



Universidad  
de La Laguna

SECCIÓN DE  
MATEMÁTICAS

FACULTAD  
DE CIENCIAS

Javier de León Morales

# *Optimización en el diseño de la encuesta de turismo para el ISTAC*

Optimization in the design of the tourism survey  
for ISTAC

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Matemáticas  
La Laguna, Julio de 2017

DIRIGIDO POR

*Juan José Salazar González*

*Juan José Salazar González*

*Departamento de Matemáticas, Es-*  
*tadística e Investigación Operativa*

*Universidad de La Laguna*

*38200 - La Laguna*

---

## Agradecimientos

A Juan José Salazar González por su ayuda, tiempo y dedicación en el desarrollo de este trabajo.

Agradecer al ISTAC, en particular, a Yenis González Mora, el tiempo que le han dedicado a resolver diversas dudas que les he planteado sobre el funcionamiento de la encuesta FRONTUR-Canarias.

También agradecer a mis padres, Juan y Nieves, y a mi hermana Patricia, por el apoyo incondicional.

Y a las demás personas que, con su “granito de arena”, han hecho que pudiera llegar hasta aquí.





---

## Resumen • Abstract

### *Resumen*

---

*El ISTAC realiza diversas encuestas a los pasajeros de los vuelos con origen los aeropuertos canarios. Entre ellas se encuentra FRONTUR - Canarias. Este trabajo se basa en diseñar un modelo matemático que maximice la cantidad de encuestas realizadas de FRONTUR - Canarias, siendo éstas lo más representativas posibles, es decir, que incluyan encuestas de todos los destinos hacia donde se dirigen los vuelos con origen un aeropuerto canario. Estas encuestas también son realizadas por el INE, por lo que, debemos observar las encuestas realizadas por ellos para no encuestar el mismo vuelo.*

*Este modelo es desarrollado para obtener una selección óptima de vuelos a encuestar por parte del ISTAC. Éste se ha implementado en un software de programación matemática llamado XPRESS MOSEL, el cual se utiliza para obtener diversos resultados computacionales en cada aeropuerto canario.*

**Palabras clave:** Representatividad - Modelo matemático - ISTAC - INE.

### *Abstract*

---

*The ISTAC conducts various surveys of passengers on flights departing from Canary Islands airports. Among them is FRONTUR - Canarias. This work is based on the design of a mathematical model that maximizes the number of FRONTUR - Canarias surveys, which are as representative as possible, that is, they include surveys of all destinations to where the flights originate from a Canary Island airport. These surveys are also carried out by the INE, so, we must observe the surveys made by them not to survey the same flight.*

*This model is performed to obtain the optimal flight selection a survey by ISTAC. This has been implemented in a mathematical programming program called XPRESS MOSEL, and this is used to obtain computational results at each Canary Island airport.*

**Keywords:** Representation - Mathematical model - ISTAC - INE.



---

# Contenido

<b>Agradecimientos</b> .....	III
<b>Resumen/Abstract</b> .....	V
<b>Introducción</b> .....	IX
<b>1. Conceptos del problema</b> .....	1
1.1. Descripción de la encuesta .....	1
1.1.1. Introducción .....	1
1.1.2. Método de selección de vuelos y marco de selección .....	1
1.1.3. Tamaños muestrales .....	2
1.1.4. Muestra .....	3
1.2. Datos de viajes por países .....	3
1.3. Problema planteado y modelo matemático .....	6
1.3.1. Problema .....	6
1.3.2. Modelo matemático .....	8
<b>2. Herramientas matemáticas</b> .....	11
2.1. Introducción .....	11
2.2. Programación Lineal .....	12
2.3. Programación Lineal Entera .....	12
2.3.1. Formulando un problema (modelización) .....	13
2.3.2. Fortaleciendo una formulación (preproceso) .....	14
2.4. Optimización Combinatoria .....	15
2.4.1. Introducción .....	15
2.4.2. Problemas $\mathcal{NP}$ -duros .....	16

<b>3. Desarrollo del TFG</b> .....	17
3.1. Iniciación al problema .....	17
3.2. Implementación del modelo en XPRESS MOSEL .....	24
<b>4. Resultados computacionales</b> .....	29
4.1. Resultados de SPC (aeropuerto de La Palma) .....	29
4.1.1. Problemas no factibles .....	29
4.1.2. Problemas factibles .....	30
4.2. Resultados de TFN (aeropuerto de Tenerife Norte) .....	32
4.3. Resultados de ACE (aeropuerto de Lanzarote) .....	34
4.4. Resultados de LPA (aeropuerto de Gran Canaria) .....	36
4.5. Propuestas futuras .....	38
<b>Bibliografía</b> .....	41
<b>Lista de Tablas</b> .....	43
<b>Lista de Figuras</b> .....	45
<b>Poster</b> .....	47

---

## Introducción

El turismo, en su concepto estadístico, se refiere a la actividad de los visitantes que viajan a un destino fuera de su entorno habitual durante menos de un año. Las estadísticas sobre el turismo en la UE se componen por:

- Estadísticas relativas a la capacidad y a la ocupación en los alojamientos.
- Estadísticas relativas a la demanda turística.

Las estadísticas sobre la demanda turística se recogen en relación con el número de viajes turísticos y el número de pernoctaciones en esos viajes. En este contexto se encuentra la Encuesta de Movimientos Turísticos en Fronteras en Canarias (FRONTUR-Canarias).

El trabajo fin de grado consistirá en optimizar, en este caso, maximizar el número de encuestas que debe hacer el ISTAC para que la encuesta de FRONTUR tenga la mayor representatividad posible.

La recogida de datos para la encuesta de turismo de las Islas Canarias trae consigo analizar el número de vuelos hacia cada destino. Dependiendo de este número, y del horario de los vuelos, se eligen cuáles encuestar.

Para poder maximizar el número de vuelos, debemos tener en cuenta las siguientes restricciones:

- Los encuestadores se contratan sólo una semana al mes, es decir, 7 días consecutivos. Esto es, la encuesta se realiza solo una vez al mes, siendo ésta representativa a éste. También destacar que los datos obtenidos en las encuestas son publicados de forma trimestral.
- El horario de los encuestadores es continuo y de 8 horas. No hay exigencias en el horario.
- Hay un número de trabajadores definidos por día y aeropuerto. Este número varía dependiendo del aeropuerto canario.

- La encuesta FRONTUR-Canarias se debe hacer prácticamente a la totalidad del vuelo. Mencionar que la encuesta es pequeña y que el tiempo (“Speed”) que se tarda en hacer cada una es mínimo.
- Los aeropuertos en los que se debe aplicar el modelo son: TFS (aeropuerto de Tenerife Sur), LPA (aeropuerto de Gran Canaria), SPC (aeropuerto de La Palma), TFN (aeropuerto de Tenerife Norte), FUE (aeropuerto de Fuerteventura) y ACE (aeropuerto de Lanzarote).
- Las encuestas se realizan a los pasajeros de los vuelos con origen los aeropuertos canarios, y destino nacional o internacional.
- Las encuestas se realizan en una semana prefijada.
- Se debe diferenciar entre vuelos regulares y chárteres.
- Se debe tener en cuenta el número de pasajeros de los viajes para seleccionar o no el vuelo.

Nuestro objetivo es, teniendo en cuenta lo anterior, maximizar el número de encuestas que pueden realizar los entrevistadores para que haya la mayor representatividad posible de los viajes, sabiendo el número de salidas de cada uno de ellos, el número de pasajeros y el horario de los vuelos. Además, también debemos tener en cuenta, el país o la comunidad autónoma de destino del vuelo.

A parte, esta encuesta también es realizada por el INE (pero con distinto sistema, es decir, distinto número de entrevistadores, distintos días, etc.), por lo que, hay que observar los vuelos elegidos por ellos para no repetir destino seleccionado.

Para maximizar el número de encuestas debemos realizar un modelo matemático con unas series de restricciones (en las cuales se incluyen las mencionadas anteriormente).

