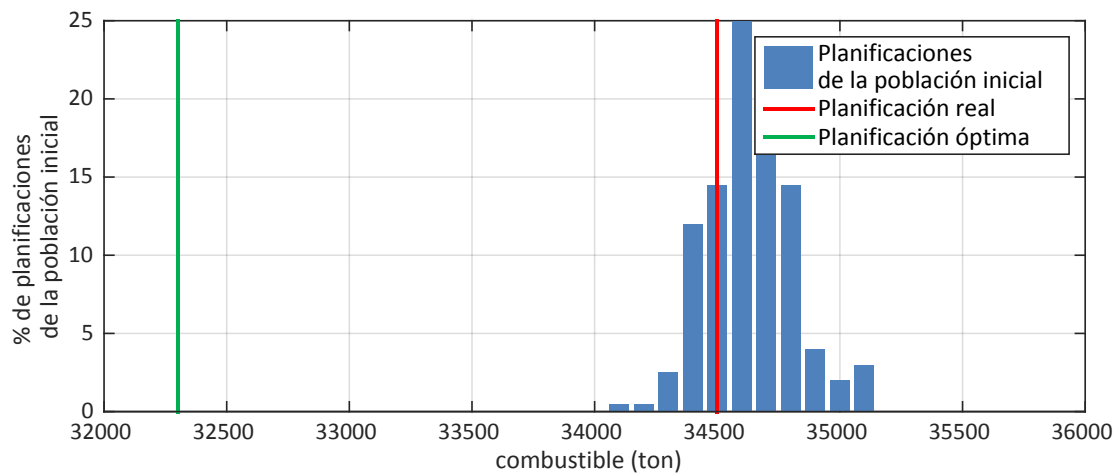


Figura A- 43 Histograma de consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 5)

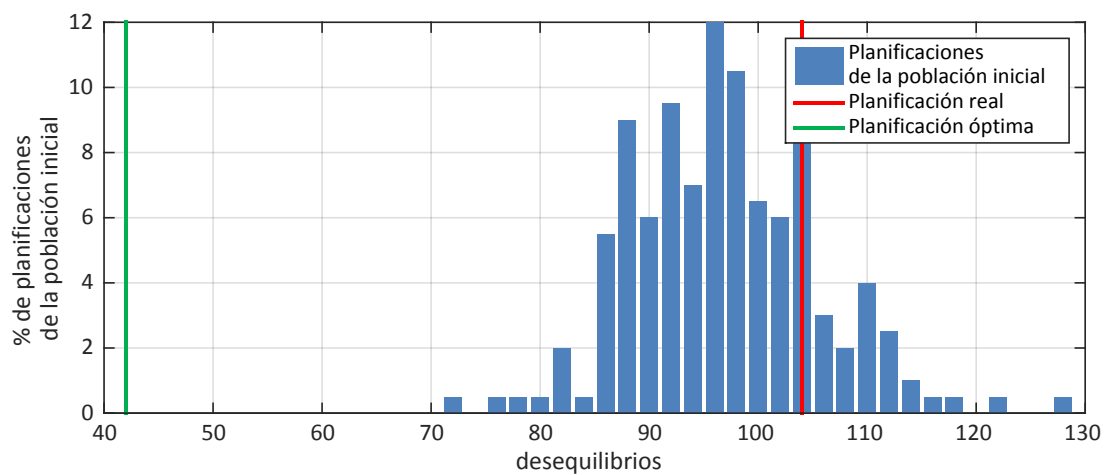


Figura A- 44 Histograma de desequilibrios de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 5)

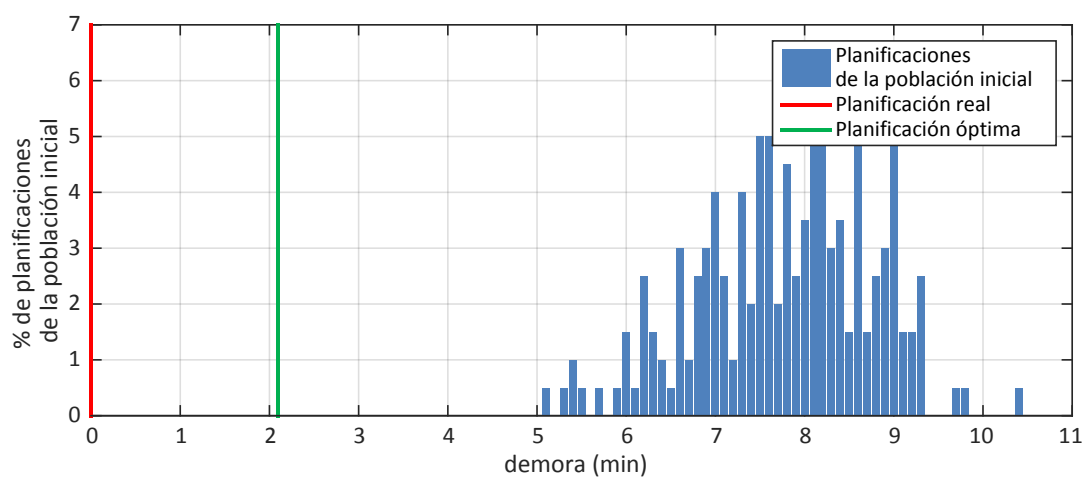


Figura A- 45 Histograma de demoras de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 5)



### A.5.3 Distribución de la demanda

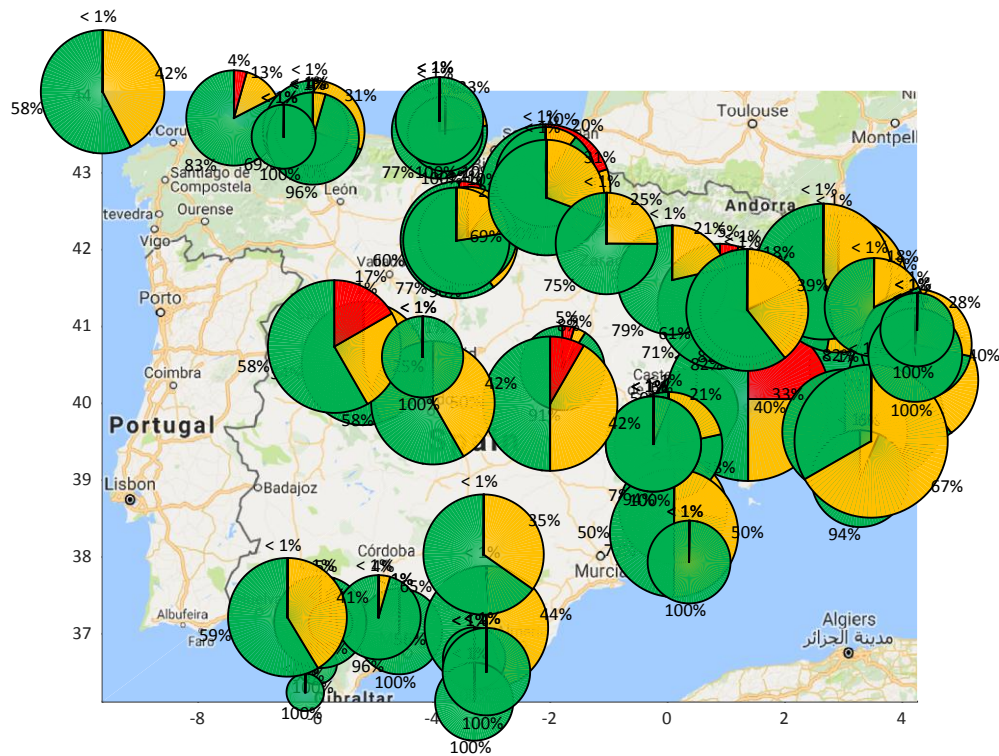


Figura A- 46 Desequilibrios de la planificación real (escenario 5)

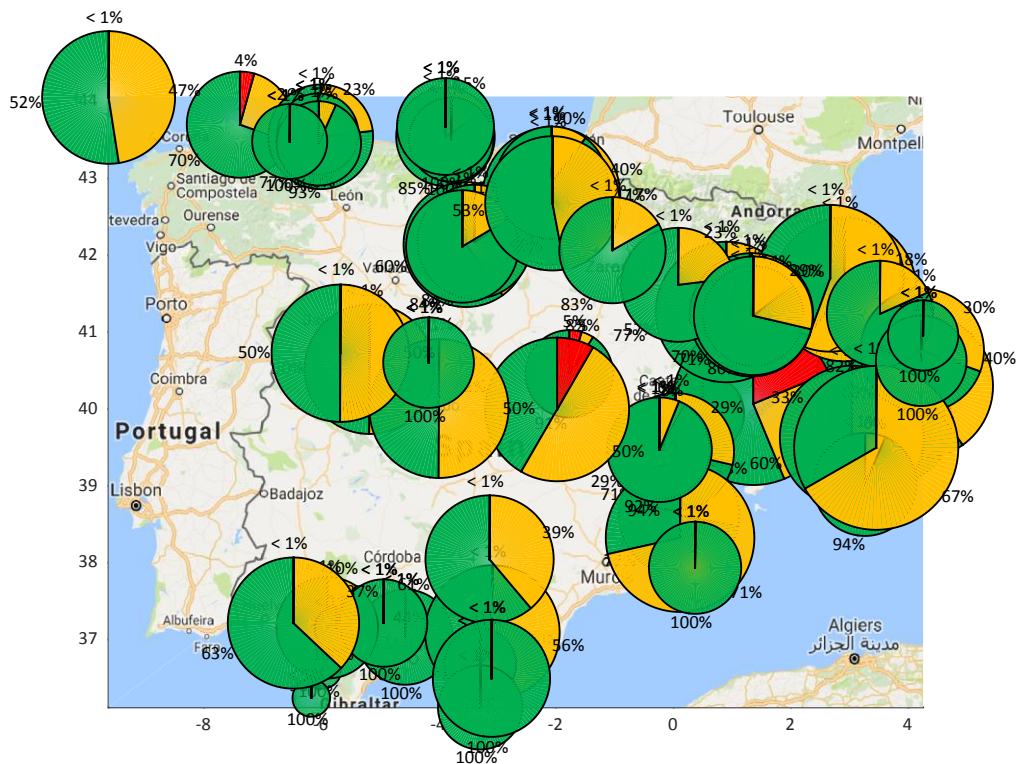


Figura A- 47 Desequilibrios de la planificación óptima (escenario 5)

A.5.4 Aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima

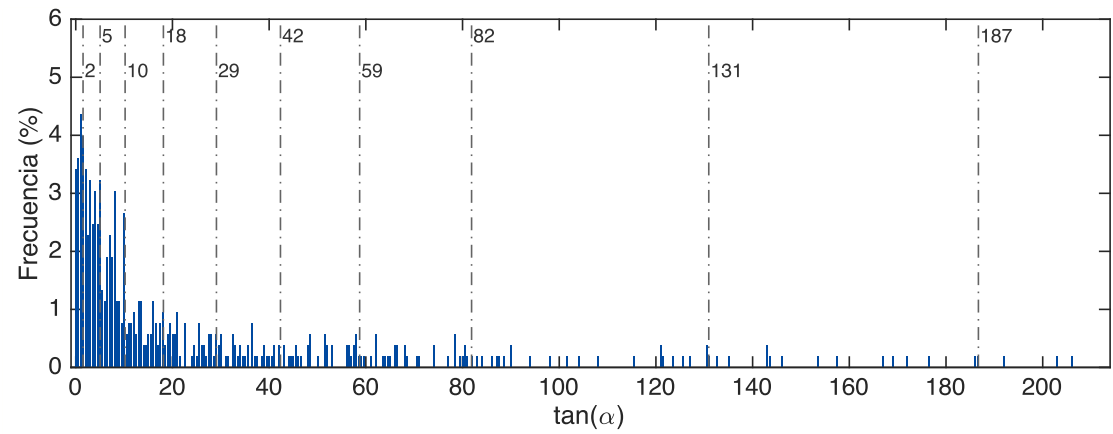


Figura A- 48 Pendientes de los frentes de Pareto de todos los conflictos (escenario 5)

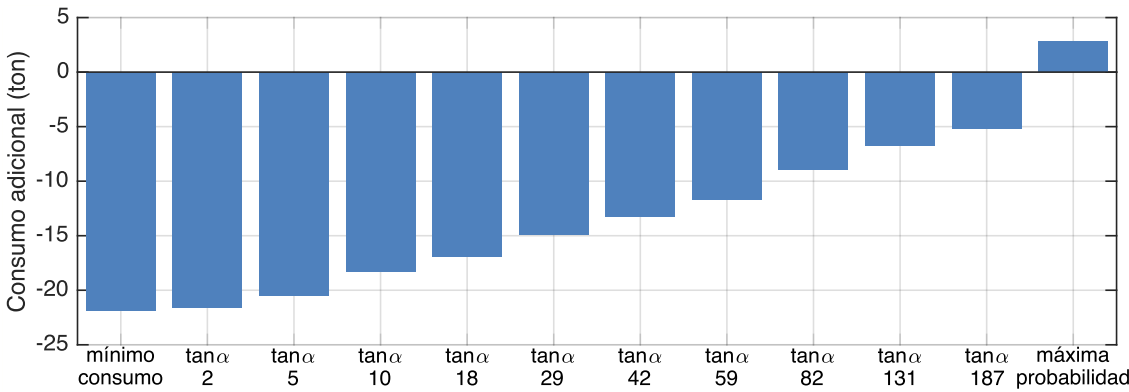


Figura A- 49 Combustible adicional para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 5)

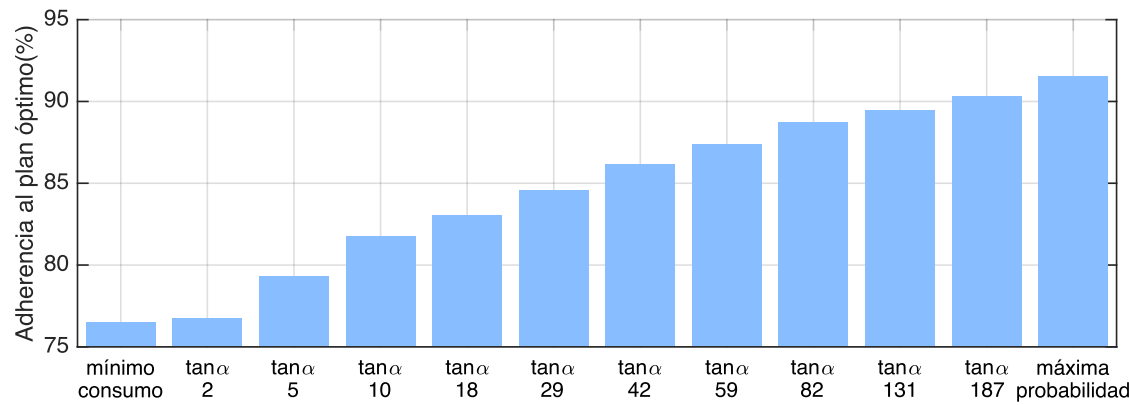


Figura A- 50 Adherencia al plan óptimo para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 5)



## A.6 Resultados al Escenario 6

### A.6.1 Aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas

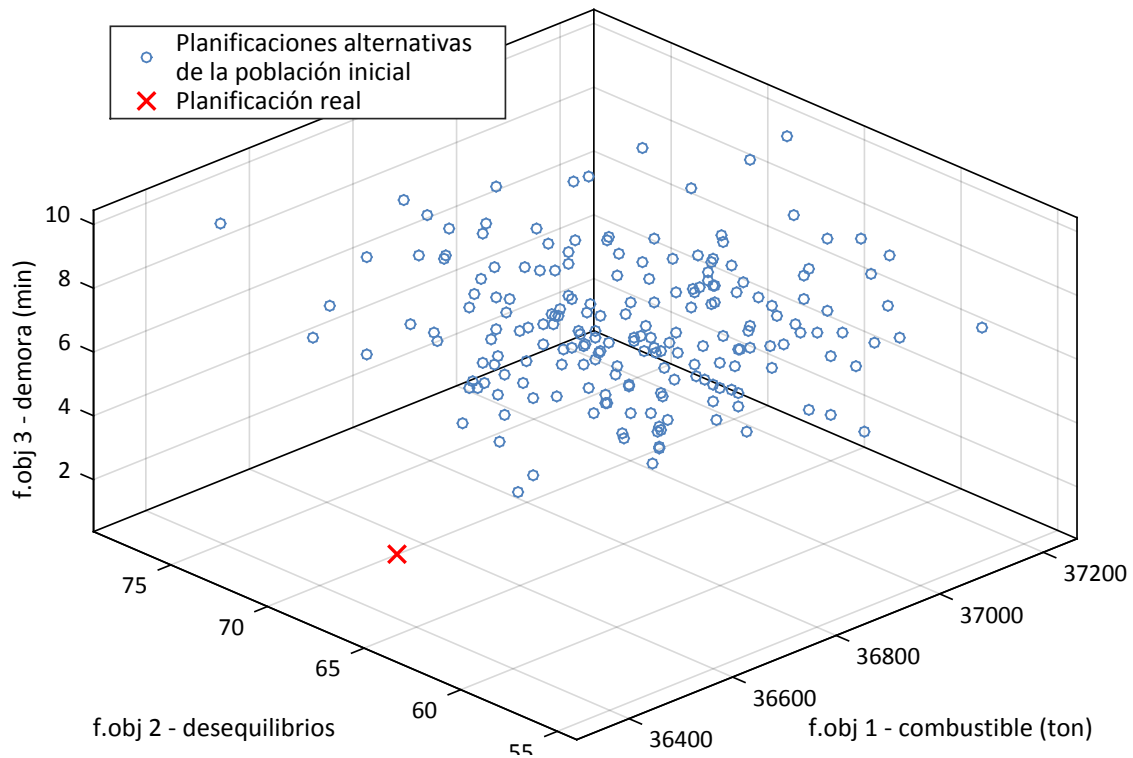


Figura A- 51 Valor de las funciones objetivos para cada individuo solución de la población inicial (escenario 6)

### A.6.2 Aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima

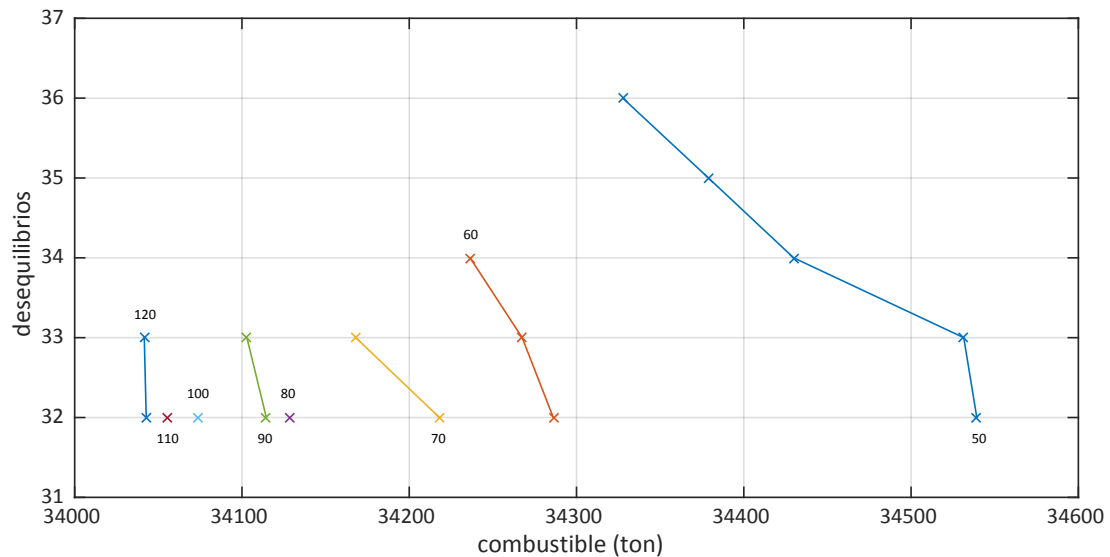


Figura A- 52 Frentes de Pareto y planificación óptima (escenario 6)