La elección de los vuelos que debe encuestar el ISTAC es realizada por una empresa contratada por ellos. Nuestra labor en el TFG es, con la ayuda de la programación matemática, verificar si dicha empresa lo está haciendo de manera adecuada o puede haber una elección mejor y que sea más representativa.

La estructura de la memoria será la siguiente. Primero, en un primer capítulo, desglosaremos la encuesta y explicaremos en que consiste brevemente, desarrollaremos los datos de los viajes con origen un aeropuerto canario, y también, expondremos el modelo matemático diseñado. Luego, en un segundo capítulo, se desarrollará algunos aspectos de la programación matemática. En este capítulo se explica la manera de afrontar un problema de *programación lineal*, en especial, de *programación lineal entera*, es decir, se expresa la base de un modelo matemático.

A continuación, en un tercer capítulo, se expone el proceso llevado a cabo en el TFG, y el modelo implementado en un software de programación lineal (XPRESS MOSEL).

Y, por último, en un cuarto capítulo, se obtendrán los resultados computacionales para varios aeropuertos canarios.

## Conceptos del problema

En este primer capítulo empezaremos describiendo cuál es la labor del ISTAC respecto a la encuesta FRONTUR-Canarias. Al principio, se explicará en que consiste dicha encuesta, luego, se expondrá datos de diferentes aeropuertos canarios, para, por último, describir el modelo matemático realizado.

### 1.1. Descripción de la encuesta

#### 1.1.1. Introducción

La encuesta FRONTUR, que debemos maximizar, es realizada por el ISTAC (Instituto Canario de Estadística). Ésta consiste en obtener la máxima información de ciertos aspectos sobre los turistas que vuelan desde cualquier aeropuerto de las islas a cualquier lugar del mundo.

Los aeropuertos en los que se realizan la encuesta son: TFN, TFS, LPA, ACE, SPC y FUE.

Esta encuesta, a parte de ser realizada por el ISTAC, también la efectúa el INE (Instituto Nacional de Estadística). Por lo que, la muestra total del ámbito de Canarias queda constituida por la muestra diseñada por el INE y una muestra complementaria diseñada por el ISTAC. Reseñar que el INE remite al ISTAC el fichero con la muestra general con el fin de que éste lo integre con la muestra ampliada, y además, no se vuelvan a encuestar los vuelos ya entrevistados por el INE.

#### 1.1.2. Método de selección de vuelos y marco de selección

El tipo de muestreo utilizado es bietápico estratificado en las unidades de primera etapa. Para cada aeropuerto, en la primera etapa, se seleccionan vuelos

nacionales e internacionales, estratificados según país de destino y tipo de vuelo (regular o chárter). En esta etapa se aplica el modelo matemático a mostrar.

En la segunda etapa se seleccionan los pasajeros, intentando captar información de la mayoría de los pasajeros del vuelo, en las salas de espera para proceder al embarque.

Como marco de selección de vuelos se utiliza el fichero GESLOT proporcionado por la empresa Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea (AENA). El marco de selección se estratifica según los siguientes criterios:

1. Para vuelos internacionales:

- Aeropuerto de encuestación.
- Tipo de vuelo: regular/chárter.
- País de destino del vuelo.

2. Para vuelos nacionales:

- Aeropuerto de encuestación.
- Tipo de vuelo: regular/chárter.
- Aeropuerto nacional de destino del vuelo.

### 1.1.3. Tamaños muestrales

Para cada uno de los estratos muestrales, se definen tamaños mínimos de representación en la muestra combinada. La tabla siguiente indica los mínimos necesarios para representar a un estrato.

Viajeros por estrato	Tamaño muestral mínimo
N<60	20
De 60 a 999	80
De 1.000 a 9.999	200
De 10.000 a 24.999	400
De 25.000 a 39.999	500
De 40.000 a 59.000	600

**Tabla 1.1.** Tamaños mínimos necesarios.

Esta tabla nos expresa el número de pasajeros mínimos a encuestar dependiendo del número de pasajeros que vuelan a cada país o comunidad autónoma.



#### 1.1.4. Muestra

La muestra combinada de FRONTUR-Canarias se compone de encuestas a pasajeros en vuelos nacionales e internacionales con origen un aeropuerto canario. La muestra se compone de las siguientes tipologías de unidades de última etapa:

1. Pasajeros residentes fuera de España, que denominaremos como “extranjeros”:
  - a) Pasajeros extranjeros en vuelos internacionales con origen Canarias.
  - b) Pasajeros extranjeros en vuelos nacionales con origen Canarias.
2. Pasajeros residentes en España, pero no en Canarias, que denominaremos como “españoles”:
  - a) Pasajeros españoles en vuelos nacionales con origen Canarias.
  - b) Pasajeros españoles en vuelos internacionales con origen Canarias.
3. Pasajeros residentes en Canarias, que denominaremos como “canarios”:
  - a) Pasajeros canarios en vuelos nacionales con origen Canarias.
  - b) Pasajeros canarios en vuelos internacionales con origen Canarias.

## 1.2. Datos de viajes por países

A continuación, vamos a mostrar la cantidad de vuelos que hay en un determinado mes (abril de 2016) por país o comunidad autónoma, en dos aeropuertos canarios diferentes (TFN y TFS). Dicho mes será escogido como muestra (o ejemplo) para resolver el problema.

Se mostrarán dos tablas por aeropuerto; una con los vuelos regulares y otra con los vuelos chárteres. Aclarar que, en cada tabla, aparecen los datos del número de vuelos que hay en la semana prefijada por el ISTAC, la cual es del 10 al 16 de abril, y también, el número de pasajeros que vuelan hacia cada destino (País o C.A.<sup>\*</sup>) en dicho mes, al estimar un porcentaje de sus asientos ocupados (se ha tomado de media un porcentaje de 80%). Mostraremos solamente los datos de dos aeropuertos, debido a que los demás poseen vuelos con idénticos destinos, pero distinto número de vuelos durante la semana y el mes. Por supuesto, también poseen distinto número de pasajeros.

A continuación, empezaremos enseñando los datos de TFN, para después mostrar los de TFS.

---

<sup>\*</sup> C.A.:Comunidad Autónoma

**TFN:**

<b>País (C.A.)</b>	<b>Vuelos al mes</b>	<b>Vuelos a la semana</b>	<b>Número de pasajeros</b>
Marruecos	90	21	26.976
Senegal	26	7	3.952
Andalucía	271	78	347.194
Asturias	60	16	69.818
Cataluña	574	130	3.964.510
Comunidad de Madrid	808	184	10.798.570
Comunidad Valenciana	67	23	48.464
Galicia	99	77	164.323
País Vasco	167	37	287.472

**Tabla 1.2.** Tenerife Norte Regulares.

<b>País (C.A.)</b>	<b>Vuelos al mes</b>	<b>Vuelos a la semana</b>	<b>Número de pasajeros</b>
Letonia	1	1	144
Portugal	1	1	144
Andalucía	10	1	2.160
Aragón	22	7	3.168
Comunidad Valenciana	5	1	11.952
Galicia	4	1	6.502
Islas Baleares	6	1	6.392
País Vasco	11	1	5.472

**Tabla 1.3.** Tenerife Norte Chárteres.

El aeropuerto canario que tiene menor número de destinos es SPC. A parte, los vuelos con origen los aeropuertos ACE y FUE (poseen destinos muy similares) tienen muchos menos destinos que los que salen de TFS y LPA, pero muchos más que TFN y SPC. Luego, si ordenamos de menor a mayor por número de destinos de los vuelos con origen los aeropuertos canarios sería:

1. SPC (aeropuerto de La Palma).
2. TFN (aeropuerto de Tenerife Norte).
3. FUE (aeropuerto de Fuerteventura).
4. ACE (aeropuerto de Lanzarote).
5. TFS (aeropuerto de Tenerife Sur).
6. LPA (aeropuerto de Gran Canaria).