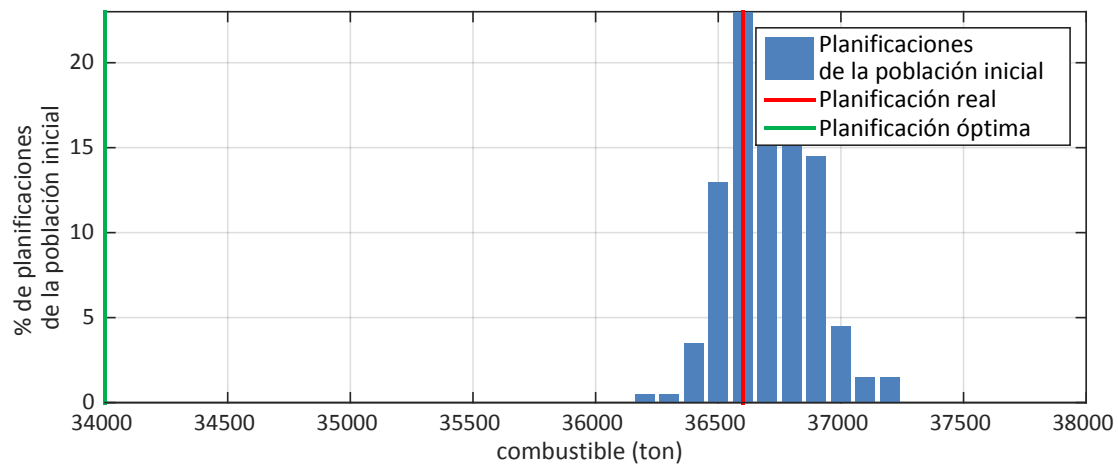


Figura A- 53 Histograma de consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 6)

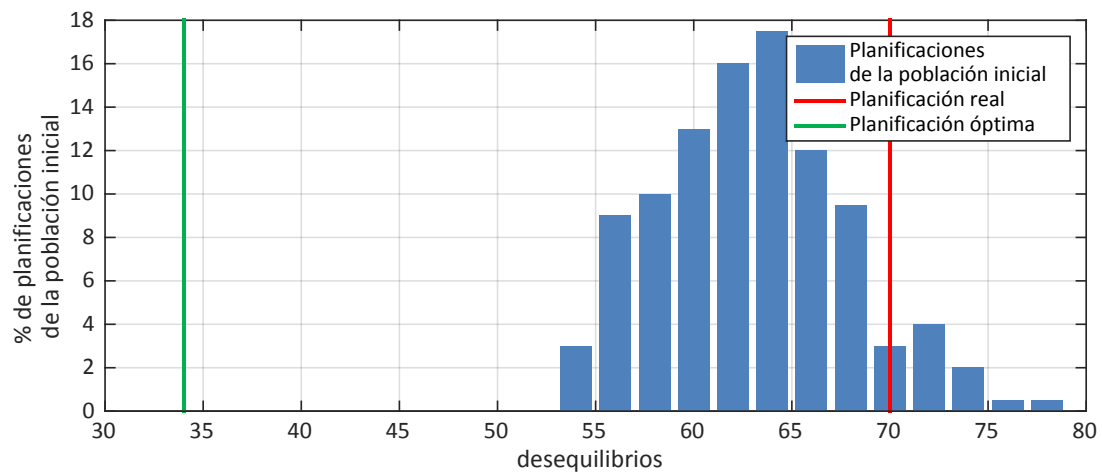


Figura A- 54 Histograma de desequilibrios de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 6)

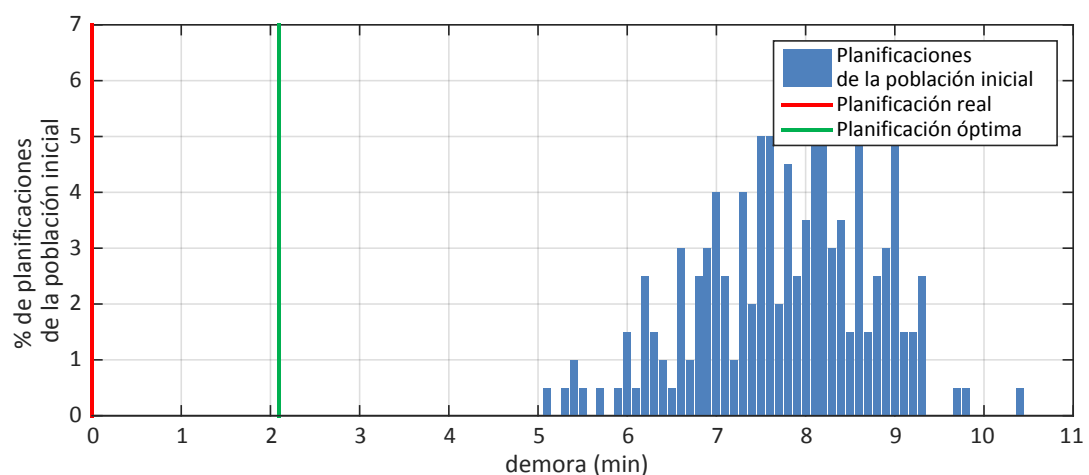


Figura A- 55 Histograma de demoras de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 6)

### A.6.3 Distribución de la demanda

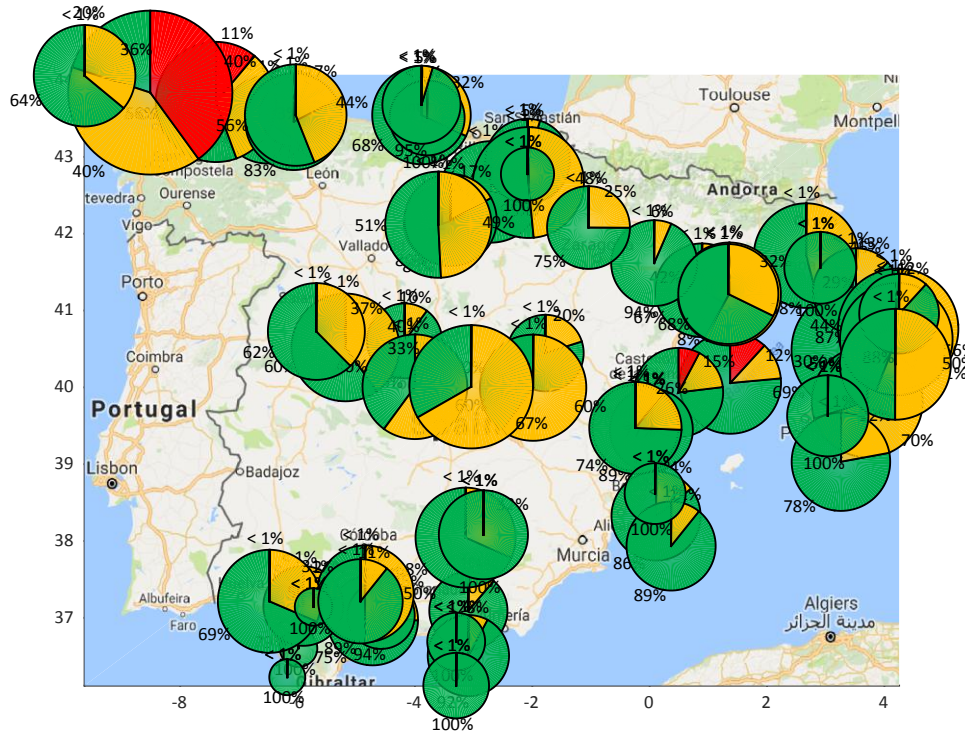


Figura A- 56 Desequilibrios de la planificación real (escenario 6)

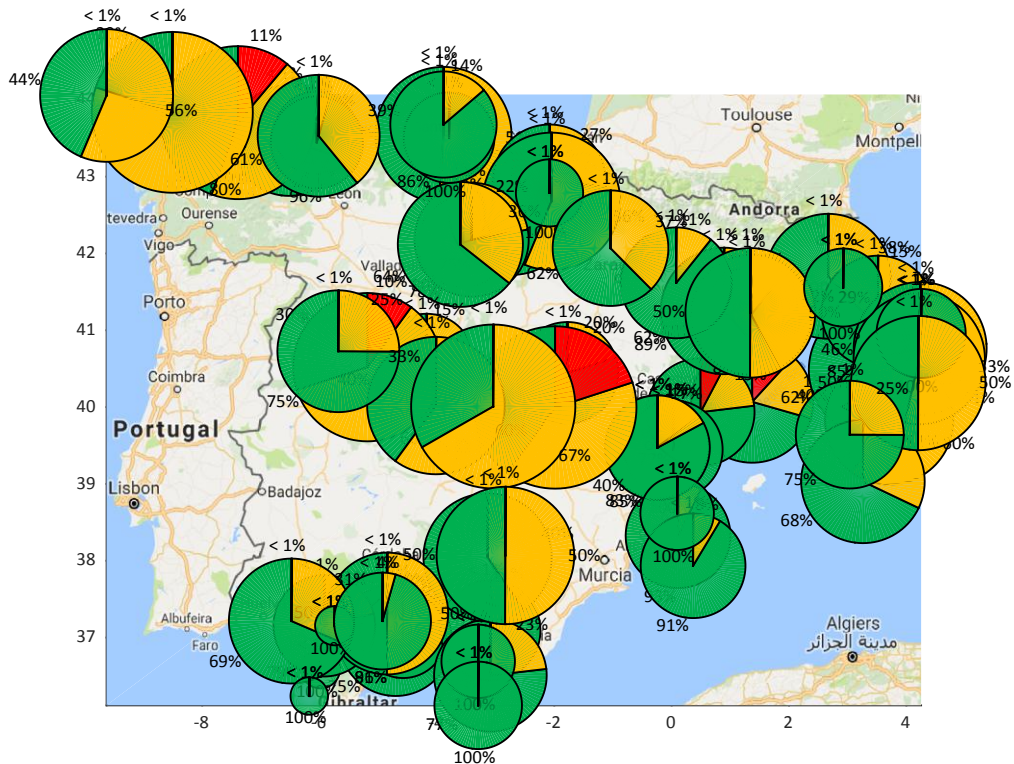


Figura A- 57 Desequilibrios de la planificación óptima (escenario 6)

A.6.4 Aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima

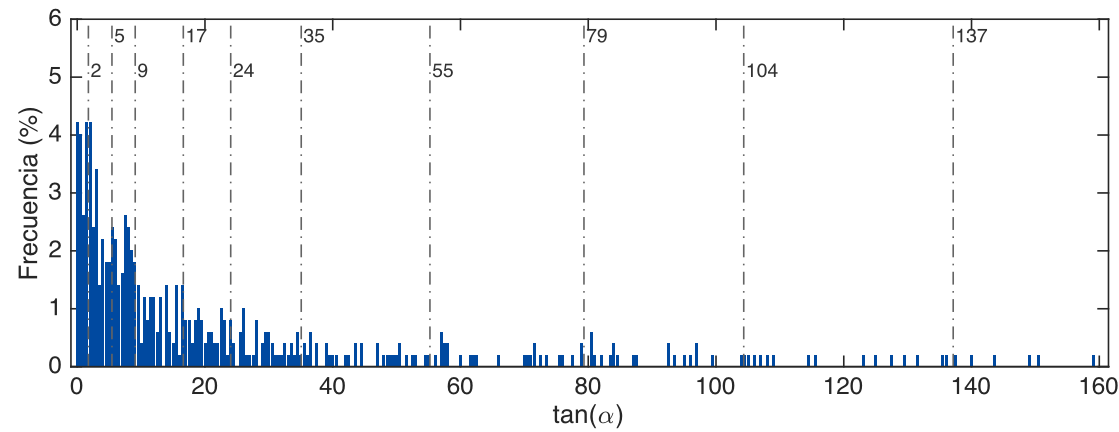


Figura A- 58 Pendientes de los frentes de Pareto de todos los conflictos (escenario 6)

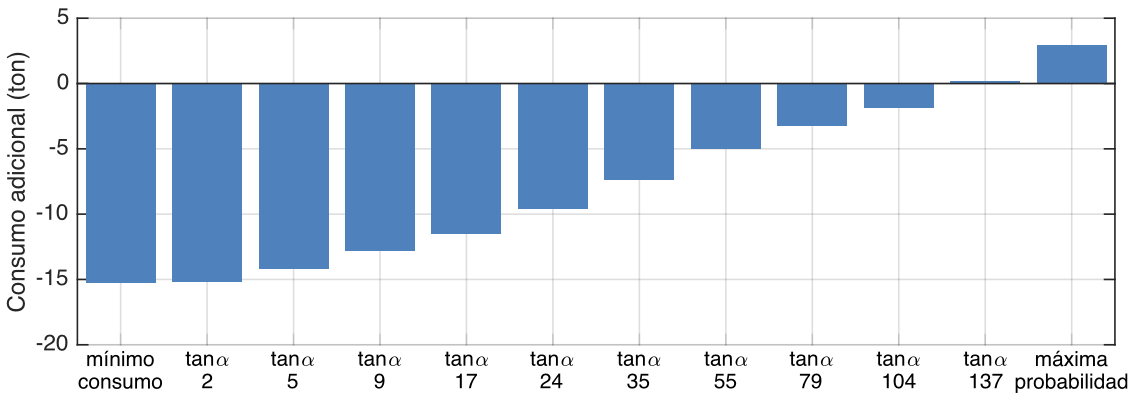


Figura A- 59 Combustible adicional para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 6)

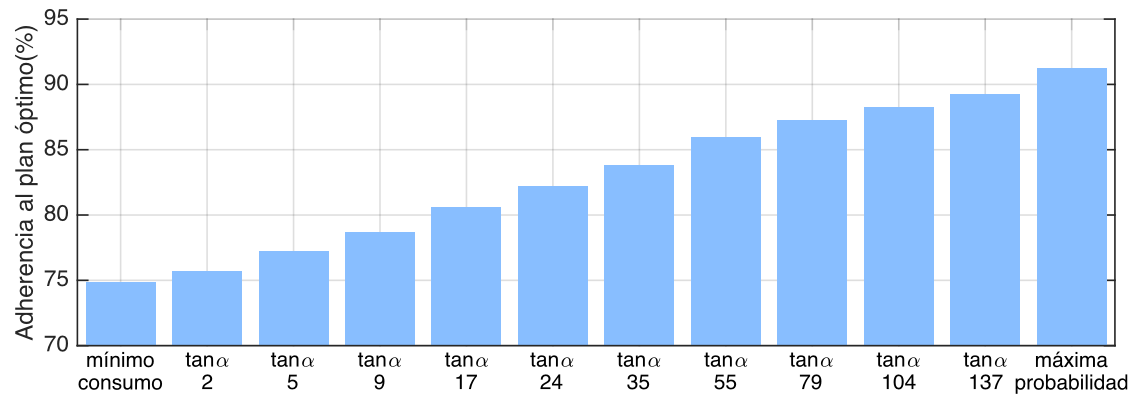


Figura A- 60 Adherencia al plan óptimo para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 6)

## A.7 Resultados al Escenario 7

### A.7.1 Aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas

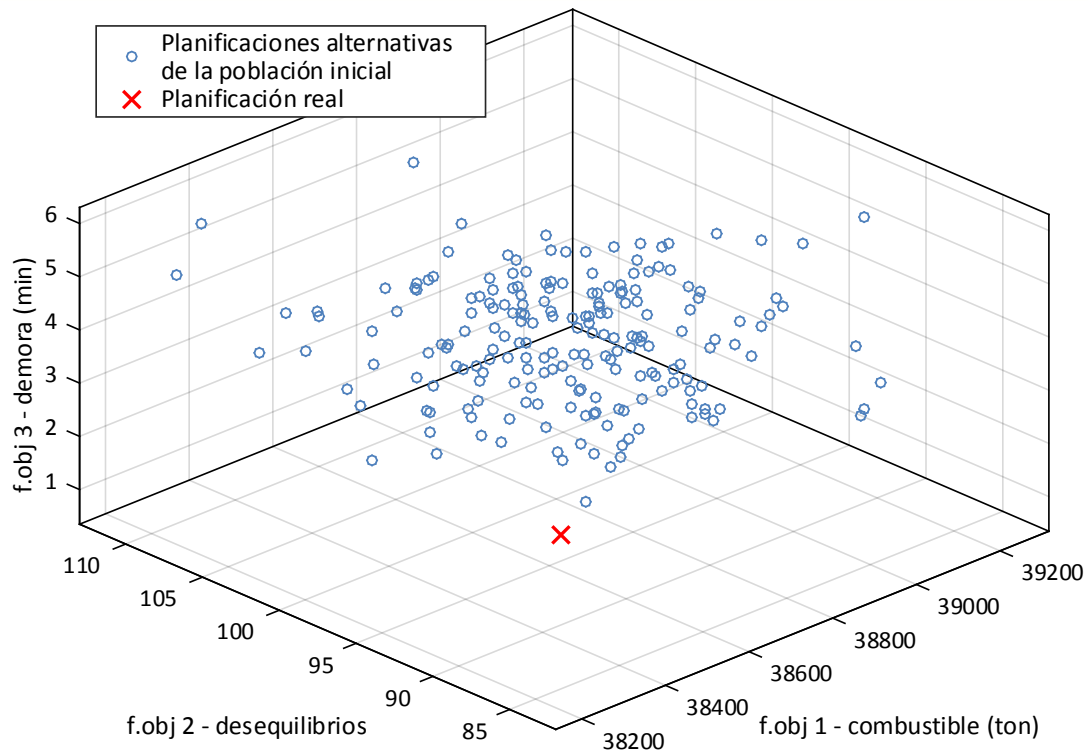


Figura A- 61 Valor de las funciones objetivas para cada individuo solución de la población inicial (escenario 7)

### A.7.2 Aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima

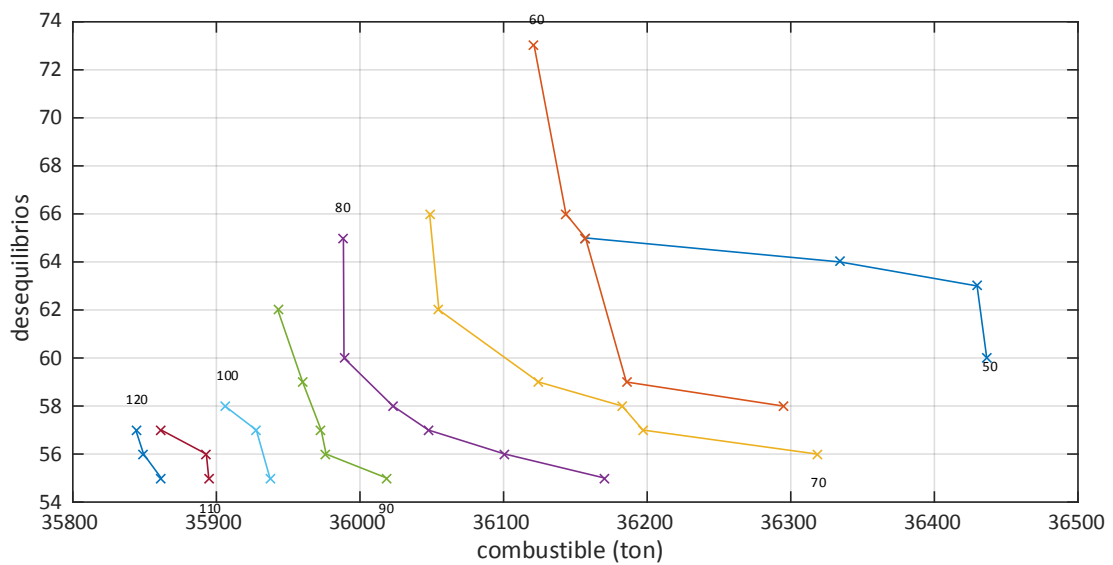


Figura A- 62 Frentes de Pareto y planificación óptima (escenario 7)