Así, veamos seguidamente los datos de TFS.

**TFS:**

País (C.A)	Vuelos al mes	Vuelos a la semana	Número de pasajeros
Alemania	2404	638	3.636.886
Austria	89	24	30.928
Bélgica	618	166	2.093.894
Finlandia	65	21	50.758
Francia	555	151	479.268
Holanda	505	126	1.626.407
Hungría	30	7	4.320
Irlanda	255	63	221.552
Islandia	60	14	19.200
Italia	513	121	401.364
Luxemburgo	76	22	68.592
Polonia	176	42	43.200
Portugal	30	7	9.072
Reino Unido	4617	1172	23.872.601
República Checa	61	14	21.384
Rumanía	60	14	12.960
Rusia	54	14	16.214
Suecia	30	7	17.856
Suiza	277	65	396.144
Andalucía	182	43	80.885
Aragón	30	7	13.104
Asturias	30	7	23.856
Cantabria	86	21	45.634
Cataluña	213	56	293.767
Comunidad de Madrid	295	75	1.498.572
Comunidad Valenciana	115	28	69.835
Galicia	83	21	74.803
País Vasco	85	19	29.520

**Tabla 1.4.** Tenerife Sur Regulares.

País (C.A)	Vuelos al mes	Vuelos a la semana	Número de pasajeros
Alemania	28	7	4.032
Dinamarca	217	61	318.903
Estonia	22	8	14.688
Finlandia	27	5	9.199
Francia	183	58	73.344
Holanda	57	8	98.930
Irlanda	28	7	12.701
Islanda	44	10	45.847
Letonia	27	8	16.416
Lituania	58	14	29.376
Noruega	67	12	34.957
Polonia	97	24	123.516
Reino Unido	1441	377	1.741.607
Suecia	451	145	754.239
Andalucía	22	7	5.280
Galicia	1	1	118

**Tabla 1.5.** Tenerife Sur Chárteres.

### 1.3. Problema planteado y modelo matemático

En esta sección empezaremos desglosando el problema, para después plantear el modelo matemático.

#### 1.3.1. Problema

Vamos a describir el problema en cuestión. Debemos realizar un modelo matemático que maximice el número de encuestas a realizar teniendo en cuenta algunas restricciones.

Las limitaciones o restricciones del problema son:

- Los encuestadores se contratan 7 días continuos al mes. Estos días son fijados, aproximadamente, un año antes de la fecha en cuestión. Éstos se pueden cambiar, pero llevan consigo temas burocráticos. Por eso, vamos a tomar los días como fechas fijas.
- Se debe cumplir el tamaño muestral mínimo (Ver tabla 1.1).
- El horario de los trabajadores es continuo y de 8 horas (480 minutos). Mencionar que el horario es flexible. Se puede empezar tanto a las 07:00 como a las 14:00.

- Hay un número de trabajadores definidos por día y aeropuerto. Hay un encuestador en SPC, dos encuestadores en ACE y FUE, tres en TFN y TFS, y por último, cuatro en LPA. El número de entrevistadores en cada aeropuerto es el mismo durante los siete días de la semana prefijada.
- La encuesta de FRONTUR se debe hacer prácticamente a la totalidad del vuelo. Se debe tener en cuenta el número de pasajeros de los viajes para seleccionar o no la encuesta. Como no sabemos que cantidad de personas viajan, debemos coger el número de asientos del avión utilizado en cada vuelo, y tomar un porcentaje de éste. Al porcentaje de ocupación sobre los asientos del avión se le llamara “Ocupación”, y al porcentaje del vuelo encuestado se le llamara “Entrevistas”.
- Mencionar que la encuesta es pequeña y el tiempo que se tarda en hacer cada una es mínimo. El tiempo en realizar cada encuesta es llamado Speed. Supongamos, como ejemplo, que se tarda minuto y medio. Por lo que, por ejemplo, si un avión posee 180 asientos (suponiendo Ocupación = 80 % y Entrevistas = 60 %), el tiempo en realizar la encuestas será (suponiendo que el vuelo es encuestado por un único entrevistador):

$$\begin{aligned} & \frac{3}{2} \text{ minuto} * 60 \% \text{ de los asientos} * 80 \% \text{ del pasaje} * 180 \text{ asientos} = \\ & = \frac{3}{2} * 0,6 * 0,8 * 180 = 129 \text{ minutos y } 36 \text{ segundos.} \end{aligned}$$

- Los aeropuertos donde se realizan las encuestas son: TFS (aeropuerto de Tenerife Sur), LPA (aeropuerto de Gran Canaria), TFN (aeropuerto de Tenerife Norte), FUE (aeropuerto de Fuerteventura), ACE (aeropuerto de Lanzarote) y SPC (aeropuerto de La Palma).
- Las encuestas se realizan a los pasajeros de los vuelos que salen de los aeropuertos canarios.
- Se debe diferenciar entre vuelos regulares y chárteres.
- Se debe tener en cuenta los vuelos encuestados por el INE.
- Un vuelo puede ser encuestado por uno o dos encuestadores. Nunca más de dos.

Destacar también que los vuelos chárteres y regulares, aunque se dirijan al mismo país, no son caracterizados con el mismo índice  $j$  (país $_j$ ). Veamos esto con un ejemplo, supongamos que se realizan vuelos regulares y chárteres a Alemania, entonces, se puede nombrar a *Alemania Regular* como el país número 2, y a *Alemania Chárter*, como el país número 15, y así, simplificar el modelo. Es decir, si hay un vuelo chárter caracterizado por el número 540 destino Alemania, entonces país (540) := 15, y si hay otro vuelo regular (320) destino Alemania, entonces país (320) := 2. Esto se hace para evitar que el modelo tenga más parámetros, ya que son muchos, como veremos a continuación. Para entender mejor esta idea, véase la Figura 3.4. que mostraremos en la página 21 (capítulo 3).

En la siguiente subsección, teniendo en cuenta las restricciones anteriores, se desarrolla el modelo matemático del problema.

### 1.3.2. Modelo matemático

Dado un aeropuerto canario, dada la semana prefijada, tenemos el siguiente modelo para el problema planteado.

#### Parámetros.

- NumEnt  $\equiv$  número de entrevistadores en un aeropuerto canario.
- NumVue  $\equiv$  número de vuelos (nacionales e internacionales) que salen de un aeropuerto canario en dicha semana.
- NumPaís  $\equiv$  número de países (comunidades autónomas) hacia donde se dirigen los vuelos con origen un aeropuerto canario en dicha semana.
- J  $\equiv$  jornada laboral medida en horas = 8 horas.
- Speed  $\equiv$  tiempo en minutos que se tarda en realizar una encuesta.
- NumVueINE  $\equiv$  número de vuelos que encuesta el INE durante dicha semana en un aeropuerto canario.
- Ocupación  $\equiv$  porcentaje de ocupación sobre el número de asientos.
- Entrevistas  $\equiv$  porcentaje de encuestas que se realizan sobre el total del pasaje.
- Entre =  $\{1, \dots, \text{NumEnt}\}$ .
- Vuelo =  $\{1, \dots, \text{NumVue}\}$ .
- País =  $\{1, \dots, \text{NumPaís}\}$ .
- VueloINE =  $\{1, \dots, \text{NumVueINE}\}$ .
- país<sub>i</sub>  $\equiv$  país (comunidad autónoma) al que se dirige el vuelo i,  $i \in \text{Vuelo}$ .
- hora<sub>i</sub>  $\equiv$  hora en la que despegue el vuelo i,  $i \in \text{Vuelo}$ .
- num.asientos<sub>i</sub>  $\equiv$  número de asientos que tiene el avión usado en el vuelo i,  $i \in \text{Vuelo}$ .
- día<sub>i</sub>  $\equiv$  día en el que se realiza el vuelo i,  $i \in \text{Vuelo}$ .
- encuestas<sub>i</sub>  $\equiv$  número de encuestas que se realizan al vuelo i,  $i \in \text{Vuelo}$ .
- NumMij  $\equiv$  número mínimo de encuestas a realizar dependiendo del número de vuelos hacia cada país (comunidad autónoma) j según exige la tabla 1.1,  $j \in \text{País}$ .
- consumo<sub>i</sub>  $\equiv$  tiempo que se tarda en encuestar un vuelo i si hubiera un único entrevistador encuestándolo,  $i \in \text{Vuelo}$ .
- país\_INE<sub>t</sub>  $\equiv$  país (comunidad autónoma) al que se dirige el vuelo t encuestado por el INE,  $t \in \text{VueloINE}$ .
- num.asientos\_INE<sub>t</sub>  $\equiv$  número de asientos del vuelo t encuestado por el INE,  $t \in \text{VueloINE}$ .
- hora\_INE<sub>t</sub>  $\equiv$  hora de salida del vuelo t encuestado por el INE,  $t \in \text{VueloINE}$ .
- día\_INE<sub>t</sub>  $\equiv$  día en el que se realiza el vuelo t encuestado por el INE,  $t \in \text{VueloINE}$ .