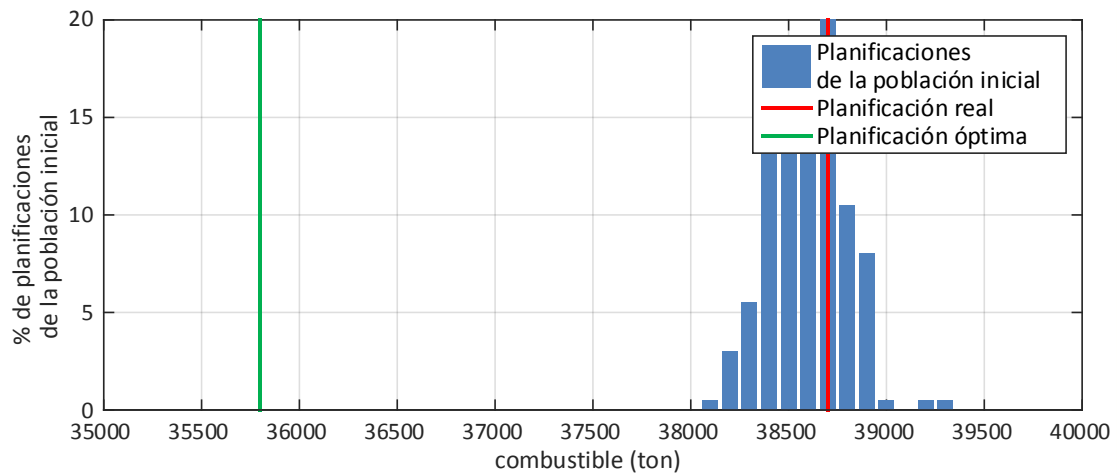


Figura A- 63 Histograma de consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 7)

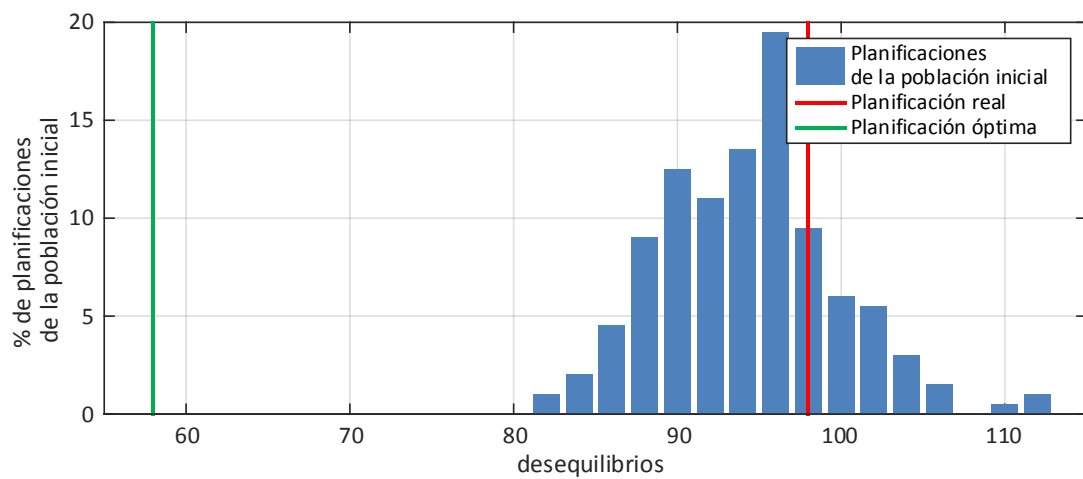


Figura A- 64 Histograma de desequilibrios de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 7)

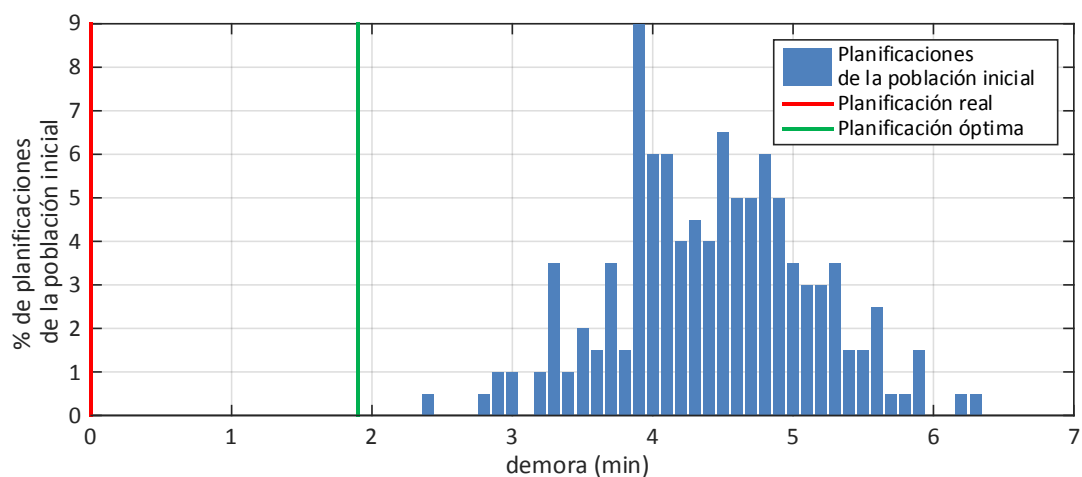


Figura A- 65 Histograma de demoras de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 7)



### A.7.3 Distribución de la demanda

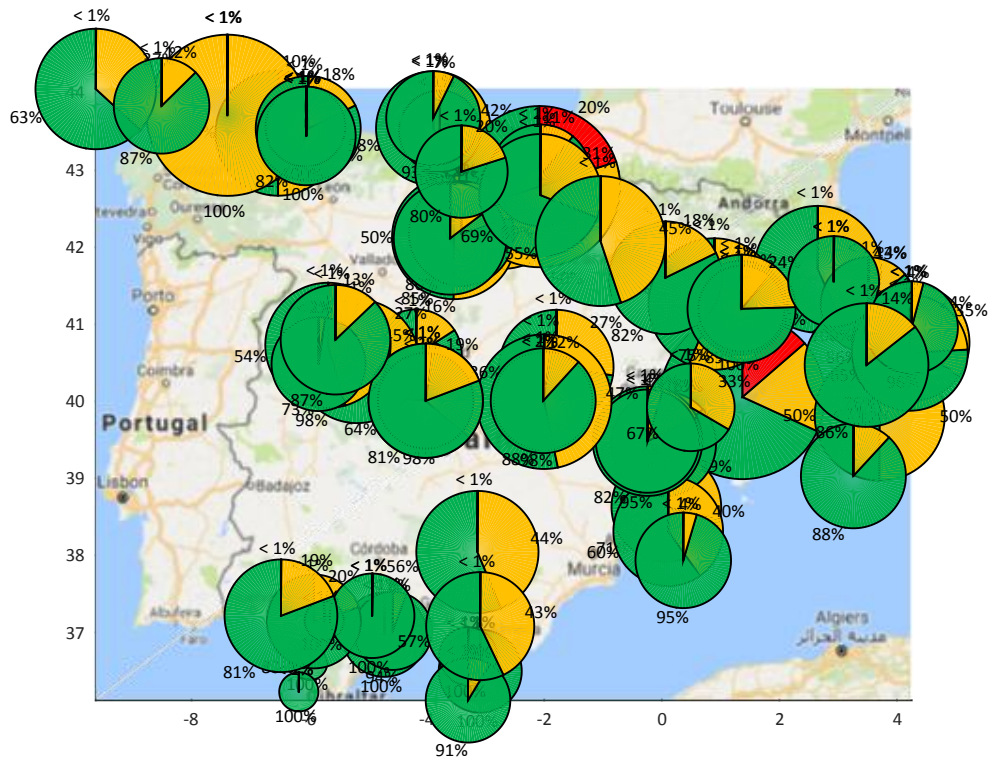


Figura A- 66 Desequilibrios de la de planificación real (escenario 7)

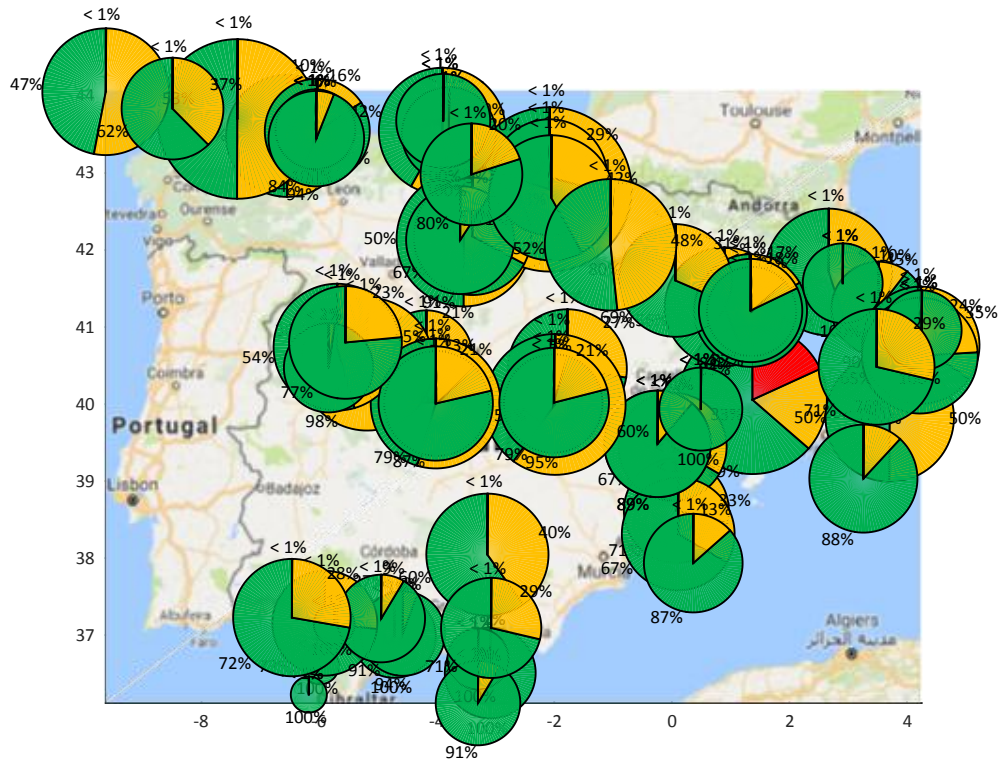


Figura A- 67 Desequilibrios de la planificación óptima (escenario 7)

A.7.4 Aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima

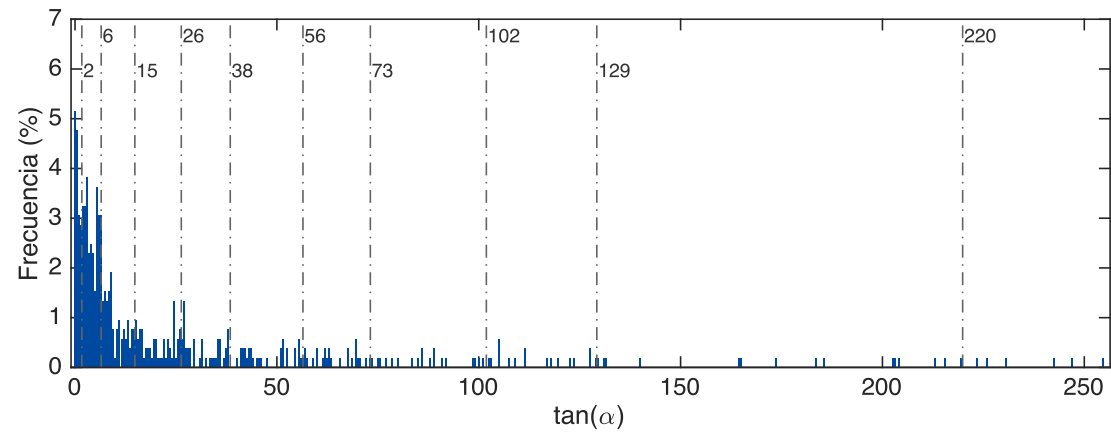


Figura A- 68 Pendientes de los frentes de Pareto de todos los conflictos (escenario 7)

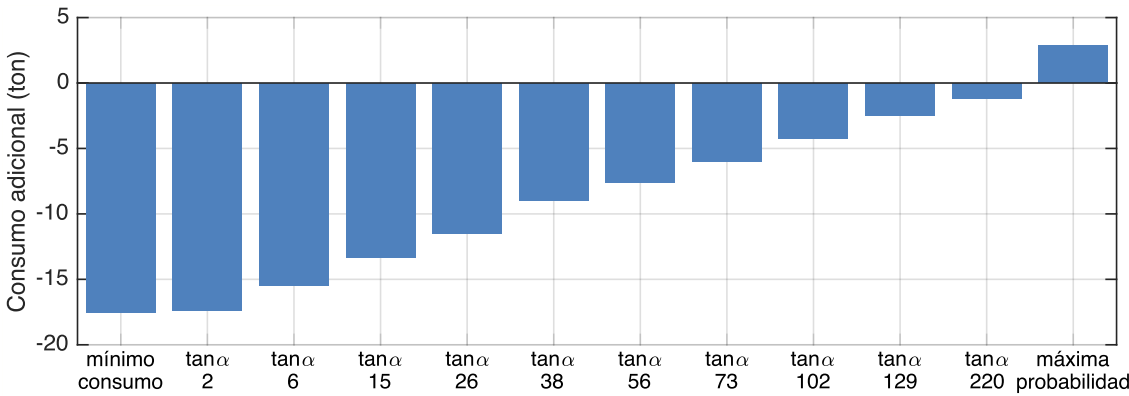


Figura A- 69 Combustible adicional para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 7)

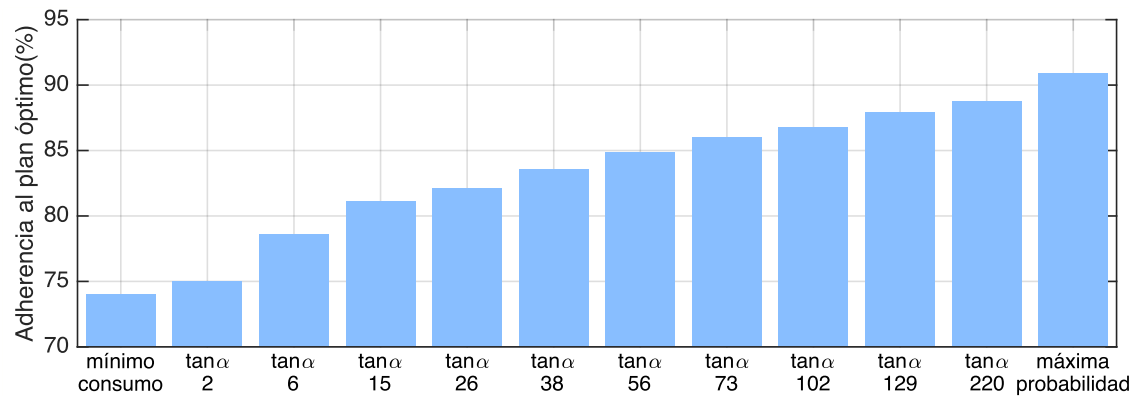


Figura A- 70 Adherencia al plan óptimo para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 7)



## A.8 Resultados al Escenario 8

### A.8.1 Aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas

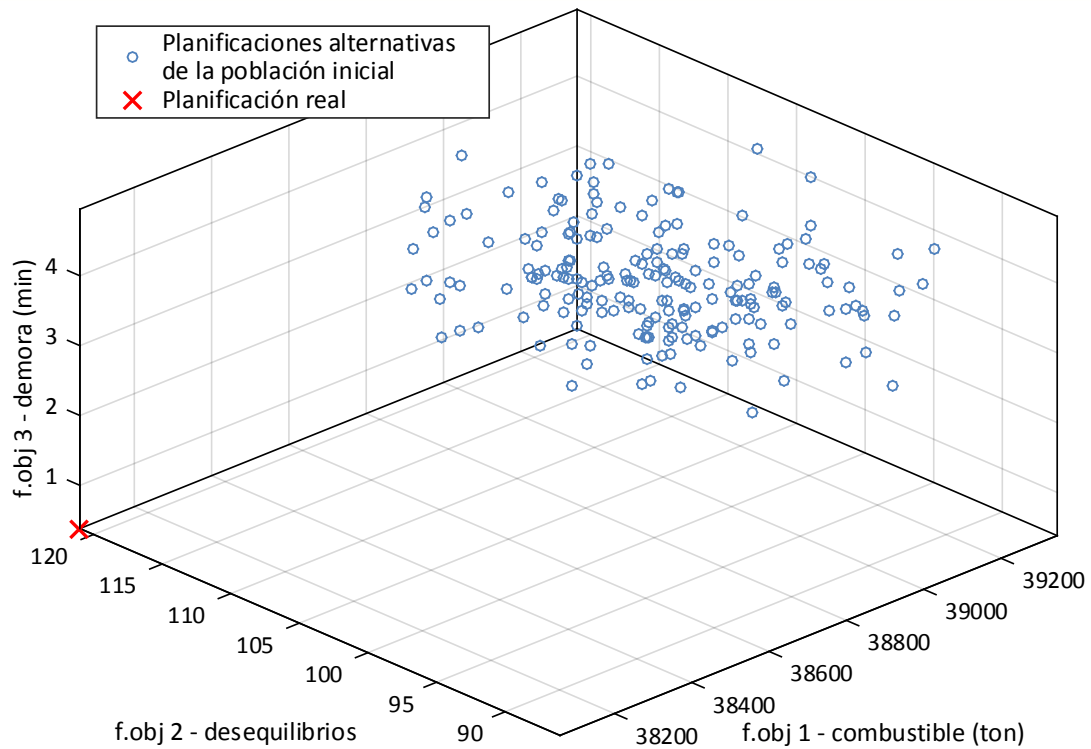


Figura A- 71 Valor de las funciones objetivos para cada individuo solución de la población inicial (escenario 8)

### A.8.2 Aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima

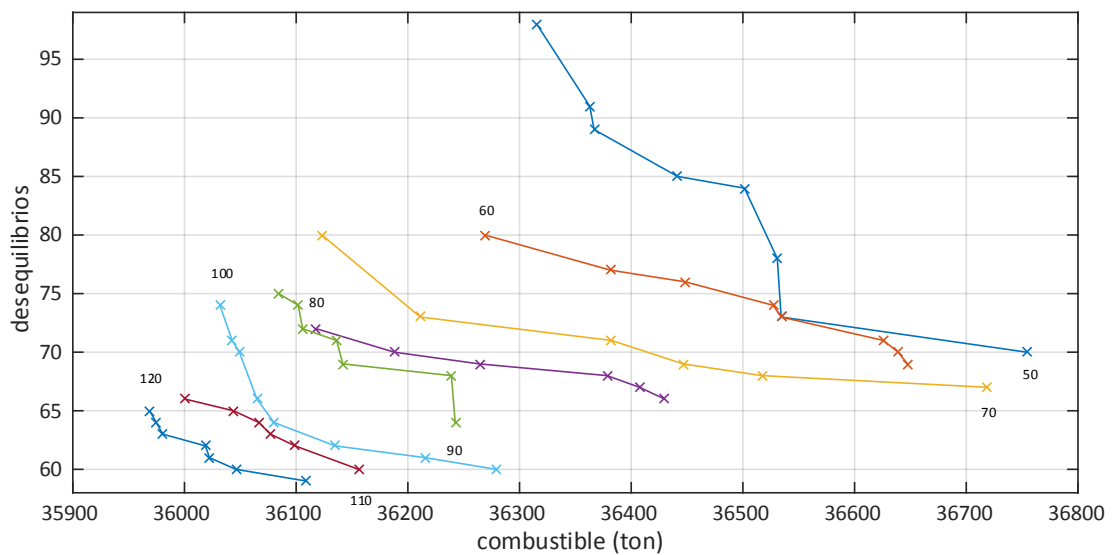


Figura A- 72 Frentes de Pareto y planificación óptima (escenario 8)

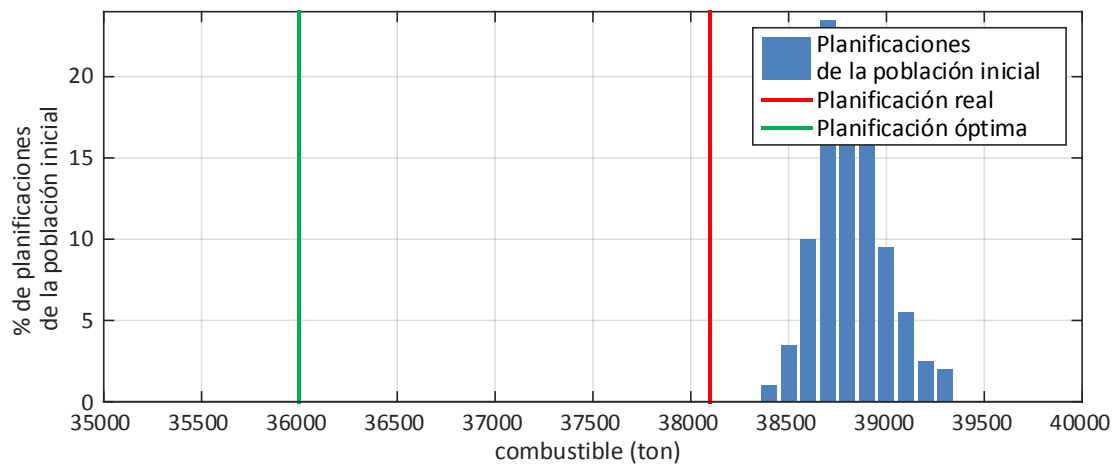


Figura A- 73 Histograma de consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 8)