- disponible<sub>i</sub> que será:
  - 1, si un vuelo *i* *no* es encuestado por el INE,  $i \in \text{Vuelo}$ .
  - 0, si un vuelo *i* es encuestado por el INE,  $i \in \text{Vuelo}$ .
 Recordar que los vuelos encuestados por el INE ya se tienen.
- encuestas\_INE<sub>j</sub>  $\equiv$  número de encuestas hechas por el INE a cada país (comunidad autónoma)  $j$ ,  $j \in \text{País}$ .

Teniendo en cuenta lo anterior, se cumple que:

1. encuestas\_INE<sub>j</sub> =  $\sum_t \text{num\_asientos\_INE}_t * \text{Ocupación} * \text{Entrevistas}$ ,  
donde  $j = \text{país\_INE}_t$  y  $t \in \text{Vuelo\_INE}$ ,  $j \in \text{País}$ .
2. NumMi<sub>j</sub> = NumMi<sub>j</sub> - encuestas\_INE<sub>j</sub>  $\geq 0$ ,  
donde  $j \in \text{País}$ .
3. encuestas<sub>i</sub> = num\_asientos<sub>i</sub> \* Ocupación \* Entrevistas,  
donde  $i \in \text{Vuelo}$ .
4. consumo<sub>i</sub> = encuestas<sub>i</sub> \* Speed,  
donde  $i \in \text{Vuelo}$ .
5. Para todo  $i \in \text{Vuelo}$ ,  $t \in \text{Vuelo\_INE}$ :
  - Si día<sub>i</sub> = día<sub>t</sub>, hora<sub>i</sub> = hora<sub>t</sub>, país<sub>i</sub> = país<sub>t</sub> y num\_asientos<sub>i</sub> = num\_asientos\_INE<sub>t</sub>, entonces, disponible<sub>i</sub> := 0.
  - En otros caso, disponible<sub>i</sub> := 1.

### Variables.

- Para cada  $i \in \text{Vuelo}$  y para cada encuestador  $k \in \text{Entre}$ , sea  $x_{i,k}$  donde :
  - 1, cuando el encuestador  $k$  deba trabajar sobre  $i$ .
  - 0, en otro caso.
- Para cada  $i \in \text{Vuelo}$ , sea  $y_i$  donde :
  - 1, cuando se encuesta el vuelo  $i$ .
  - 0, en otro caso.

**Función Objetivo.**

$$\text{máx } \sum_i \text{encuestas}_i * y_i$$

donde  $i \in \text{Vuelo}$ .

**Restricciones.**

1. sujeto a:  $y_i \leq \text{disponible}_i$ , donde  $i \in \text{Vuelo}$ .
2. s.t :  $\sum_k x_{i,k} \leq 2 * y_i$ , donde  $i \in \text{Vuelo}$ ,  $k \in \text{Entre}$ .
3. s.t :  $\sum_k x_{i,k} \geq y_i$ , donde  $i \in \text{Vuelo}$ ,  $k \in \text{Entre}$ .
4. Para  $i, j \in \text{Vuelo}$  donde  $i \neq j$ ,  $\text{día}_i = \text{día}_j$  y  $\text{hora}_j \geq \text{hora}_i$  podemos distinguir cuatro casos:

a) Si  $\text{hora}_j - \text{hora}_i < \text{consumo}_j/2$ , entonces:

$$\text{s.t.: } x_{i,k} + x_{j,k} \leq 1,$$

donde  $k \in \text{Entre}$ .

b) Si  $\text{hora}_j - \text{hora}_i > J * 60 - \text{consumo}_i/2$ , entonces:

$$\text{s.t.: } x_{i,k} + x_{j,k} \leq 1,$$

donde  $k \in \text{Entre}$ .

c) Si  $\text{hora}_j - \text{hora}_i < \text{consumo}_j$ , entonces:

$$\text{s.t.: } x_{i,k} + x_{j,k} \leq 1 + \sum_l x_{j,l},$$

donde  $k, l \in \text{Entre}$  y  $l \neq k$ .

d) Si  $\text{hora}_j - \text{hora}_i > J * 60 - \text{consumo}_i$ , entonces:

$$\text{s.t.: } x_{i,k} + x_{j,k} \leq 1 + \sum_l x_{i,l},$$

donde  $k, l \in \text{Entre}$  y  $l \neq k$ .

5. s.t. :  $\sum_i \text{encuestas}_i * y_i \geq \text{NumMij}$ , donde  $i \in \text{Vuelo}$ ,  $j \in \text{País}$  y siendo  $j = \text{país}_i$ .

6. s.t. :  $x_{i,k} \in \{0,1\}$ ,  $\forall i \in \text{Vuelo}$  y  $\forall k \in \text{Entre}$ .

7. s.t. :  $y_i \in \{0,1\}$ ,  $\forall i \in \text{Vuelo}$ .



## Herramientas matemáticas

---

En este capítulo vamos a describir brevemente la *Programación Matemática*. Ésta es la base del modelo matemático que acabamos de exponer en la última sección del capítulo anterior.

### 2.1. Introducción

La *Programación Matemática* es una parte de la *Matemática Aplicada* que pretende resolver ciertos problemas de manera que se optimicen los recursos disponibles para obtener una mejor solución. La tarea principal de la Programación Matemática es resolver problemas tales como:

$$\min\{f(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in \mathcal{S}\}, \quad (2.1)$$

teniendo en cuenta que  $\mathcal{S} \subseteq \mathbb{R}^n$  y  $f: \mathcal{S} \rightarrow \mathbb{R}$ . A cada elemento de  $\mathcal{S}$  se le llama *solución factible*, a  $\mathcal{S}$  se le denomina *región factible* y a  $f$  se le nombra como *función objetivo*. También destacar que los problemas pueden ser de maximización, el cual es nuestro caso, debido a que se cumple que:

$$\max\{f(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in \mathcal{S}\} = -\min\{-f(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in \mathcal{S}\}. \quad (2.2)$$

Este tipo de problemas 2.1 se denominan *problemas de optimización*, donde se busca una solución factible  $\mathbf{x}^*$  tal que  $f(\mathbf{x}^*)$  sea mínimo. Los problemas 2.1 pueden ser de varios tipos:

- *Problema no factible*: No existe solución factible.
- *Problema no acotado*: En este caso hay soluciones que hacen descender infinitamente la función objetivo. Esto es,  $\forall M > 0 \exists \mathbf{x} \in \mathcal{S}$  tal que  $f(\mathbf{x}) < M$ .
- *Problema óptimo*: Existe un  $\mathbf{x}^* \in \mathcal{S}$  tal que  $f(\mathbf{x}^*) \leq f(\mathbf{x})$  para todo  $\mathbf{x} \in \mathcal{S}$ .