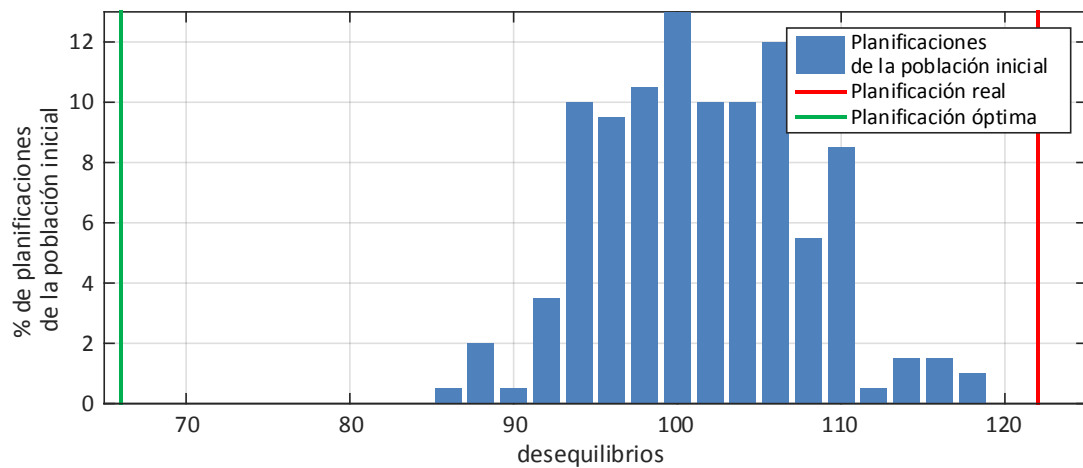


Figura A- 74 Histograma de desequilibrios de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 8)

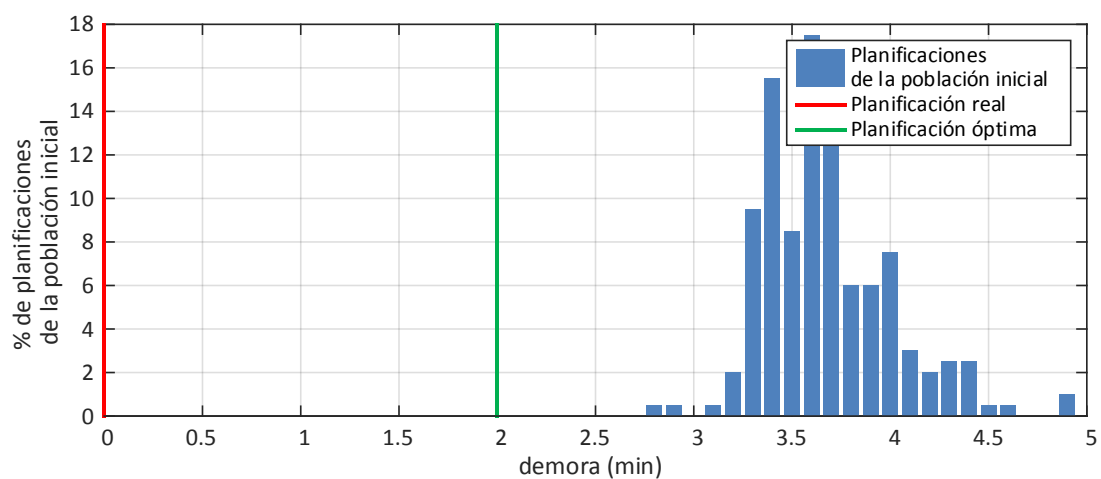


Figura A- 75 Histograma de demoras de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 8)

### A.8.3 Distribución de la demanda

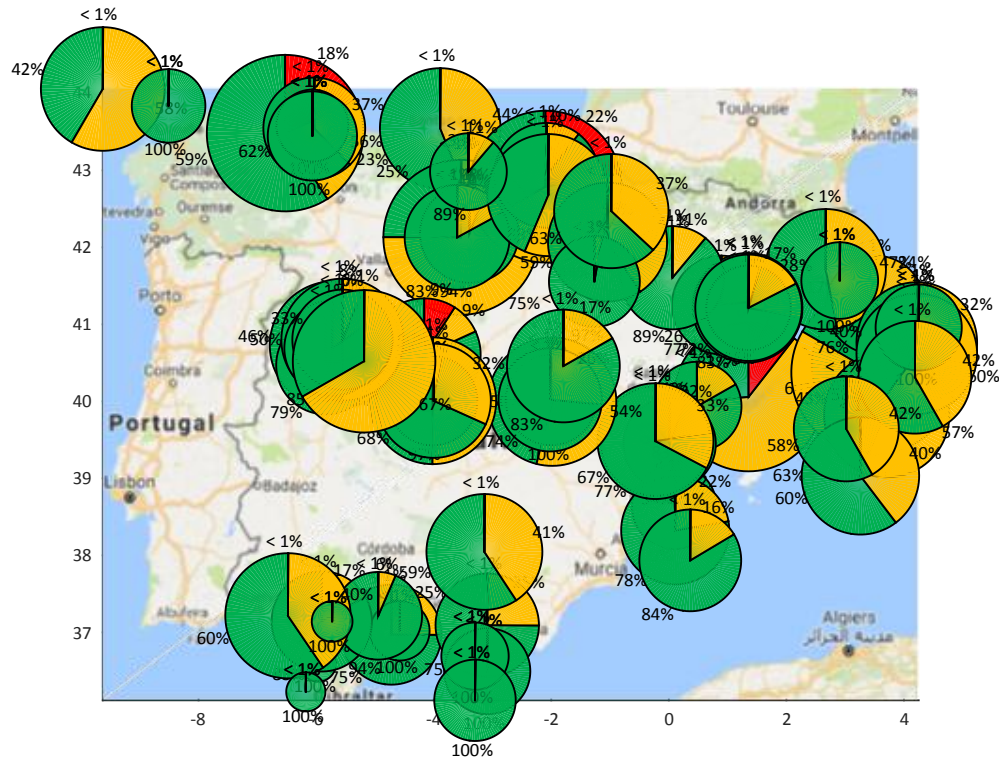


Figura A- 76 Desequilibrios de la planificación real (escenario 8)

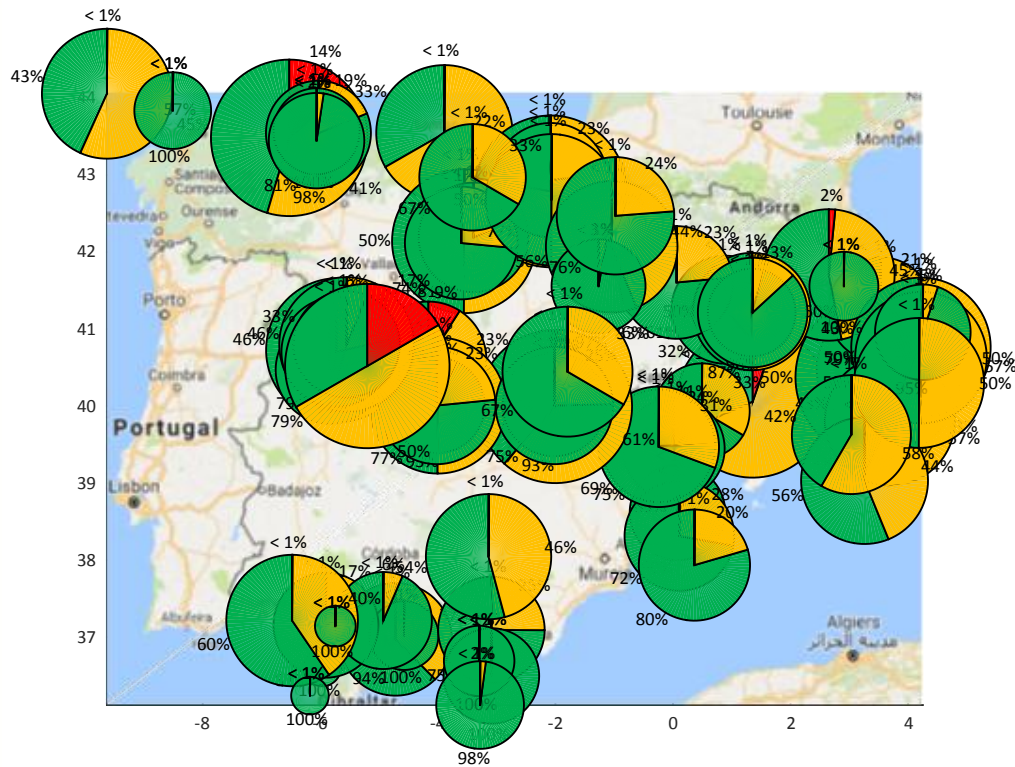


Figura A- 77 Desequilibrios de la planificación óptima (escenario 8)

A.8.4 Aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima

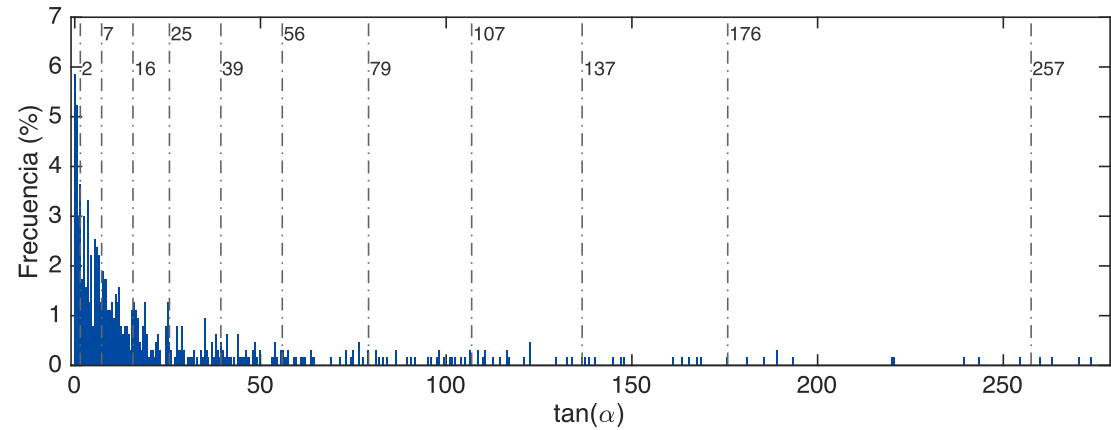


Figura A- 78 Pendientes de los frentes de Pareto de todos los conflictos (escenario 8)

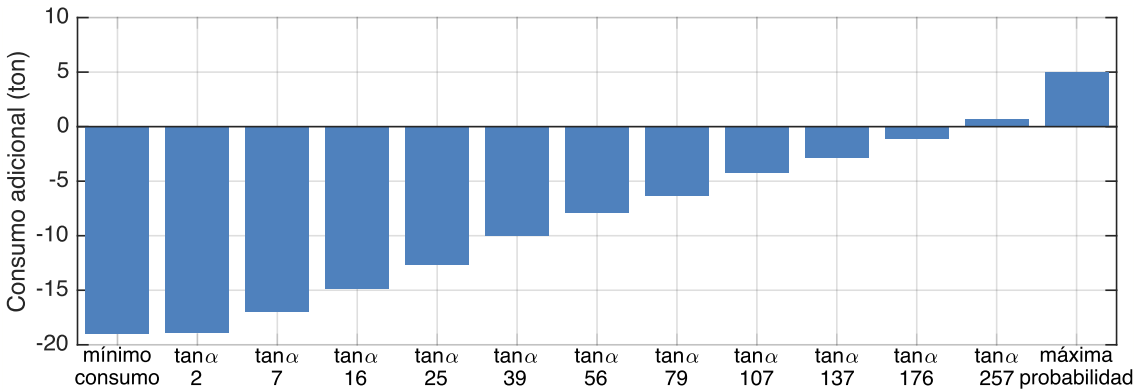


Figura A- 79 Combustible adicional para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 8)

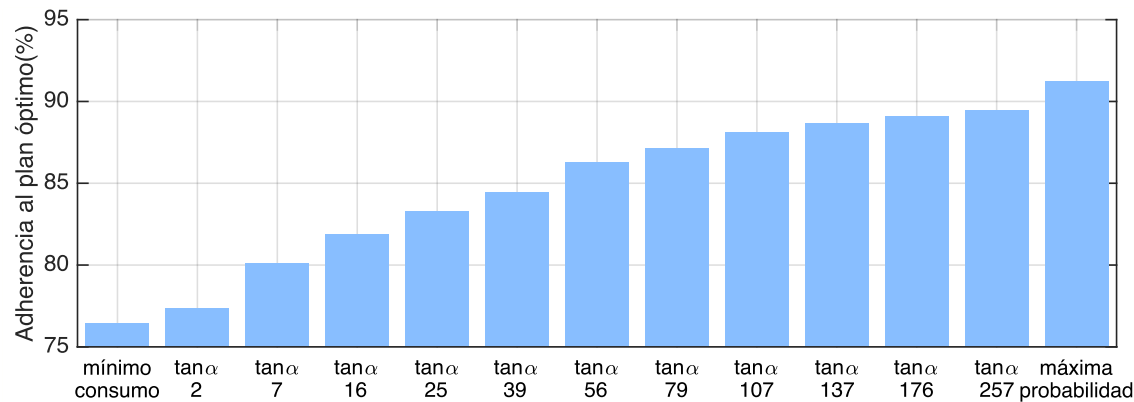


Figura A- 80 Adherencia al plan óptimo para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 8)

## A.9 Resultados al Escenario 9

### A.9.1 Aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas

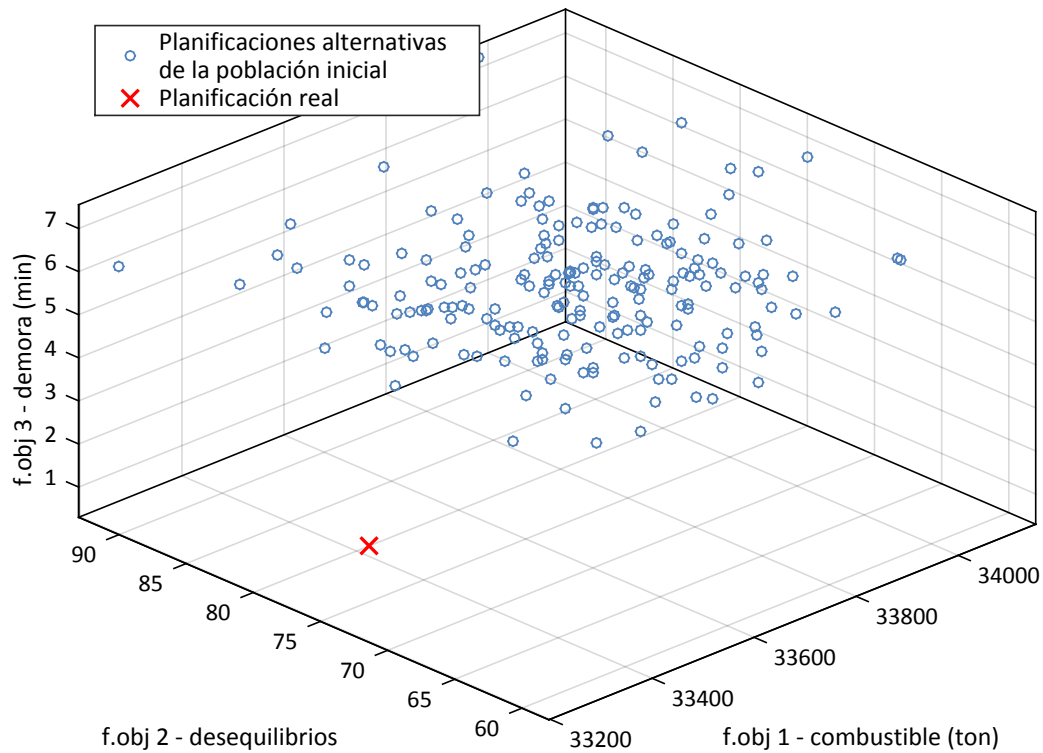


Figura A- 81 Valor de las funciones objetivas para cada individuo solución de la población inicial (escenario 9)

### A.9.2 Aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima

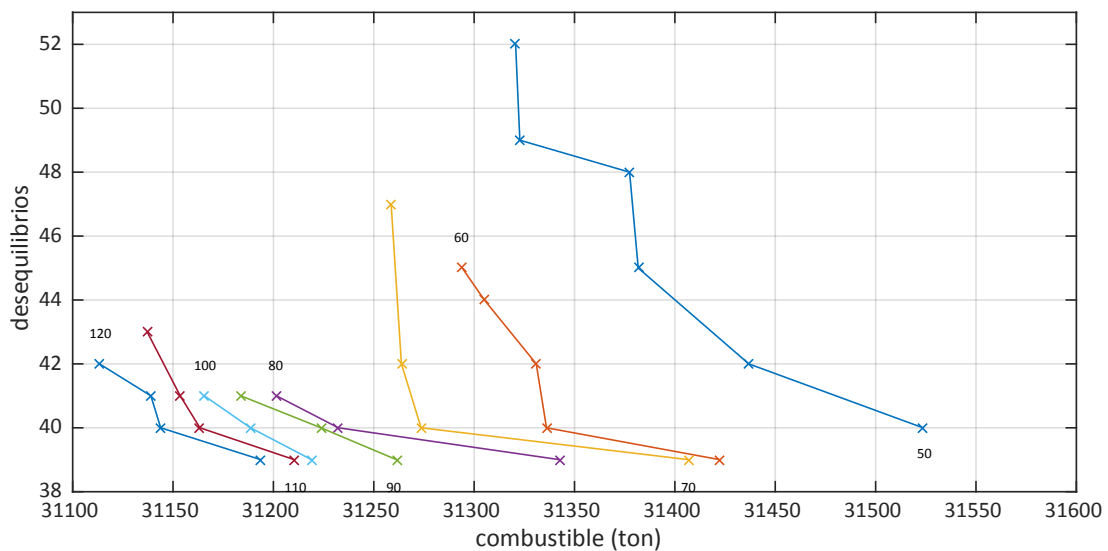


Figura A- 82 Frentes de Pareto y planificación óptima (escenario 9)

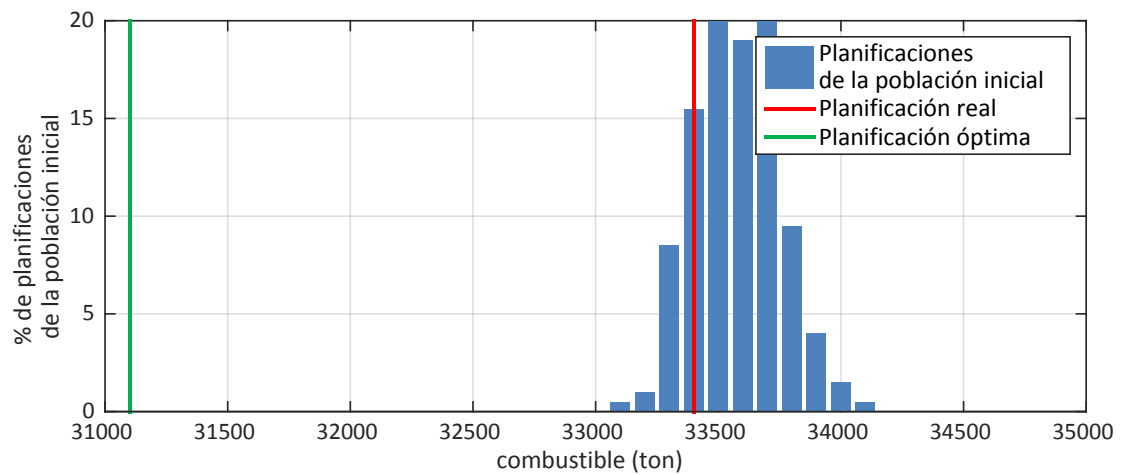


Figura A- 83 Histograma de consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 9)

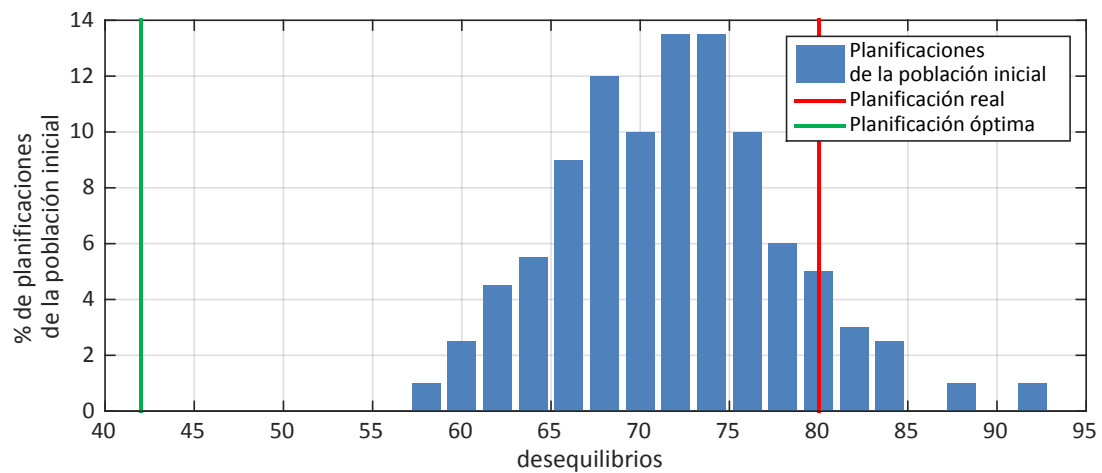


Figura A- 84 Histograma de desequilibrios de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 9)

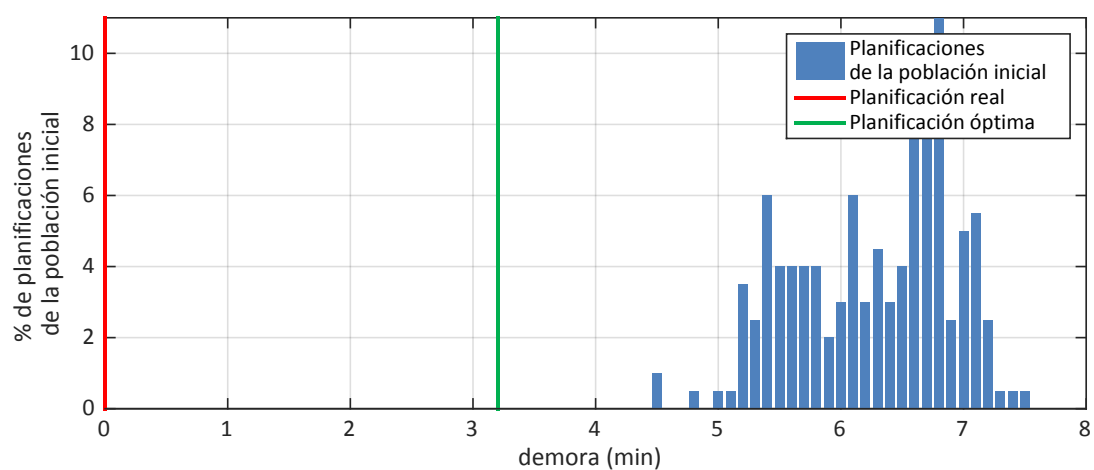


Figura A- 85 Histograma de demoras de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 9)



### A.9.3 Distribución de la demanda

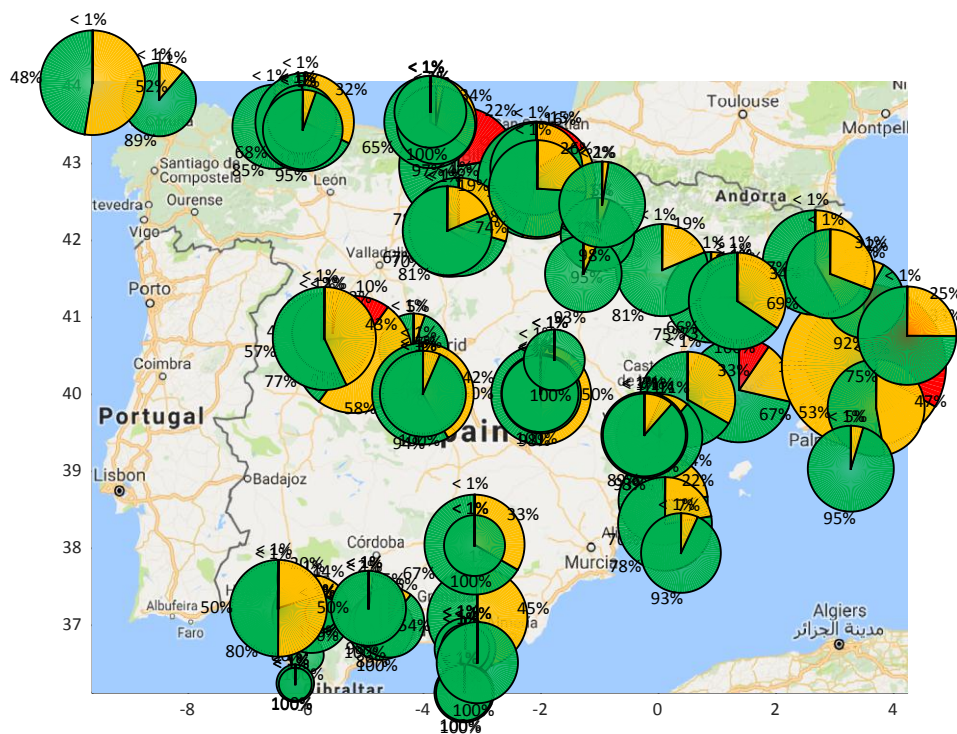


Figura A- 86 Desequilibrios de la planificación real (escenario 9)

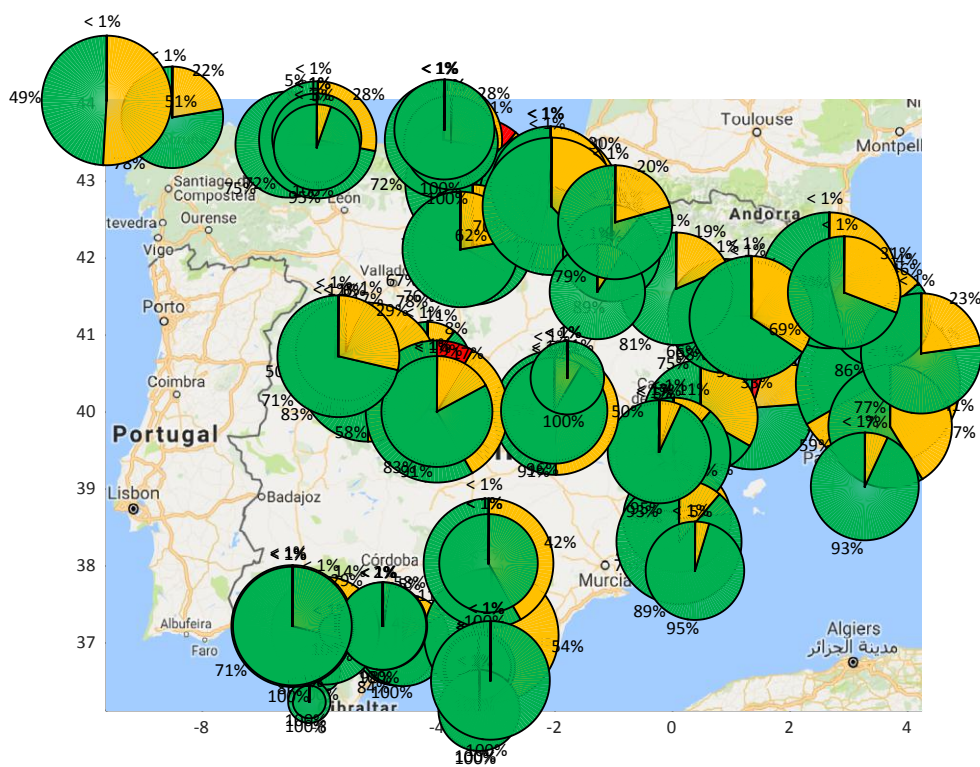


Figura A- 87 Desequilibrios de la planificación óptima (escenario 9)

A.9.4 Aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima

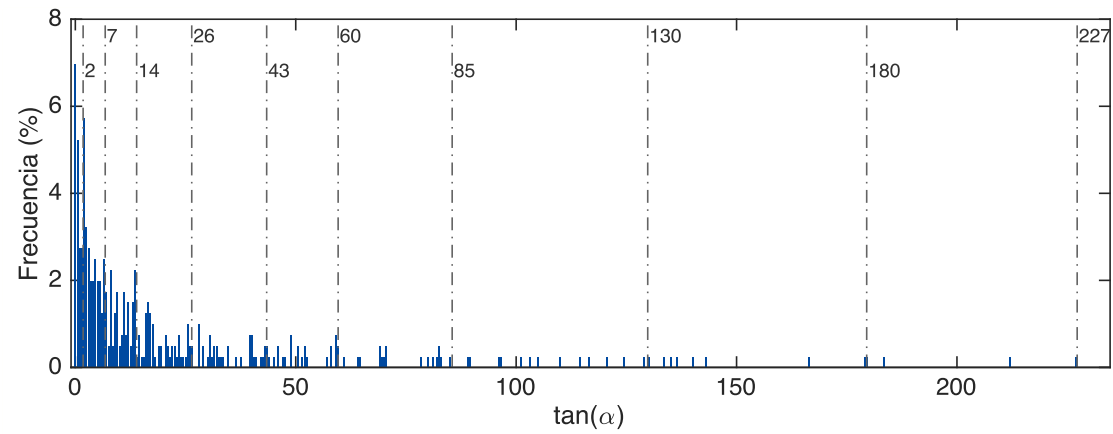


Figura A- 88 Pendientes de los frentes de Pareto de todos los conflictos (escenario 9)

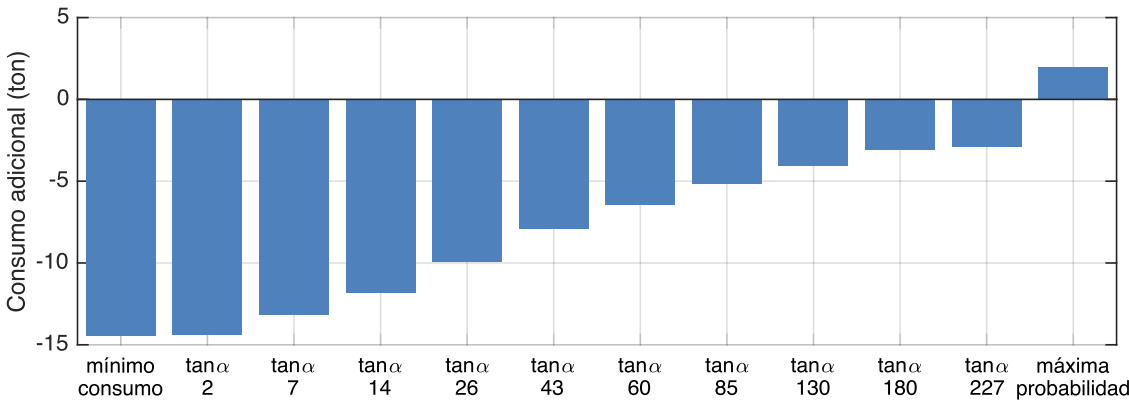


Figura A- 89 Combustible adicional para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 9)

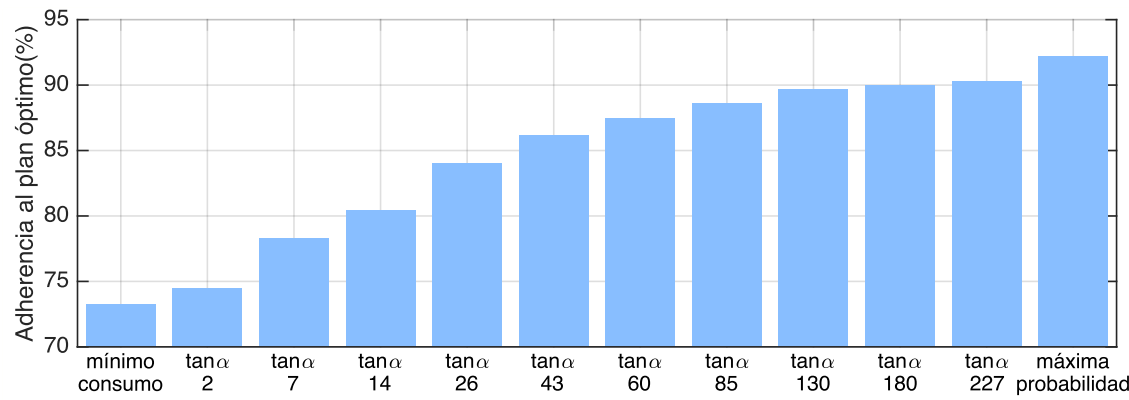


Figura A- 90 Adherencia al plan óptimo para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 9)



## A.10 Resultados al Escenario 10

### A.10.1 Aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas

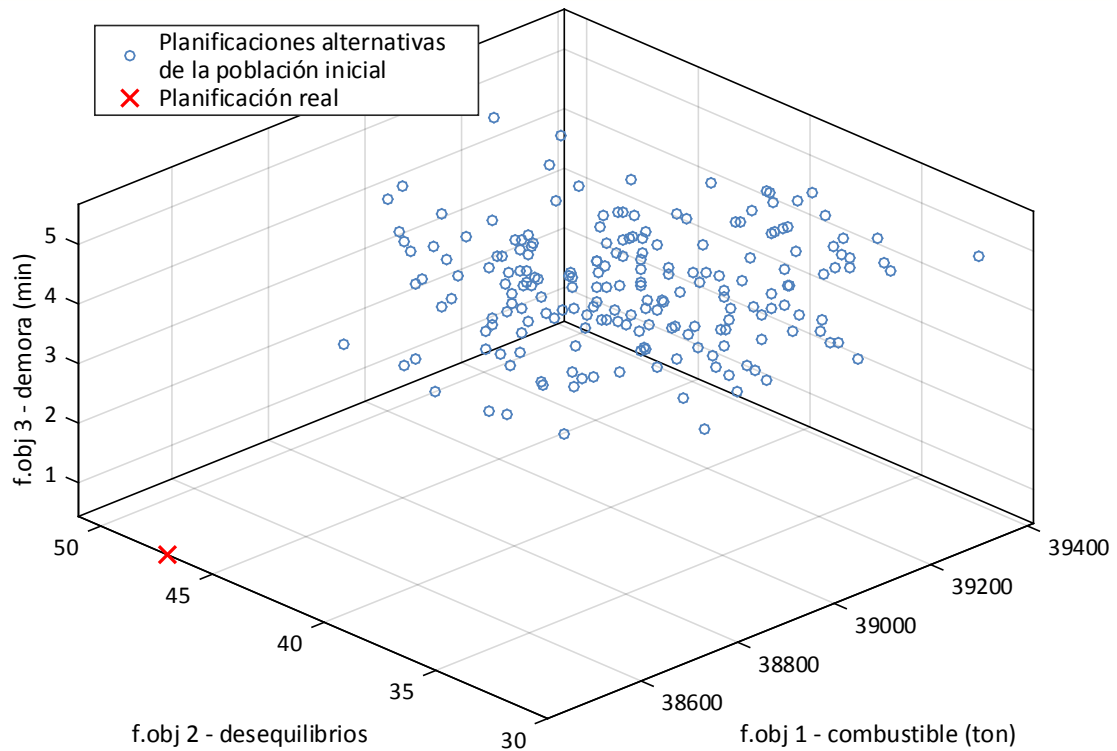


Figura A- 91 Valor de las funciones objetivos para cada individuo solución de la población inicial (escenario 10)

### A.10.2 Aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima

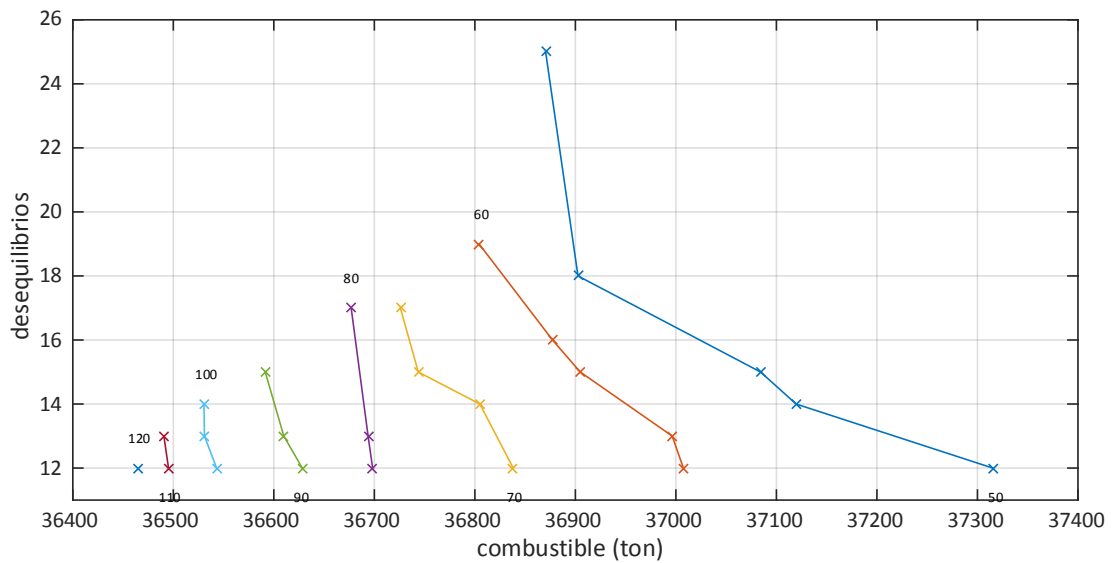


Figura A- 92 Frentes de Pareto y planificación óptima (escenario 10)

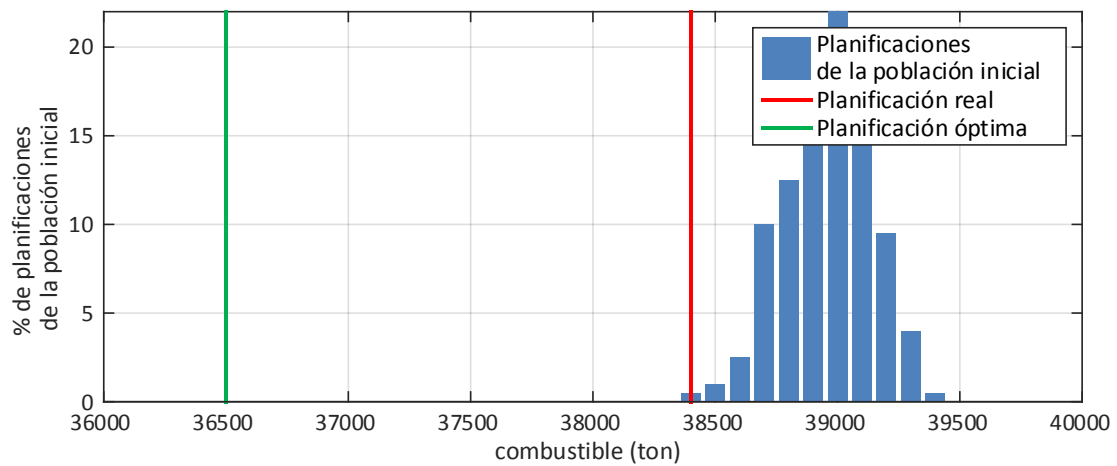


Figura A- 93 Histograma de consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 10)