Es necesario conseguir resolver estos problemas, ya que éstos tienen gran importancia en la sociedad actual. En ésta pueden aparecer diversos tipos de problemas 2.1. Vamos a destacar estos:

- Programación Lineal Continua: Sucede cuando  $f$  es una función lineal en las componentes de  $\mathbf{x}$ , y  $\mathcal{S}$  son las soluciones de un sistema lineal de inequaciones.
- Programación Lineal Entera: Las soluciones deben tener sus componentes enteras.

Además, afirmar que la Programación Matemática se divide en varias ramas. De manera breve podemos distinguir entre: *Programación Lineal* y *Programación No Lineal*. La primera es cuando las ecuaciones son lineales, y la segunda cuando no lo son. También podemos distinguir entre *Programación Entera* (las variables son números enteros) y *Programación Continua* (las variables son números reales). Otra rama característica, que será desglosada posteriormente de forma breve, es la *Optimización Combinatoria*.

Por último, destacar que lo esencial de todo tipo de problemas 2.1 es el *modelo matemático*. Los modelos son representaciones de sistemas reales, donde se expresan las relaciones que hay entre ciertos elementos.

## 2.2. Programación Lineal

Como acabamos de mencionar, la *Programación Matemática* puede separarse en dos tipos de problemas principales: La *Programación Lineal Continua* y la *Programación Lineal Entera*.

El algoritmo principal en la resolución de problemas de programación lineal es el *algoritmo del simplex*. Éste fue propuesto por G.Dantzig en 1945. Este algoritmo lleva un proceso de explicación bastante largo, por lo que, será obviado.

Ahora, en la siguiente sección, nos centraremos en la *Programación Lineal Entera*.

## 2.3. Programación Lineal Entera

En esta sección hablaremos sobre los problemas típicos de la *Programación Lineal Entera*.

Estos tipos de problemas se basan en buscar soluciones que sean enteras. Los algoritmos que se desarrollan para resolverlos siguen la siguiente pauta:

$$\min\{\mathbf{c}^T\mathbf{x} : \mathbf{Ax} = \mathbf{b}, \mathbf{x} \geq \mathbf{0} \text{ y } x_j \in \mathbb{Z} \text{ para } j \in \mathcal{J}\}, \quad (2.3)$$

donde  $\mathcal{J} \subseteq \{1, \dots, n\}$ .

Destacar que si  $\mathcal{J} = \emptyset$ , estamos en el caso de un problema de Programación Lineal Continua. Si  $\mathcal{J} \subset \{1, \dots, n\}$ , entonces el problema 2.3 se llama de Programación Entera Mixta. Y, por último, si  $\mathcal{J} = \{1, \dots, n\}$ , se dice de Programación Entera Pura. Por lo tanto, nuestro objetivo será:

$$\min\{\mathbf{c}^T \mathbf{x} : \mathbf{Ax} = \mathbf{b}, \mathbf{x} \geq \mathbf{0} \text{ y } x_j \in \mathbb{Z} \text{ para } j \in \{1, \dots, n\}\}. \quad (2.4)$$

Mencionar que la diferencia entre un problema lineal continuo y uno entero no es que el valor objetivo  $\mathbf{c}^T \tilde{\mathbf{x}}$  de una solución óptima sea entera, sino que cada una de las componentes de  $\tilde{\mathbf{x}}$  ( $\tilde{x}_j$ ) sean enteras. Además, se tiene que, si todos los componentes  $\mathbf{c}_j$  del vector de costos  $\mathbf{c}$  son enteros, entonces el valor de la función objetivo será un entero.

Por último, veamos la siguiente definición que relaciona a un problema lineal entero con uno continuo.

**Definición 1** Se dice *relajación lineal* o *relajación continua* del problema entero 2.3 al problema lineal

$$\min\{\mathbf{c}^T \mathbf{x} : \mathbf{Ax} = \mathbf{b}, \mathbf{x} \geq \mathbf{0}\}. \quad (2.5)$$

### 2.3.1. Formulando un problema (modelización)

Es obvio que para empezar a resolver un problema de optimización, mediante Programación Matemática, es necesario escribir un *modelo matemático*. Pero, escribir éste no suele resultar una tarea sencilla, ya que no hay ninguna metodología por la cual podamos generar modelos matemáticos para cualquier problema de optimización. Los modelos se basan en las siguientes ideas que vamos a desarrollar.

#### Parámetros y variables de decisión.

Los parámetros y las variables de decisión son valores numéricos. La diferencia entre ambos es que el valor de los parámetros es conocido y ya se introducen como datos para poder aplicarlos en el modelo, y las variables de decisión son incógnitas que deben ser determinadas a partir de la solución del modelo.

#### Función Objetivo: Min-Max.

Las funciones objetivos de los problemas lineales siguen normalmente la siguiente fórmula:

$$\min_x \sum_{i=1, \dots, m} f^i(x). \quad (2.6)$$

Sin embargo, en algunos problemas de optimización, lo que se desea es minimizar el máximo de dicho conjunto, quedando una función objetivo del tipo:

$$\min_x \max_{i=1,\dots,m} f^i(x). \quad (2.7)$$

Si estamos en un problema de este tipo, entonces la función objetivo es no lineal. Pero, este problema se puede resolver al considerar una nueva variable continua  $z$  tal que:

$$\min_x z. \quad (2.8)$$

### Restricciones.

Cada modelo matemático, a parte de tener la función objetivo, tiene unas series de restricciones. Las restricciones son relaciones entre las variable decisión y los recursos disponibles. Éstas limitan el valor de la variable de decisión. Además, las restricciones algunas veces pueden no estar escritas en forma lineal, por lo que, su inclusión en el modelo lo convierte en un problema que no es de Programación Lineal Entera.

Es importante reseñar que estamos estudiando cómo formular problemas como modelos de Programación Lineal Entera. Sin embargo, no siempre es recomendable utilizar esta técnica de resolución porque puede ser que las restricciones sean complejas, y por lo tanto, se complicaría mucho el proceso al insertar el modelo en un software matemático. Por eso, a veces es mejor utilizar un algoritmo para resolver algunos problemas de Programación Lineal Entera antes que un modelo matemático.

#### 2.3.2. Fortaleciendo una formulación (preproceso)

Antes de intentar resolver cualquier modelo de optimización, conviene reducirlo al máximo, observando si existen variables y/o restricciones que son irrelevantes, entonces se procederá a eliminarlas. A esta tarea se le denomina *preproceso*.

Debido a que el modelo matemático es de Programación Lineal Entera, las variables de decisión deben estar en  $\{0, 1\}$ . Una idea básica de como *fortalecer* un modelo es observar todas las restricciones en su conjunto y eliminar una cierta restricción si ésta se tiene también mediante otra/s restricción/es.

Veamos varios ejemplos de restricciones a introducir dependiendo de los siguientes casos:

- Si observamos que si una variable  $x_i$  es 1, entonces  $x_j$  debe ser 1, luego, se debería añadir la formulación  $x_i \leq x_j$ .

- Si percibimos que las variable  $x_i$  y  $x_j$  no pueden valer 1 a la vez, entonces se escribe la restricción  $x_i + x_j \leq 1$ .
- Si observamos que alguna de las dos variables anteriores tiene que ser 1, entonces  $x_i + x_j \geq 1$ .

Estas ideas también pueden llevarse a cabo para más de dos variables. Supongamos un conjunto  $\mathcal{T}$  de variables que son incompatibles, es decir, que sólo una de ellas puede valer 1, entonces se podría introducir cualquiera de estas dos restricciones:

1. o bien  $x_i + x_j \leq 1, \forall i, j \in \mathcal{T}$ .
2. o bien  $\sum_{i \in \mathcal{T}} x_i \leq 1, \forall i \in \mathcal{T}$ .

Claramente la inecuación 2 domina a todas las restricciones en 1.

Estas inecuaciones adicionales son redundante desde el punto de vista del modelo entero, pero no desde el punto de vista lineal. Esto es debido a que estamos generando una relajación lineal mejor sin haber eliminado una solución entera del problema.