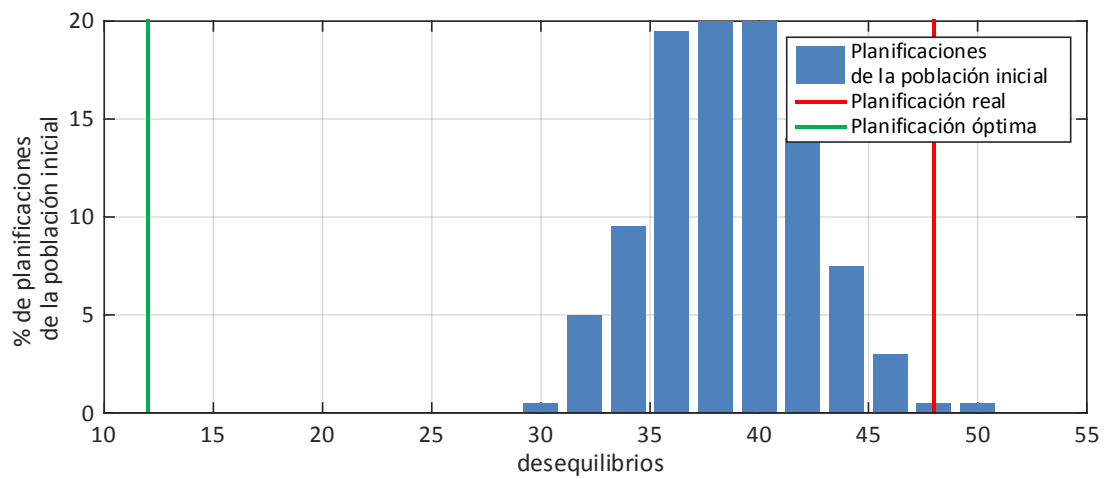


Figura A- 94 Histograma de desequilibrios de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 10)

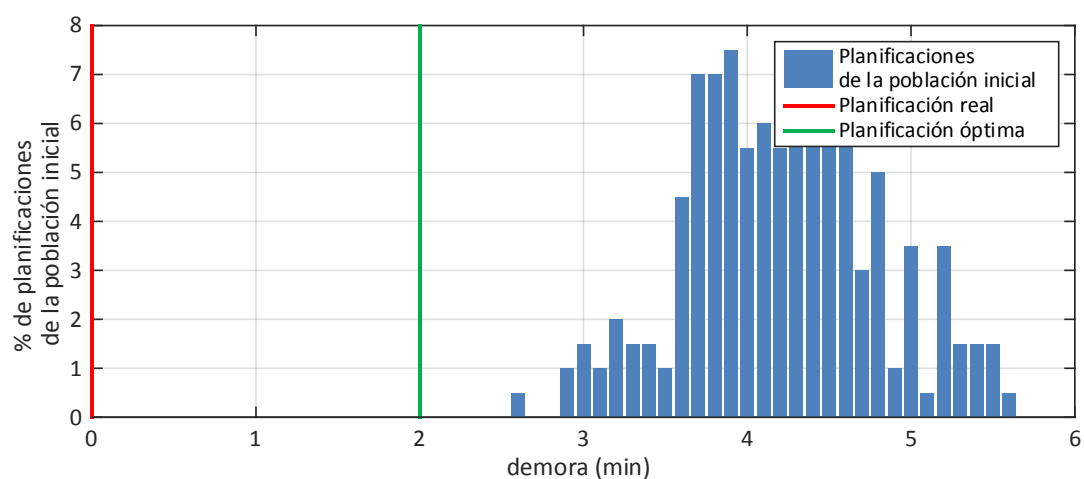


Figura A- 95 Histograma de demoras de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 10)

### A.10.3 Distribución de la demanda

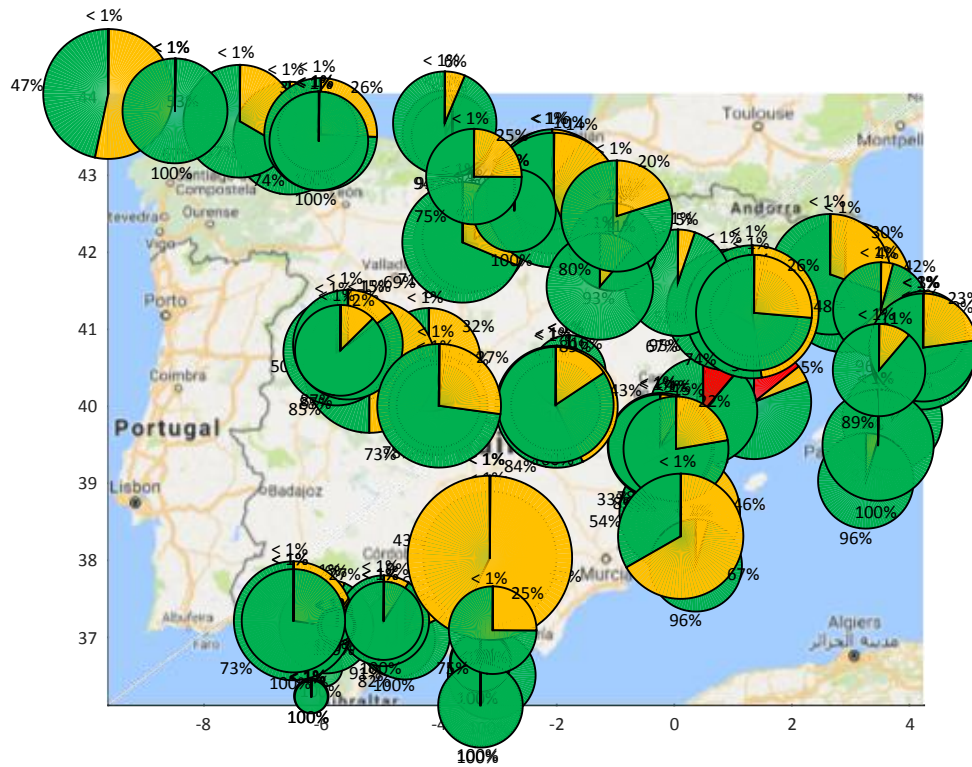


Figura A- 96 Desequilibrios de la planificación real (escenario 10)

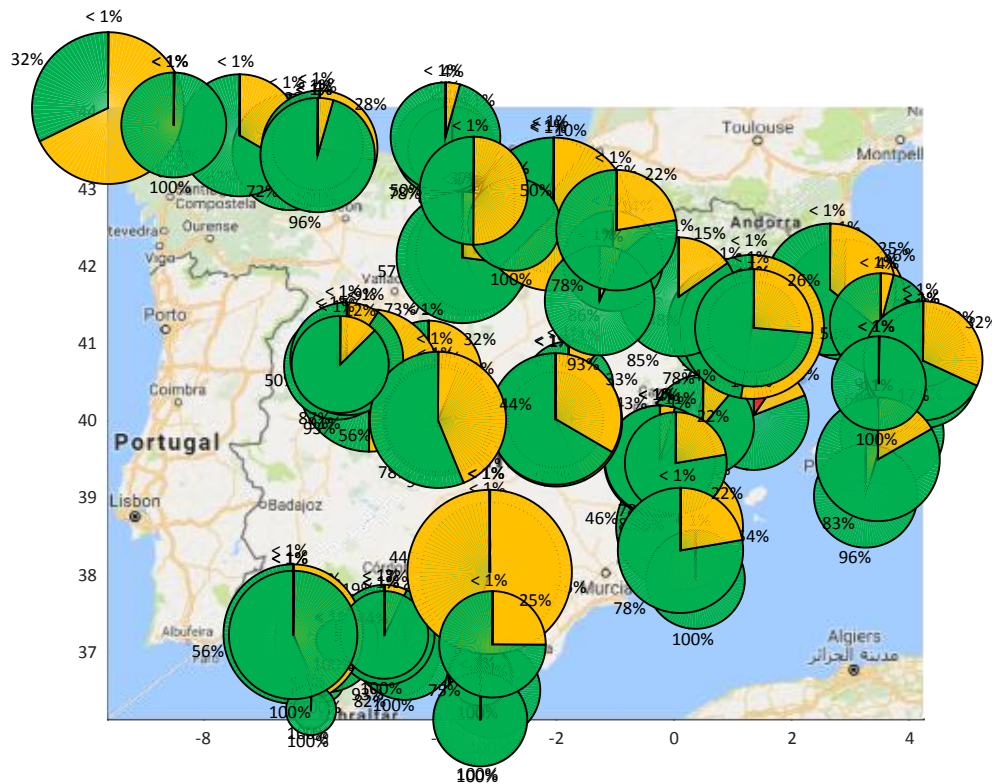


Figura A- 97 Desequilibrios de la planificación óptima (escenario 10)

A.10.4 Aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima

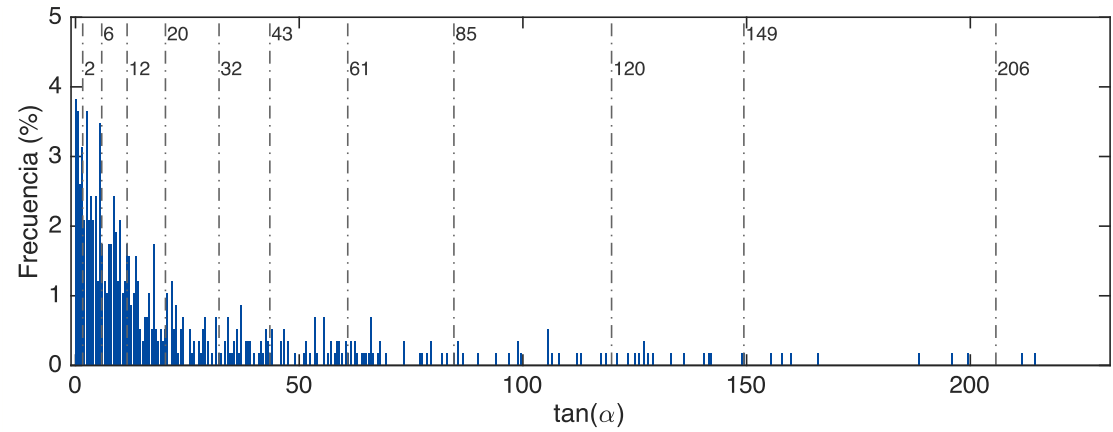


Figura A- 98 Pendientes de los frentes de Pareto de todos los conflictos (escenario 10)

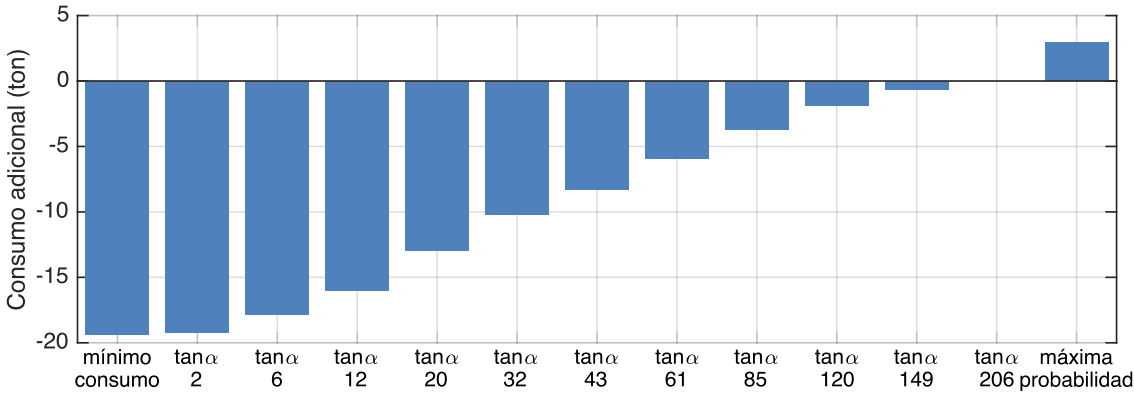


Figura A- 99 Combustible adicional para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 10)

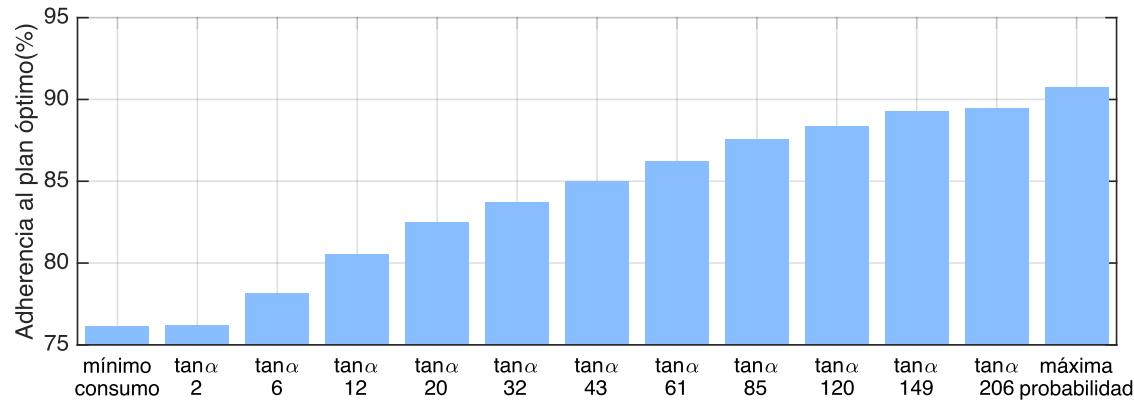


Figura A- 100 Adherencia al plan óptimo para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 10)

## A.11 Resultados al Escenario 11

### A.11.1 Aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas

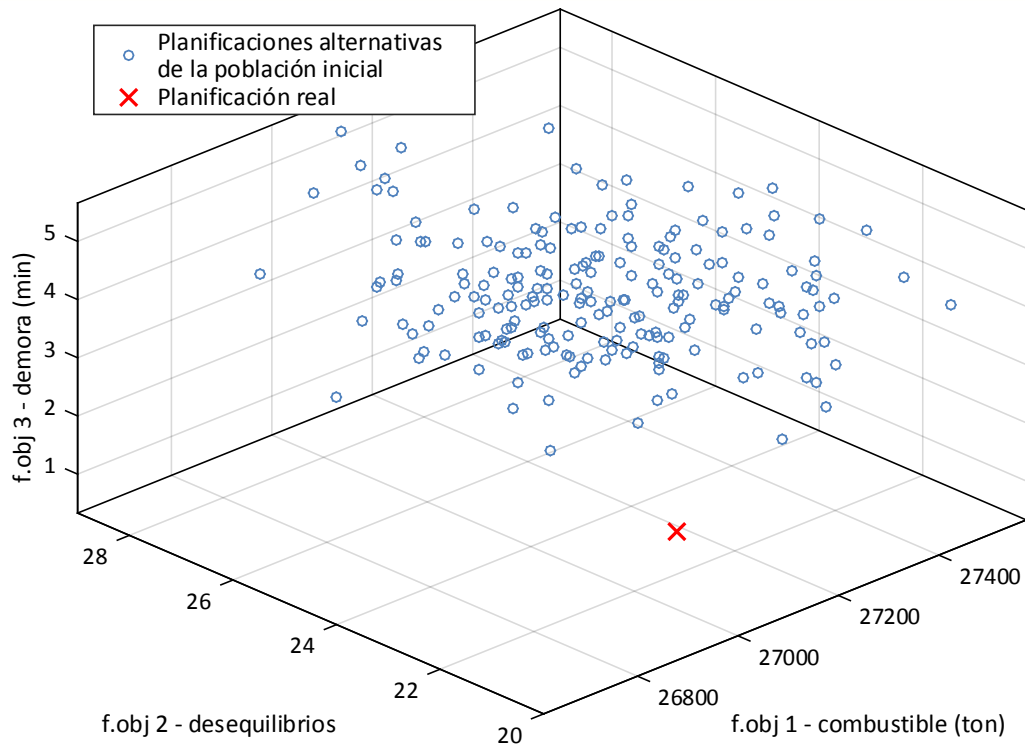


Figura A- 101 Valor de las funciones objetivas para cada individuo solución de la población inicial (escenario 11)

### A.11.2 Aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima

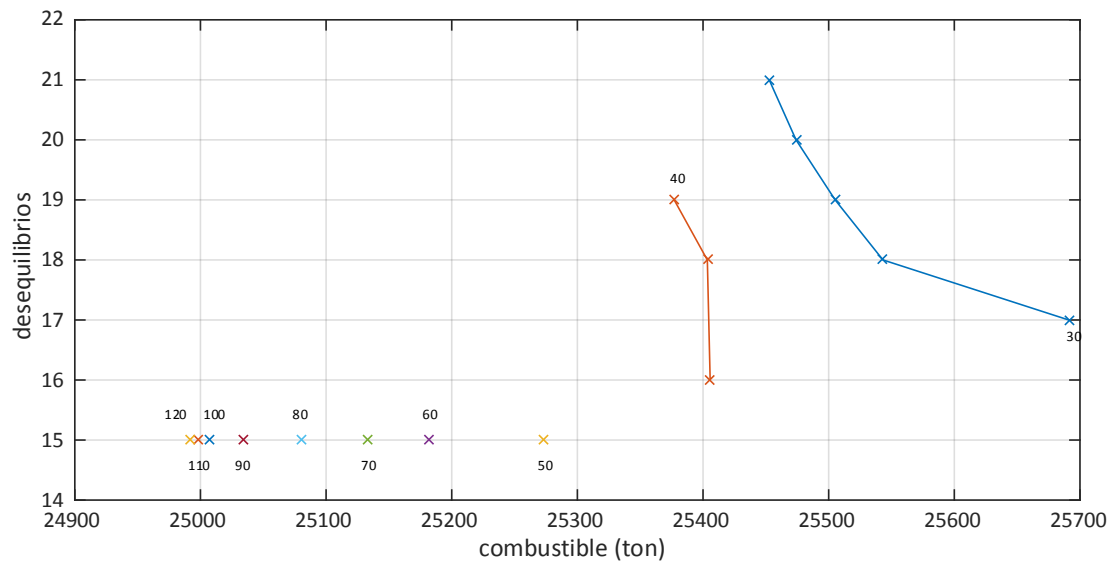


Figura A- 102 Frentes de Pareto y planificación óptima (escenario 11)

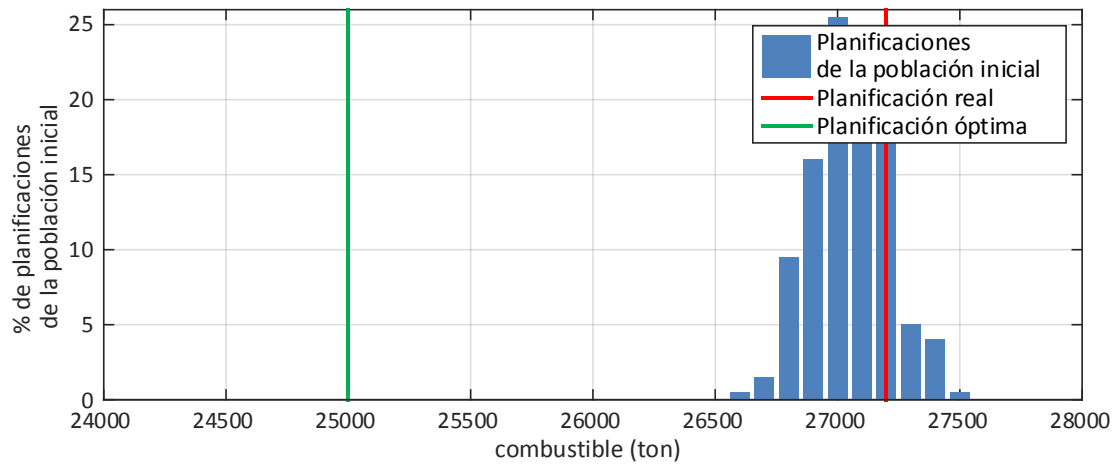


Figura A- 103 Histograma de consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 11)

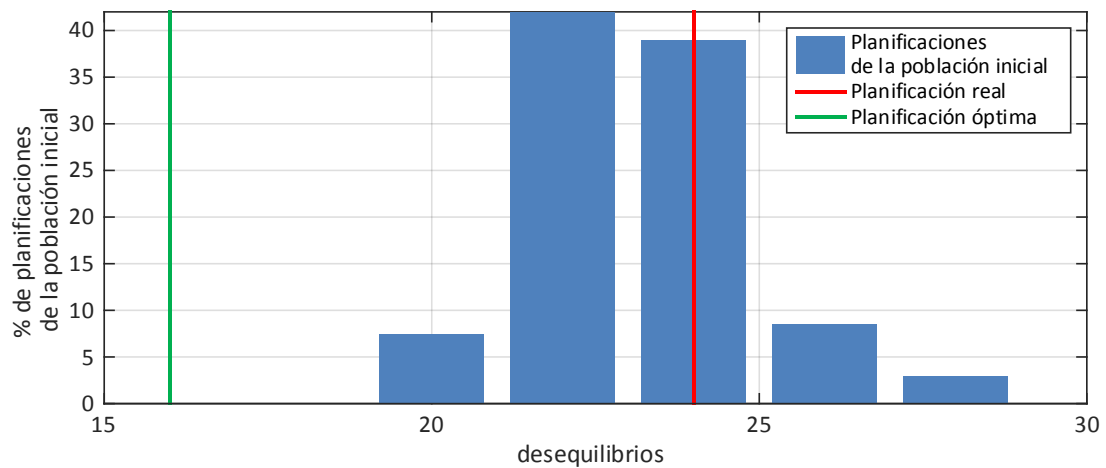


Figura A- 104 Histograma de desequilibrios de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 11)

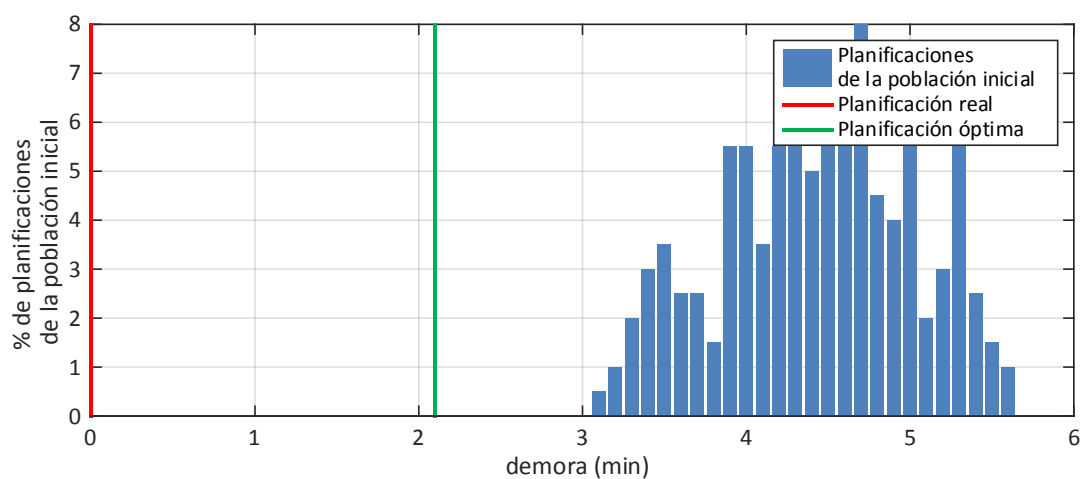


Figura A- 105 Histograma de demoras de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 11)



### A.11.3 Distribución de la demanda

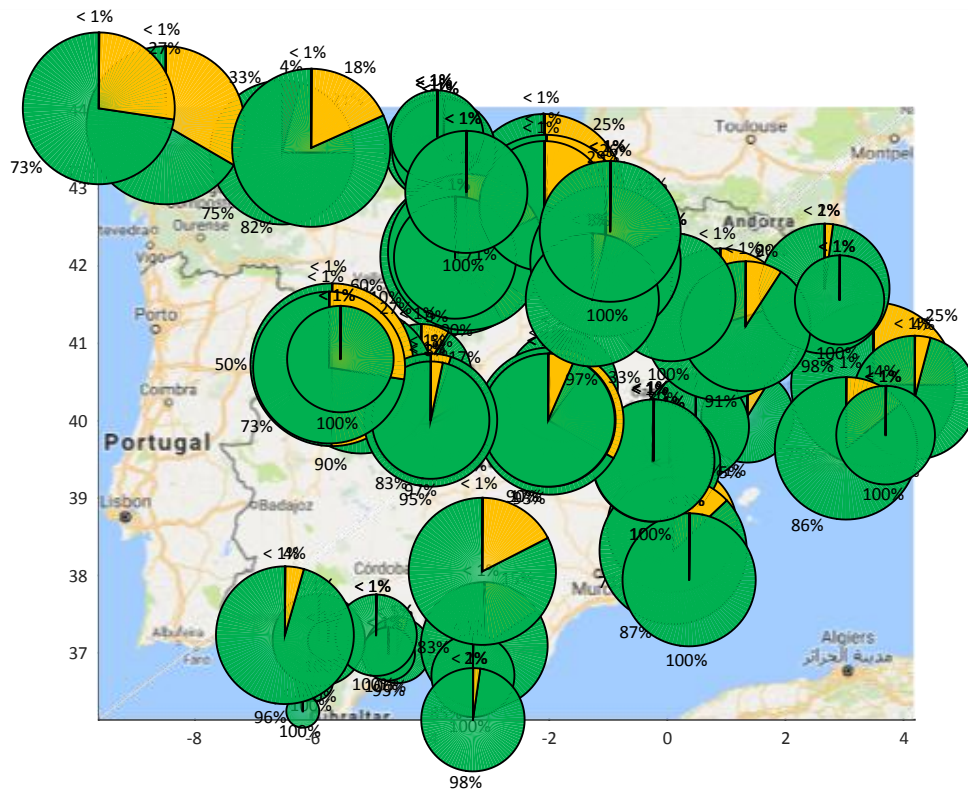


Figura A- 106 Desequilibrios de la planificación real (escenario 11)

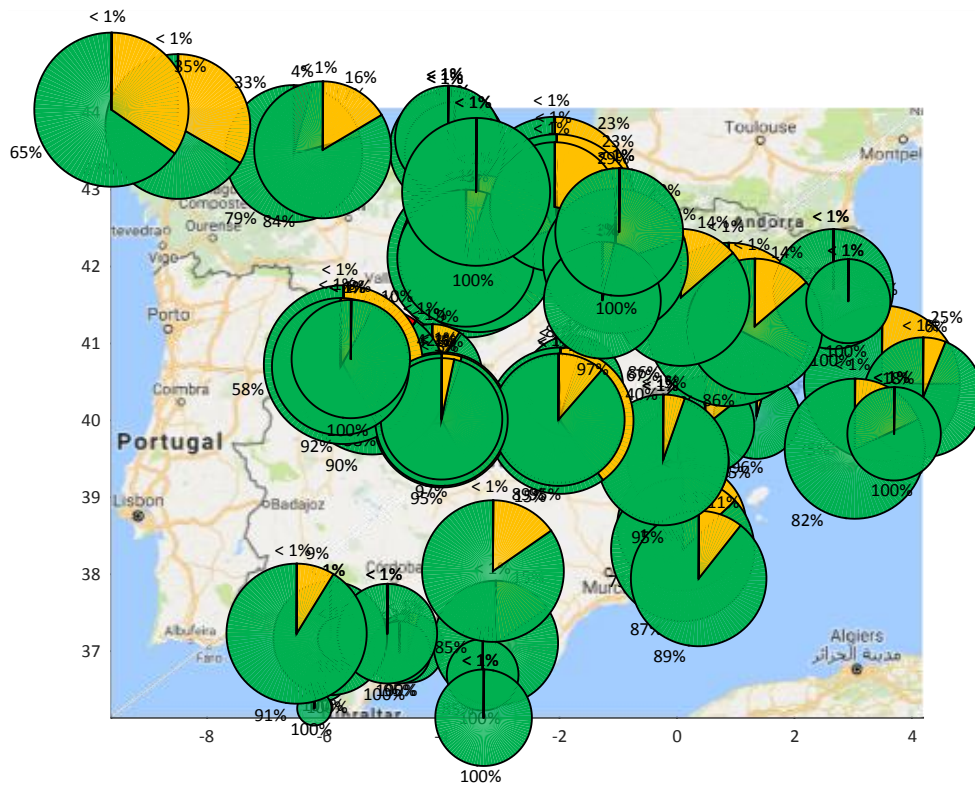


Figura A- 107 Desequilibrios de la planificación óptima (escenario 11)

A.11.4 Aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima

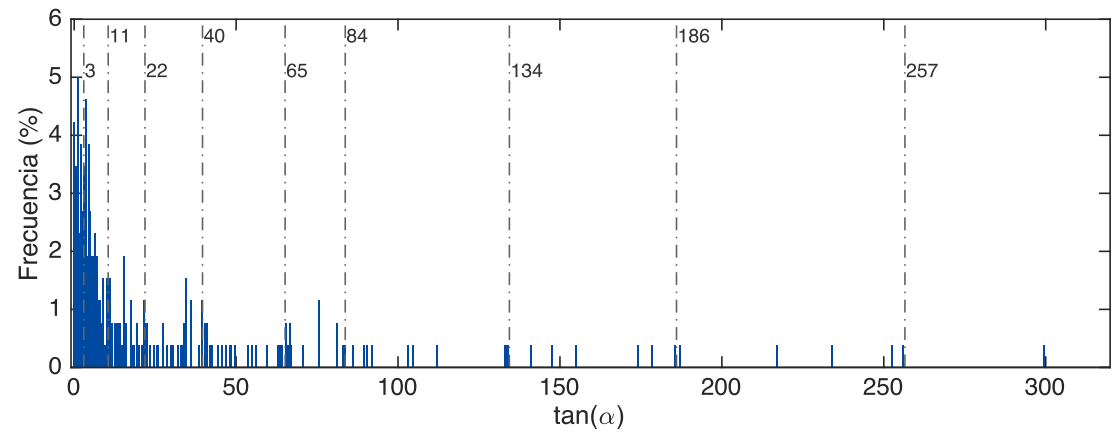


Figura A- 108 Pendientes de los frentes de Pareto de todos los conflictos (escenario 11)

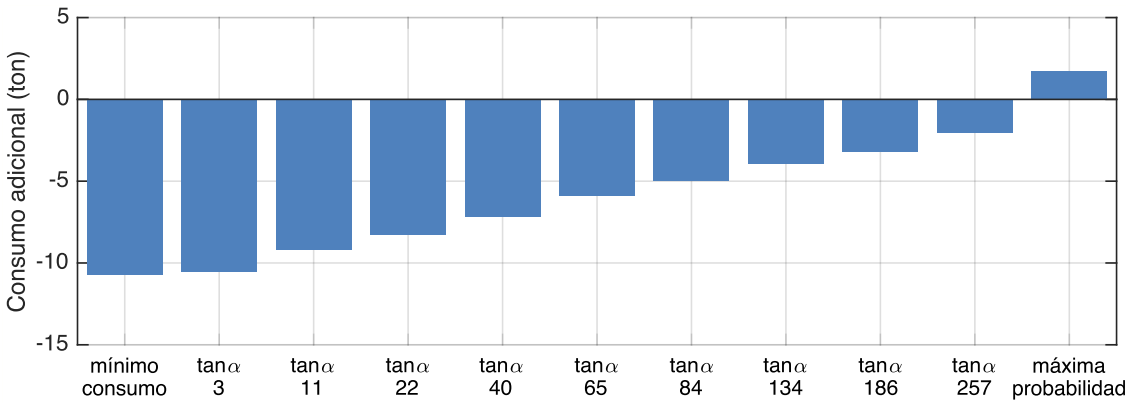


Figura A- 109 Combustible adicional para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 11)

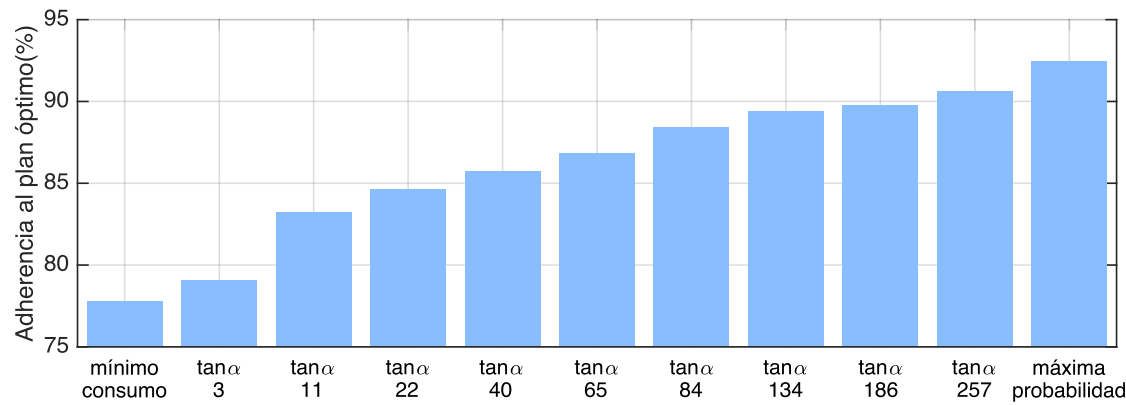


Figura A- 110 Adherencia al plan óptimo para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 11)



## A.12 Resultados al Escenario 12

### A.12.1 Aplicación del módulo de generación de planificaciones alternativas

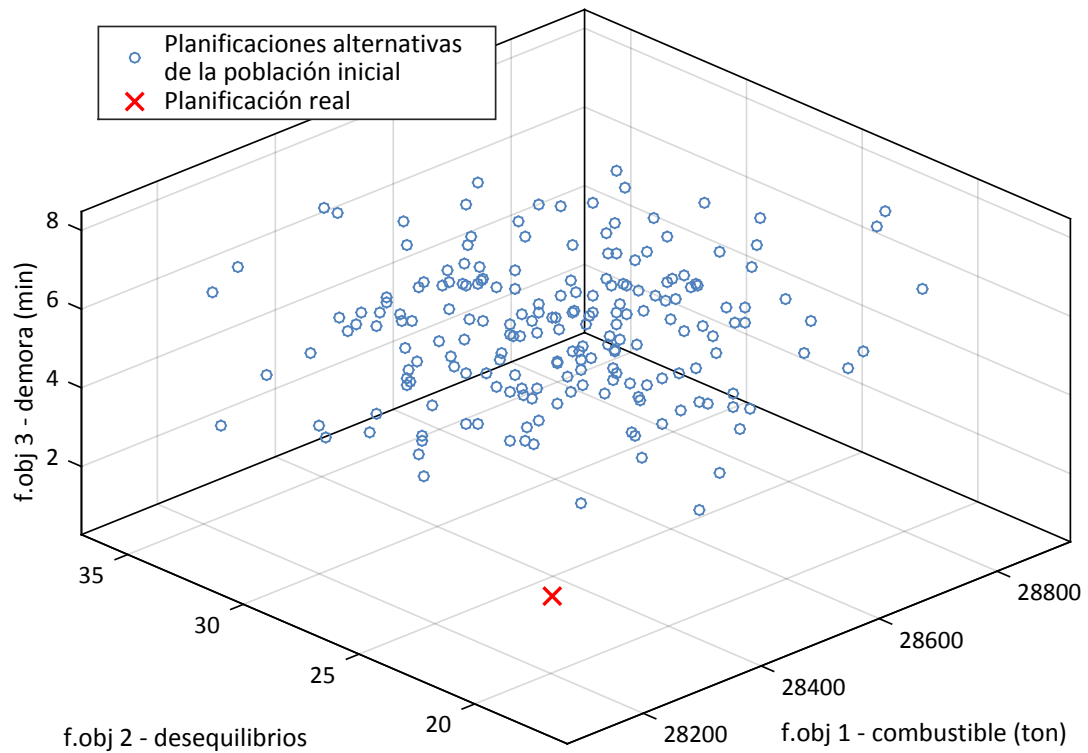


Figura A- 111 Valor de las funciones objetivos para cada individuo solución de la población inicial (escenario 12)

### A.12.2 Aplicación del módulo de búsqueda de la planificación óptima

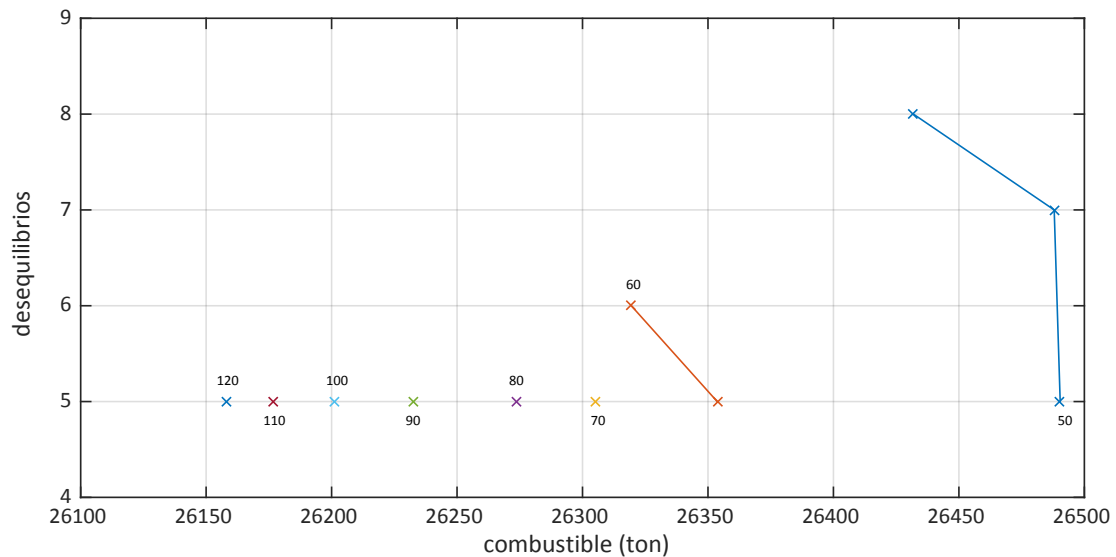


Figura A- 112 Frentes de Pareto y planificación óptima (escenario 12)

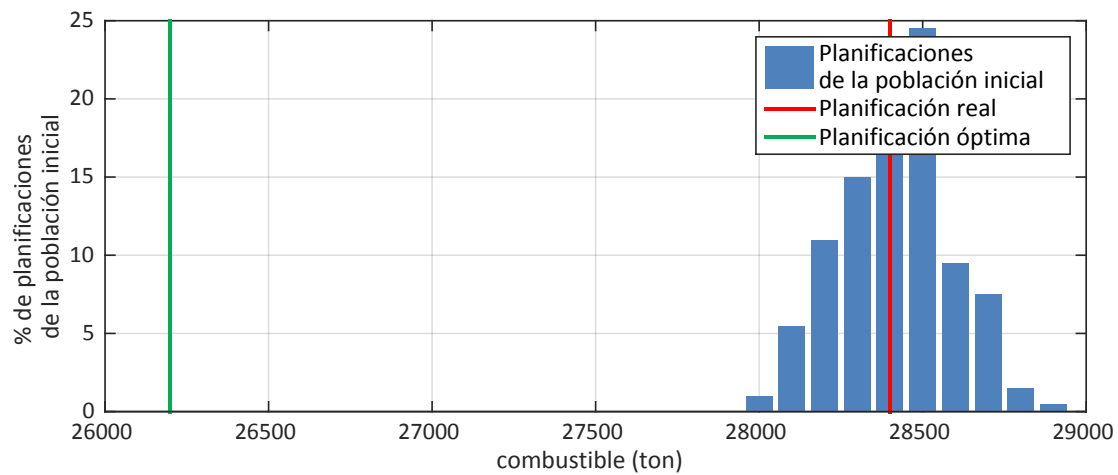


Figura A- 113 Histograma de consumo de combustible de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 12)

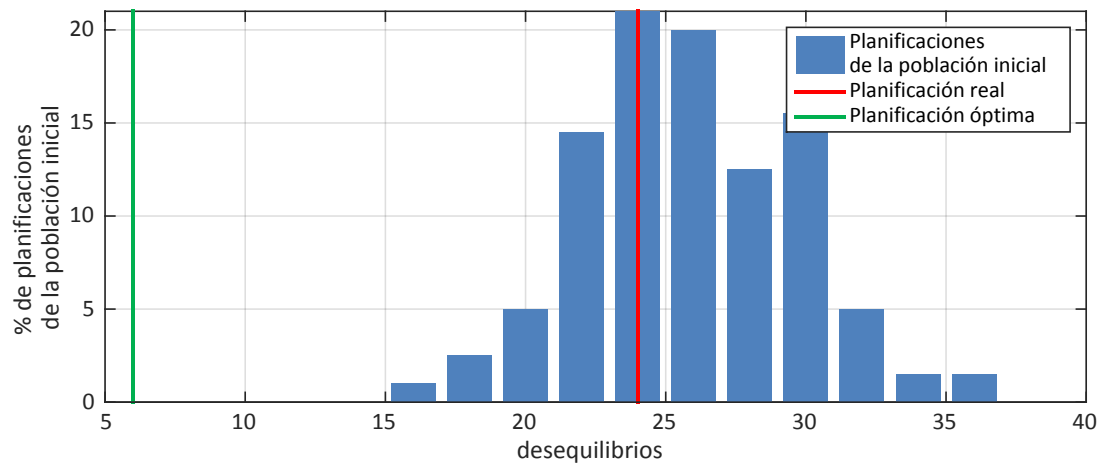


Figura A- 114 Histograma de desequilibrios de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 12)