## 2.4. Optimización Combinatoria

En esta sección vamos describir brevemente los problemas  $\mathcal{NP}$ -duros.

### 2.4.1. Introducción

La *Optimización Combinatoria* es una parte de la Programación Matemática que estudia problemas de tipo

$$\text{mín}\{f(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in \mathcal{S}\}, \quad (2.9)$$

siendo  $|\mathcal{S}| < \infty$ . Esto es, la Optimización Combinatoria trata de desarrollar algoritmos para resolver problemas de optimización que tiene un número finito de soluciones factibles. Aunque sea un número finito de soluciones, normalmente es un número bastante grande, por lo que, no es fácil resolver este tipo de problemas.

Podemos distinguir dos tipos principales de problemas de Optimización Combinatoria. Uno de ellos son los problemas polinomiales (se ha desarrollado un modelo matemático polinomial que tiene fácil solución), entre los que destacan, el *problema de asignación*, el *problema de transporte*, el *problema del camino de coste mínimo*, etc. Otros tipos de problemas, y en los que nos centraremos en mayor profundidad son los  $\mathcal{NP}$ -duros. Entre ellos podemos destacar: el *TSP (problema del viajante de comercio)*, el *problema del árbol de Steiner*, el *problema de la mochila*, etc.

**2.4.2. Problemas  $\mathcal{NP}$ -duros**

Se denomina problemas  $\mathcal{P}$  a los polinomiales, es decir, a los que existe un algoritmo polinomial para cada uno de ellos. Y, se llama problemas  $\mathcal{NP}$ -duros a los que no tienen un algoritmo polinomial que proporcione la solución óptima. Por lo tanto, en el momento en el que se encuentre dicho algoritmo, ese problema pasará de la clase  $\mathcal{NP}$  a  $\mathcal{P}$ .

Destacar que, aunque para los problemas  $\mathcal{NP}$ -duros no se tiene un modelo matemático que proporcione la solución óptima del problema, existen algoritmos que no nos conceden el valor óptimo del problema, pero nos dan un valor cercano a éste.

## Desarrollo del TFG

En este capítulo desglosaremos lo realizado en el TFG. Se explicará como se actuaba para obtener información de los ficheros que me ofrecía el ISTAC. Y también, se expondrá el modelo implementado en el software de programación matemática XPRESS MOSEL.

### 3.1. Iniciación al problema

La selección de vuelos a encuestar por el ISTAC, en cada mes y en cada aeropuerto canario, es realizado por una empresa privada contratada por ellos. Mi labor, básicamente, consistió en ofrecerle al ISTAC una forma de comprobar si los vuelos seleccionados por dicha empresa era la idónea.

Al aplicar la programación matemática, se obtuvo el modelo planteado en el capítulo 1 y la implementación de éste (segunda, y última, sección de este capítulo), el cual sirve de gran ayuda al ISTAC para verificar que los vuelos seleccionados por dicha empresa y los sugeridos por el modelo coinciden.

Recordar que el INE seleccionaba una muestra a encuestar independiente del ISTAC. Pero éste tenía que tener en cuenta los vuelos seleccionados del INE para no volver a encuestarlos.

Veamos el proceso que llevé a cabo. Al principio, me introduje en el problema; luego, realicé el modelo matemático; para, por último, diseñar el modelo en el software XPRESS MOSEL, y aplicar éste a cada aeropuerto canario para obtener una solución.

Al principio, el ISTAC me dio una serie de archivos *.txt* llamados *GESLOT Canarias W-2016* (Winter 2016) y *GESLOT Canarias S-2017* (Summer 2017), en los que se encontraban los viajes que se realizaban a cada aeropuerto de destino durante cada periodo, es decir, por ejemplo, en W-2017 se encontraban los viajes que se realizan al menos un día entre octubre 2016 y marzo de 2017, y lo mismo con S-2017 (desde marzo de 2017 a octubre de 2017). Expresar que

marzo y octubre están contenidos en los dos ficheros debido a que el cambio se produce el 21 de cada respectivo mes.

Estos datos los observaba mediante un fichero Excel. En un primer lugar, me ocupé de saber a que países corresponden los aeropuertos hacia donde se dirigen los vuelos con origen las Islas Canarias. Por ejemplo, relacionaba AGP (aeropuerto de Málaga) con Andalucía o AMS (aeropuerto de Amsterdam) con Holanda, y así, tenía más facilidades para separar por comunidades autónomas o países.

Después de observar el destino de los vuelos, intenté entender el problema. Esto lo realicé con un ejemplo en concreto. Mediante unos archivos Excel, llamados *Hoja de incidencias (aeropuerto) 2017\_03*, obtuve la solución de la empresa del mes de marzo de 2017, y con esto, saqué varias conclusiones sobre el funcionamiento de la encuesta.

Indicaremos, a continuación, los códigos de los diferentes aeropuertos canarios y de los encuestadores utilizados.

1. Código de los aeropuertos canarios:

- ACE: A016.
- FUE: A008.
- LPA: A010.
- SPC: A017.
- TFN: A033.
- TFS: A034.

2. Código de los encuestadores por aeropuerto (ISTAC):

- ACE: 3501 y 3510.
- FUE: 3502 y 3511.
- LPA: 3505, 3506, 3507 y 3509.
- SPC: 3803 y 3816.
- TFN: 3808, 3812, 3813 y 3814.
- TFS: 3802, 3803, 3808 y 3810.

Como se puede observar, en TFN, TFS y SPC hay 4, 4 y 2 entrevistadores, respectivamente. Pero esto no es exactamente así. El número exacto de encuestadores en cada uno de los aeropuertos durante cada día fue descrito en la **subsección 1.3.1**. Por eso, también hay entrevistadores que pueden encuestar en dos aeropuertos. Por ejemplo, el entrevistador 3808 puede estar entrevistando en un día en TFN o TFS, o también el 3803 (SPC o TFS). Recordar que SPC posee un entrevistador; TFS y TFN, poseen tres.

En la imagen que se mostrará inmediatamente, se puede observar los datos de LPA del mes de marzo de 2017 (día 9). El punto fronterizo hace mención al



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	pto fronterizo	fecha	tipo_vuelo	compañía	vuelo	hora	pais_desti no	aerop_des tino	
2	A010	09/03/2017 0:00	3	BER	BER2347	13:05	126	DUS	
3	A010	09/03/2017 0:00	8	BLX	BLX242	14:05	131	ARN	
4	A010	09/03/2017 0:00	3	EVE	EVE1110	9:00	108	ALC	
5	A010	09/03/2017 0:00	3	EWG	EWG5905	11:20	102	VIE	
6	A010	09/03/2017 0:00	3	IBB	IBB6810	15:00	123	LIS	
7	A010	09/03/2017 0:00	3	IBK	IBK5872	10:05	120	OSL	
8	A010	09/03/2017 0:00	3	VLG	VLG3003	16:00	108	BCN	
9									

**Figura 3.1.** Datos de LPA (9 de marzo de 2017).

aeropuerto canario en cuestión; el tipo de vuelo, si es chárter (8) o regular (3); el país de destino, muestra el código de éste; etc.

A partir de los datos de marzo de 2017, obtuve la suficiente información para diseñar el modelo.

Posteriormente, a partir de los ficheros S-2017, conseguí el número de vuelos que había hacia cada aeropuerto nacional o internacional en el mes de abril. Tras una serie de procesos, que me llevó bastante tiempo, obtuve el número de vuelos hacia cada país o comunidad autónoma en la semana (del 10 al 16 de abril) y en el mes (abril) de los 6 aeropuertos canarios mencionados. Estos números de vuelos, como de pasajeros, fueron presentados para dos aeropuertos (TFS y TFN) en la **sección 1.2**.

Es obvio que tuve que separar por aeropuerto canario para observarlo de manera más clara. Esta separación se puede realizar debido a que cada uno de los aeropuertos es independiente respecto a los demás.

	U	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
4	500 31MAR2ABR	31/03/2017 10/04/2017	28/04/2017	16/04/2017	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	28	7	215321	O BREBRE	BRE	Alemania	
7	2E+05 28MAR1ABR	28/03/2017 10/04/2017	18/04/2017	16/04/2017	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	18	7	18673H	O CGNCGN	CGN	Alemania	
14	500 14ABR21ABR	14/04/2017 10/04/2017	21/04/2017	16/04/2017	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	8	3	14873W	O DRSDRS	DRS	Alemania	
18	2E+05 28MAR25ABR	28/03/2017 10/04/2017	25/04/2017	16/04/2017	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	25	7	27575T	O DUSDUS	DUS	Alemania	
29	500 31MAR21ABR	31/03/2017 10/04/2017	21/04/2017	16/04/2017	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	21	7	27575T	O DUSDUS	DUS	Alemania	
30	60 01ABR29ABR	01/04/2017 10/04/2017	29/04/2017	16/04/2017	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	29	7	18032A	O DUSDUS	DUS	Alemania	
33	30000 29MAR26ABR	29/03/2017 10/04/2017	26/04/2017	16/04/2017	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	26	7	18032A	O DUSDUS	DUS	Alemania	
34	7 26MAR30ABR	26/03/2017 10/04/2017	30/04/2017	16/04/2017	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	30	7	189758	O DUSDUS	DUS	Alemania	
35	60 01ABR29ABR	01/04/2017 10/04/2017	29/04/2017	16/04/2017	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	29	7	210321	O DUSDUS	DUS	Alemania	
36	2E+05 28MAR25ABR	28/03/2017 10/04/2017	25/04/2017	16/04/2017	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	25	7	212321	O DUSDUS	DUS	Alemania	
40	500 31MAR28ABR	31/03/2017 10/04/2017	28/04/2017	16/04/2017	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	28	7	212321	O DUSDUS	DUS	Alemania	
45	7 02ABR30ABR	02/04/2017 10/04/2017	30/04/2017	16/04/2017	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	29	7	212321	O DUSDUS	DUS	Alemania	
46	60 15ABR28OCT	15/04/2017 10/04/2017	28/10/2017	16/04/2017	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	16	2	189758	O DUSDUS	DUS	Alemania	
52	2E+05 11ABR34OCT	11/04/2017 10/04/2017	24/10/2017	16/04/2017	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	20	6	189758	O DUSDUS	DUS	Alemania	
54	2E+05 28MAR02MAY	28/03/2017 10/04/2017	02/05/2017	16/04/2017	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	30	7	150319	O FMOFMO	FMO	Alemania	
56	60 01ABR22ABR	01/04/2017 10/04/2017	22/04/2017	16/04/2017	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	22	7	220328	O FRAFRA	FRA	Alemania	
61	500 31MAR21ABR	31/03/2017 10/04/2017	21/04/2017	16/04/2017	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	21	7	220328	O FRAFRA	FRA	Alemania	
65	2E+05 28MAR25ABR	28/03/2017 10/04/2017	25/04/2017	16/04/2017	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	25	7	27575T	O FRAFRA	FRA	Alemania	
66	30000 29MAR12ABR	29/03/2017 10/04/2017	12/04/2017	16/04/2017	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	12	3	189758	O FRAFRA	FRA	Alemania	
69	7 26MAR30ABR	26/03/2017 10/04/2017	30/04/2017	16/04/2017	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	30	7	189758	O FRAFRA	FRA	Alemania	
71	500 31MAR27OCT	31/03/2017 10/04/2017	27/10/2017	16/04/2017	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	30	7	220328	O HAHAI	HAI	Alemania	
73	30000 29MAR26ABR	29/03/2017 10/04/2017	26/04/2017	16/04/2017	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	26	7	189758	O HAHAI	HAI	Alemania	
74	7 16ABR23ABR	16/04/2017 10/04/2017	23/04/2017	16/04/2017	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	8	1	189758	O HAHAI	HAI	Alemania	
78	2E+05 04ABR25ABR	04/04/2017 10/04/2017	25/04/2017	16/04/2017	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	22	7	189758	O HAHAI	HAI	Alemania	
82	500 31MAR27OCT	31/03/2017 10/04/2017	27/10/2017	16/04/2017	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO	30	7	180320	O HAMHAM	HAM	Alemania	

**Figura 3.2.** Datos de S-2016 de ACE.

La figura anterior hace incapié al desarrollo llevado a cabo para buscar información sobre que vuelos se realizan en la semana en cuestión. Vamos a describir la imagen. Se trata de un fichero Excel determinado por *GESLOT Canarias S-2017* que contiene los datos de los distintos vuelos. Explicaremos el contenido de dicho fichero.

La segunda columna de éste nos expresa desde que fecha a que fecha se realiza el vuelo. Es decir, por ejemplo, si aparece 10ABR25ABR, significa que el vuelo empezó a realizarse el día 10/04/2017, y acabó el 25 del mismo mes, llevándose a cabo cada uno de los días entre esas dos fechas. Luego, la novena columna (coloreada de amarillo) indica si el vuelo se realizó o no en la semana mencionada (verdadero o falso). Decir que todos son verdaderos debido a que ya se encuentra filtrado. En las siguientes dos columnas, obtenemos el número de vuelos hacia ese destino con una determinada compañía aérea en el mes y semana en cuestión, respectivamente. Y, por último, en las últimas dos columnas, obtenemos el aeropuerto hacia el que se dirige el vuelo y el país (o comunidad autónoma) al que pertenece éste.

En los datos dados por el ISTAC sólo se encontraba la segunda y penúltima columna, las demás fueron descritas para facilitar el proceso.

A parte de lo que se presenta en la imagen, también diferenciábamos entre vuelos chárteres y regulares, y también, se obtenía el número de asientos del avión usado en el vuelo (estos datos sí eran dados por el ISTAC).

Lo que se observa en la figura 3.2 son datos de ACE. El mismo sistema fue realizado para el resto de aeropuertos canarios.

Después de realizar esto para cada aeropuerto canario, me dispuse a sumar el número de pasajeros que se dirigen a cada país o comunidad autónoma. Tomaba un 80 % (estimado de media) del número de asientos del avión, y así, mirando la tabla 1.1, obtenía el número de pasajeros mínimos necesarios a encuestar. Estos números eran expresados mediante una tabla para cada aeropuerto canario. Véase el ejemplo de FUE-Regular en la siguiente figura.

País-Comunidad	Viajes total Abril	Viajes total semana	Número de pasajeros	Mínimo tabla
Alemania	2247	605	3.565.425	700
Andalucía	53	14	23.824	400
Austria	84	21	30.922	500
Bélgica	99	27	117.892	700
Cataluña	85	21	57.904	600
Comunidad de Madrid	213	52	536.021	700
Dinamarca	94	19	61.515	700
Estonia	15	6	2.160	200
Finlandia	25	3	9.693	200
Francia	333	84	212.370	700
Galicia	60	14	35.328	500
Holanda	176	43	309.147	700
Hungría	30	7	4.320	200
Irlanda	149	35	118.733	700
Italia	292	64	128.194	700
Lituania	17	2	5.904	200
Luxemburgo	34	7	18.451	400
País Vasco	60	14	12.960	400
Polonia	104	28	85.658	700
Reino Unido	2075	545	2.880.573	700
República Checa	40	14	9.779	200
Suecia	163	49	207.000	700
Suiza	80	20	24.480	400

**Figura 3.3.** Tabla datos mínimos FUE-Regular.

Después de obtener el tamaño muestral mínimo para cada país respecto a los vuelos que salen de los aeropuertos canarios (datos como los de la Figura 3.3. para cada aeropuerto canario), me dispuse a organizar la totalidad de vuelos que salen desde un aeropuerto. Esto es, asignaba un número a cada país o comunidad autónoma  $j$ , y a cada vuelo  $i$ , le describía un país[i], número de asientos[i], hora en minutos[i] y día[i]. La hora en minutos era aplicada así:

$$\text{hora en minutos}[i] = \text{hora}[i]*60 + \text{minutos}[i].$$

Véase con el siguiente ejemplo. Supongamos un vuelo  $i$  que sale a las 15:30, entonces, la hora en minutos[i] =  $15*60 + 30 = 930$ . Esto se realiza para facilitar el modelo.