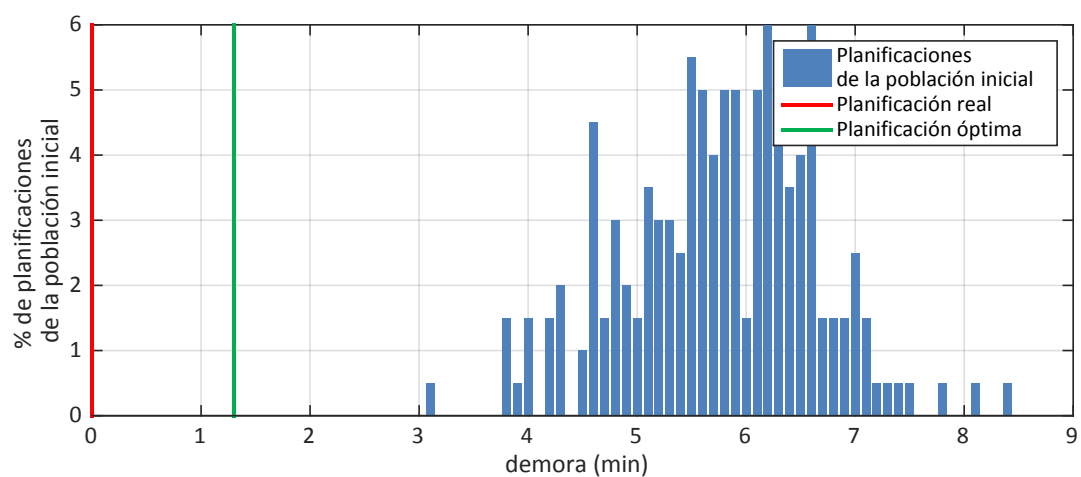


Figura A- 115 Histograma de demoras de las planificaciones de la población inicial, la planificación real y la planificación óptima (escenario 12)

### A.12.3 Distribución de la demanda

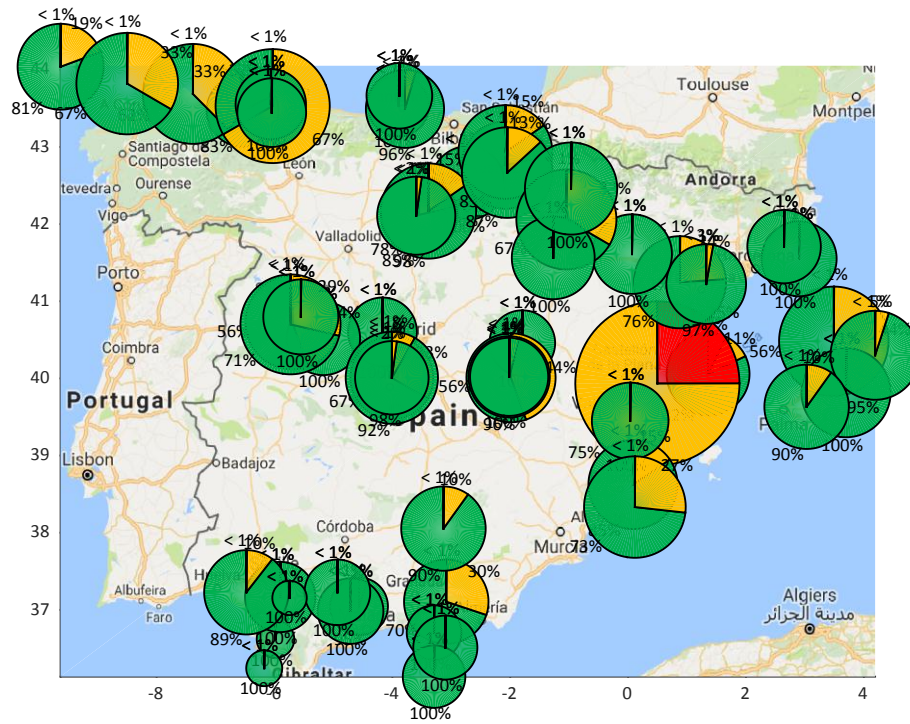


Figura A- 116 Desequilibrios de la planificación real (escenario 12)

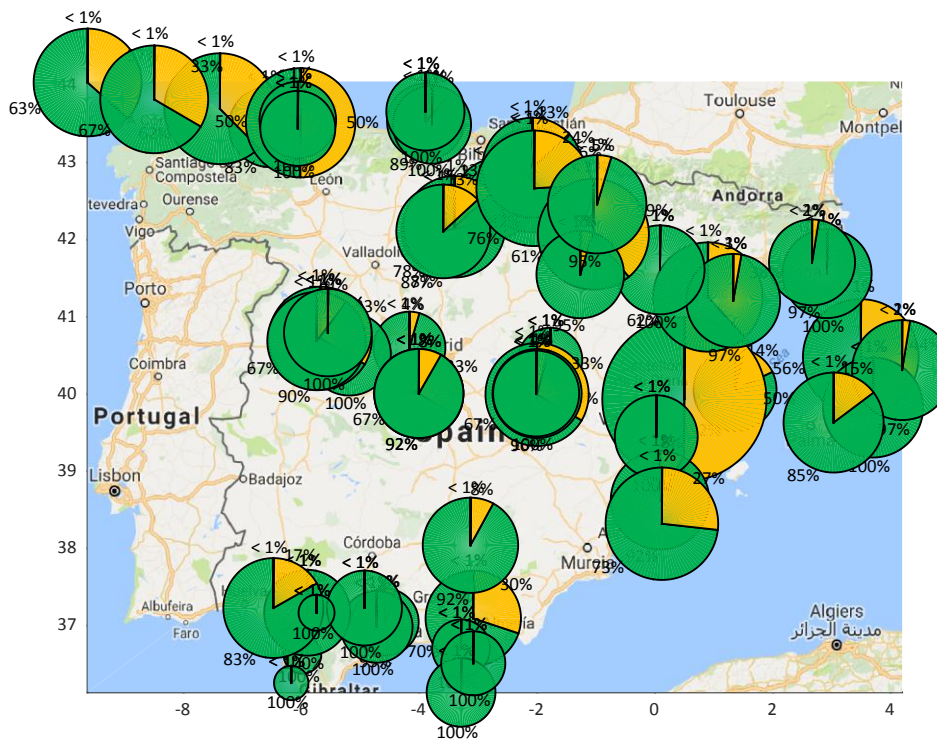


Figura A- 117 Desequilibrios de la planificación óptima (escenario 12)

A.12.4 Aplicación del módulo de búsqueda de la resolución óptima

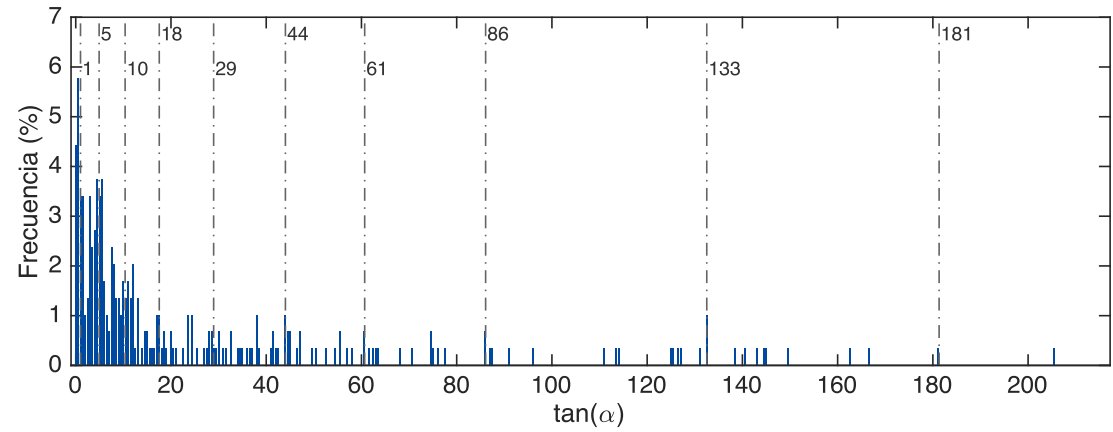


Figura A- 118 Pendientes de los frentes de Pareto de todos los conflictos (escenario 12)

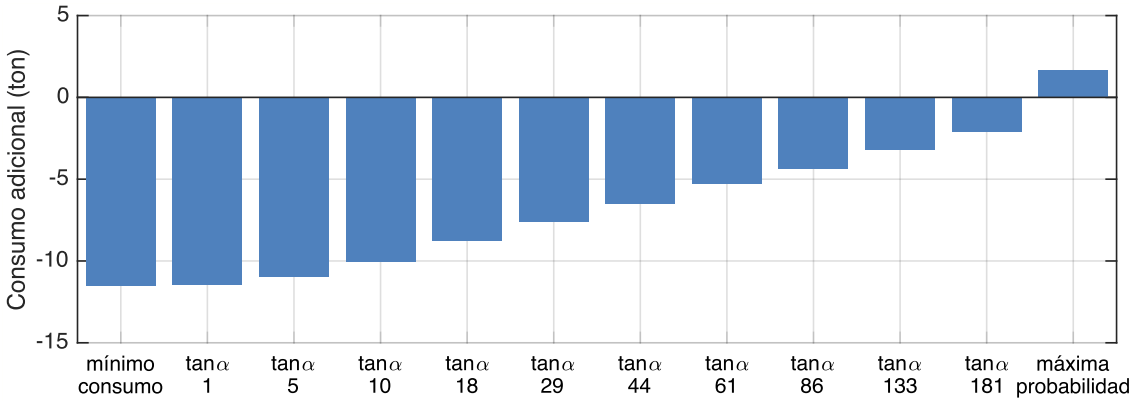


Figura A- 119 Combustible adicional para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 12)

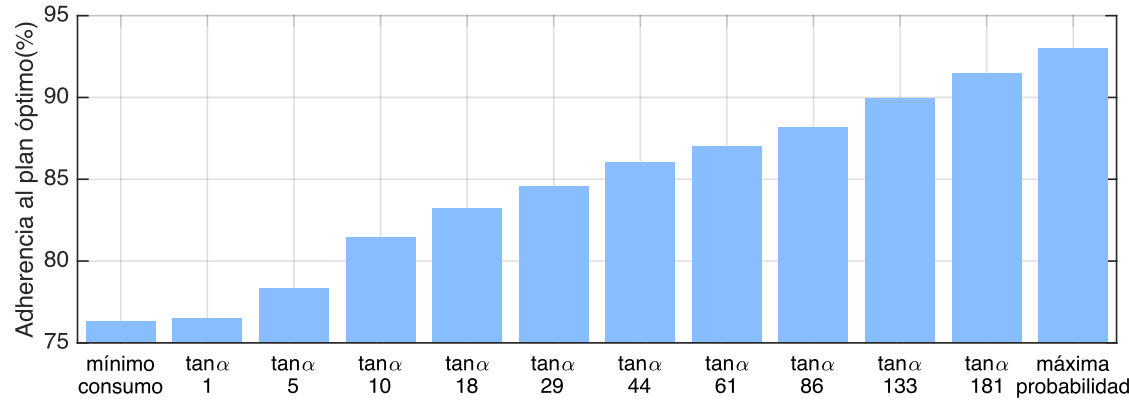


Figura A- 120 Adherencia al plan óptimo para cada criterio de resolución de conflictos (escenario 12)

# Apéndice B. ACRÓNIMOS Y NOMENCLATURA

---

## B.1 Acrónimos

<b>ACC:</b>	<i>Air Control Center.</i> Centros de Control de Área.
<b>ANSP:</b>	<i>Air Navigation Services Providers.</i> Proveedores de Servicios de Navegación Aérea.
<b>ASM:</b>	<i>Air Space Management.</i> Gestión del Espacio Aéreo.
<b>ATC:</b>	<i>Air Traffic Control.</i> Control de Tráfico Aéreo.
<b>ATFCM:</b>	<i>Air Traffic Flow &amp; Capacity Management.</i> Gestión de Flujos y Capacidad de Tránsito Aéreo.
<b>ATM:</b>	<i>Air Traffic Management.</i> Gestión del Tránsito Aéreo.
<b>ATS:</b>	<i>Air Traffic Service.</i> Servicios de Tráfico Aéreo.
<b>BADA:</b>	<i>Base of Aircraft Data.</i> Base de datos de Aeronaves.
<b>BDT:</b>	<i>Business Development Trajectory.</i> Trayectoria de negocio solicitada.
<b>BT:</b>	<i>Business Trajectory.</i> Trayectoria de Negocio.
<b>CDA:</b>	<i>Continuous Descent Approach.</i> Aproximación de Descenso Continuo.
<b>CDM:</b>	<i>Collaborative Decision Making.</i> Toma de Decisiones Colaborativa
<b>CNS:</b>	<i>Communications, Navigation and Surveillance.</i> Comunicaciones, Navegación y Vigilancia
<b>DOC:</b>	<i>Direct Operating Cost.</i> Costes directos de operación
<b>DT:</b>	Desviación temporal.
<b>DV:</b>	Desviación vertical.
<b>ELDT:</b>	<i>Estimated Landing Time.</i> Hora Estimada de Aterrizaje.

<b>EOBT:</b>	<i>Estimated Off-Block Time.</i> Hora Estimada de fuera de Calzos.
<b>FIR:</b>	<i>Flight Information Region.</i> Región de Información de Vuelo.
<b>GIPV:</b>	Gestión de Planes de Vuelo.
<b>ISA:</b>	<i>International Standard Atmosphere.</i> Atmósfera Estándar Internacional.
<b>KPA:</b>	<i>Key Performance Areas.</i> Áreas Claves de Rendimiento.
<b>MATLAB:</b>	<i>Matrix Laboratory.</i>
<b>MOEA:</b>	<i>Multiobjective Evolutionary Algorithms.</i> Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo.
<b>MOGA:</b>	<i>Multiobjective Genetic Algorithm.</i>
<b>MOP:</b>	<i>Multiobjective Optimization Problem.</i> Problema de Optimización Multiobjetivo.
<b>MT:</b>	<i>Mission Trajectory.</i> Trayectoria de Misión.
<b>NMOC:</b>	<i>Network Manager Operations Center.</i> Centro Gestor de Operaciones en red.
<b>NOC:</b>	<i>Neighbouring Optimal Control.</i>
<b>NOWR:</b>	<i>Neighboring Optimal Wind Routing.</i>
<b>NPGA:</b>	<i>Niched-Pareto Genetic Algorithm.</i>
<b>NSGA:</b>	<i>Nondominated Sorting Genetic Algorithm.</i>
<b>OACI:</b>	Organización de Aviación Civil Internacional. <i>International Civil Aviation Organization</i> , ICAO.
<b>PAES:</b>	<i>Pareto Archived Evolution Strategy.</i>
<b>PGC:</b>	Puntos Geométricos del Conflicto.
<b>PSO:</b>	<i>Particle Swarm Optimization.</i> Optimización de Enjambre de Partículas.
<b>PV:</b>	Plan de Vuelo.
<b>RAMS:</b>	<i>Reorganized ATC Mathematical Simulator.</i>
<b>RBT:</b>	<i>Reference Business Trajectory.</i> Trayectoria de Negocio Acordada.
<b>SA:</b>	<i>Simulated Annealing.</i> Recocido Simulado.
<b>SACTA:</b>	Sistema Automatizado de Control de Tránsito Aéreo.
<b>SBT:</b>	<i>Shared Business Trajectory.</i> Trayectoria de Negocio Compartida.

<b>SESAR:</b>	<i>Single European Sky ATM Research</i> . Proyecto de Investigación en el ámbito de la Gestión del Tránsito Aéreo del Cielo Único Europeo.
<b>SID:</b>	<i>Standard Instrumental Departure</i> . Rutas Normalizadas de Despegue.
<b>SPEA:</b>	<i>Strength Pareto Evolutionary Algorithm</i> .
<b>STAR:</b>	<i>Standard Terminal Arrival Route</i> . Rutas de Arribada Normalizadas.
<b>SWIM:</b>	<i>System Wide Information Management</i> . Red de Gestión de Información en el Sistema Global.
<b>TBO:</b>	<i>Trajectory Based Operations</i> . Operaciones Basadas en la Trayectoria.
<b>TC:</b>	Instante del Conflicto.
<b>TCPV:</b>	Tratamiento Central de Planes de Vuelo.
<b>TDVM:</b>	Tratamiento de Datos de Vigilancia Multidependencia.
<b>TLPV:</b>	Tratamiento Local de Planes de Vuelo.
<b>TPV:</b>	Tratamiento de planes de Vuelo.
<b>TR:</b>	Traza Radar.
<b>TTA:</b>	<i>Target Time of Arrival</i> . Horas Objetivo de Arribada.
<b>TTO:</b>	<i>Target Time Over</i> . Horas Objetivo de paso.
<b>UCS:</b>	Unidad de Control de Sector. <i>Controller Working Position</i> , CWP.
<b>UIR:</b>	<i>Upper Information Region</i> . Regiones de Información de Vuelo Aéreo Superior.
<b>VEGA:</b>	<i>Vector Evaluated Genetic Algorithm</i> .

## B.2 Nomenclatura

$Ac$	=	amplitud de clase de un histograma
$\alpha_T$	=	gradiente térmico, $K/m$
$C$	=	número de conflictos durante un escenario temporal individual
$C_D$	=	coeficiente de resistencia aerodinámica
$C_f$	=	coeficientes de consumo específico
$C_L$	=	coeficiente de sustentación
$d$	=	demora de arribada de un vuelo
$D$	=	fuerza de resistencia aerodinámica, $N$
$d_i$	=	distancia de apilamiento
$\delta$	=	rango de presión a nivel de mar
$\eta$	=	consumo específico de combustible, $kg/(min \cdot KN)$
$\varepsilon_i$	=	vector de restricciones del método de las restricciones $\varepsilon$
$\epsilon$	=	número de escenarios
$f$	=	función objetivo
$F$	=	mapa no lineal con la dependencia entre un conflicto y su resolución
$\dot{\phi}$	=	velocidad de viraje
$\phi$	=	ángulo de inclinación lateral
$g$	=	aceleración gravitatoria, $m/s^2$
$h$	=	altitud, <i>pies</i>
$k$	=	número de <i>clusters</i>
$gen$	=	iteración
$\lambda$	=	longitud, <i>grados</i> ( $^\circ$ )
$m$	=	masa de la aeronave, $kg$
$M$	=	número de funciones objetivo
$N$	=	número de variables de decisión



$np$	=	recuento de dominancia
$Nc$	=	número de clases de un histograma
$o$	=	número de observaciones utilizadas para construir un histograma
$p$	=	presión, $N/m^2$
$P$	=	frente de Pareto
$\varphi$	=	latitud, <i>grados</i> ( $^{\circ}$ )
$P_{gen}$	=	población de padres
$q$	=	miembro de un conjunto de soluciones dominadas
$Q$	=	conjunto de soluciones no dominadas
$Q_{gen}$	=	población de hijos
$r$	=	rango de no dominancia
$R$	=	rango de un histograma
$R_a$	=	constante del aire, $J/(kg \cdot K)$
$\rho$	=	densidad, $kg/m^3$
$S$	=	superficie alar, $m^2$
$Sp$	=	conjunto de soluciones dominadas
$\Sigma$	=	espacio solución del problema multiobjetivo
$t$	=	tiempo
$T$	=	empuje, $N$
$\tan \alpha$	=	pendiente del segmento que une dos soluciones del frente de Pareto
$\theta$	=	temperatura, <i>Kelvin</i>
$V$	=	velocidad verdadera, $m/s$
$\vec{x}$	=	vector de variables de estado
$x_{max}$	=	dato de mayor valor numérico de un histograma
$x_{min}$	=	dato de menor valor numérico de un histograma