En la siguiente imagen, mostraremos cómo se define a cada país, y el tamaño muestral mínimo de cada uno. Se mostrará, como ejemplo, el aeropuerto de Fuerteventura.

	Países	Numero	Mínimo tabla
Regular	Alemania	1	700
	Andalucía	2	400
	Austria	3	500
	Bélgica	4	700
	Cataluña	5	600
	Comunidad de Madrid	6	700
	Finlandia	7	200
	Francia	8	700
	Galicia	9	500
	Holanda	10	700
	Hungría	11	200
	Irlanda	12	700
	Italia	13	700
	Luxemburgo	14	400
	País Vasco	15	400
	Reino Unido	16	700
	República Checa	17	200
	Suiza	18	400
Charter	Alemania	19	200
	Dinamarca	20	200
	Estonia	21	80
	Finlandia	22	80
	Francia	23	400
	Holanda	24	200
	Italia	25	200
	Lituania	26	80
	Polonia	27	200
	Reino Unido	28	400
	Suecia	29	200

**Figura 3.4.** Asignación países FUE.

Y también, después de un largo proceso, se obtiene los datos de cada vuelo (país o comunidad autónoma a la que corresponde el destino del viaje, número de asientos del avión usado, hora de despegue y día de realización), con origen un aeropuerto canario. En ella se encuentran tanto los vuelos regulares como los chárteres. En la siguiente imagen, se observa apenas un fragmento de la totalidad de viajes de ACE, ya que en la semana del 10 al 16 de abril de 2017 hay 2169 vuelos en ACE, sin ser éste el aeropuerto canario que más salidas de vuelos tiene.

			País	Día	Asientos	Hora en minutos
BRE	Alemania	Regular	1	10	215	990
CGN	Alemania	Regular	1	10	185	845
DUS	Alemania	Regular	1	10	275	990
DUS	Alemania	Regular	1	10	275	585
DUS	Alemania	Regular	1	10	179	810
DUS	Alemania	Regular	1	10	179	810
DUS	Alemania	Regular	1	10	190	580
DUS	Alemania	Regular	1	10	210	925
DUS	Alemania	Regular	1	10	213	540
DUS	Alemania	Regular	1	10	213	540
DUS	Alemania	Regular	1	10	213	515
FMO	Alemania	Regular	1	10	150	1080
FRA	Alemania	Regular	1	10	221	955
FRA	Alemania	Regular	1	10	221	985
FRA	Alemania	Regular	1	10	275	595
FRA	Alemania	Regular	1	10	190	495
HAI	Alemania	Regular	1	10	221	1030
HAI	Alemania	Regular	1	10	190	585
HAI	Alemania	Regular	1	10	190	610
HAM	Alemania	Regular	1	10	179	965
HAM	Alemania	Regular	1	10	179	955

**Figura 3.5.** Tabla final ACE.

Después de conseguir una tabla para cada aeropuerto canario similar a la tabla mostrada en la figura anterior, me dispuse a observar los datos del INE. Éstos eran introducidos en formato *.txt* para utilizarlos en el programa XPRESS MOSEL, que desarrollaremos después.

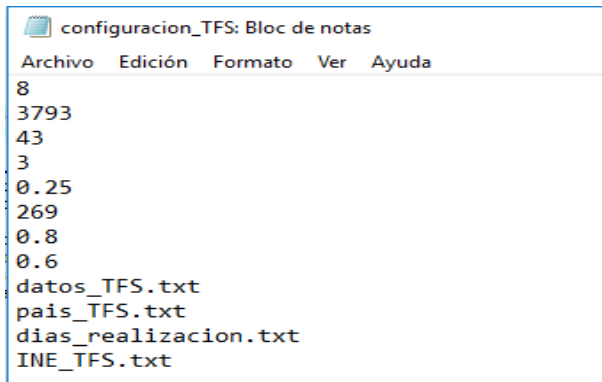
Debido al trabajo realizado con los distintos archivos Excel, se obtienen distintos ficheros *.txt*. Vamos a nombrar y definir cada fichero. Éstos son: *datos\_nombre.aeropuerto.txt* (contiene los datos de los vuelos, los cuales son: hora, día, país de destino y número de asientos de éstos), esto es, si por ejemplo, estamos analizando el problema en TFN, el nombre de este fichero sería *datos-TFN.txt*, y de forma idéntica con los ficheros que nombraremos a continuación; *pais\_nombre.aeropuerto.txt* (señala el número mínimo de encuestas que se

debe hacer a cada país  $j$  según el criterio establecido por el ISTAC; ver tabla 1.1); *INE\_nombre.aeropuerto.txt* (contiene los datos de los distintos vuelos encuestados por el INE, entre los que se encuentran el día de realización del viaje, su hora, el país de destino y el número de asientos); *dias\_realizacion.txt* (contiene los días de realización de las encuestas; en el ejemplo utilizado, encontramos, 10, 11, ..., 16).

Y, por último, se tiene un fichero *configuracion\_nombre.aeropuerto.txt* en el que se encuentra lo siguiente:

1.  $J$  = jornada laboral (8 horas).
2. número de viajes durante la semana.
3. número de países hacia donde se dirigen los vuelos realizados en esa semana.
4. número de entrevistadores por aeropuerto.
5. tiempo que se tarda en realizar una entrevista (en minutos).
6. número de vuelos encuestados por el INE durante ese mes.
7. porcentaje de pasaje respecto al número de asientos del avión utilizado para realizar el vuelo en cuestión.
8. porcentaje de encuestas realizadas respecto al número de pasajeros de cada vuelo.
9. Se llama al fichero *datos\_nombre.aeropuerto.txt*.
10. Se nombra al fichero *pais\_nombre.aeropuerto.txt*.
11. Se nombra al fichero *dias\_realizacion.txt*.
12. Se llama al fichero *INE\_nombre.aeropuerto.txt*.

Veamos un ejemplo en formato *.txt* de *configuracion\_nombre.aeropuerto.txt*.



```

8
3793
43
3
0.25
269
0.8
0.6
datos_TFS.txt
pais_TFS.txt
dias_realizacion.txt
INE_TFS.txt

```

**Figura 3.6.** *configuracion\_TFN.txt*.

Como se observa en la figura, el modelo contiene excesivos datos, por lo que, se tiene que realizar con un software lo suficientemente eficaz de programación matemática para obtener los resultados requeridos.

Al principio de mi experimento se implementó el modelo en el software GUSEK, pero éste no sugería solución para aeropuertos tales como TFS o LPA. Así que se tuvo que diseñar el modelo en XPRESS MOSEL, ya que con éste si se puede obtener resultados con más facilidad. Dicha implementación será mostrada en la siguiente sección.

### 3.2. Implementación del modelo en XPRESS MOSEL

A continuación, se mostrará el modelo descrito en el capítulo 1 en el programa XPRESS MOSEL.

---

```

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!Javier de León Morales.
!Trabajo Fin de Grado.Grado en Matemáticas.
!Optimization in the design of the Tourism survey for the ISTAC.

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

model "Optimizar las encuestas"
uses "mmpxpr", "mmive", "mmsystem"; ! Access to Xpress-Optimizer solver

parameters
    MaxNumVue = 10000 ! Maximun number of flights
    MaxNumPais = 50 ! Maximun number of countries
    MaxNumEnt = 4 ! Maximun number of interviewers
    MaxNumVueINE = 1000 !Maximun number of flights interviewed by INE
end-parameters

declarations
    J : integer !workday. Available hours
    NumVue : integer !Number of flights in the week
    NumPais : integer !Number of countries to which the flights are directed
    NumEnt : integer !Number of interviewers at an airport
    Speed : real !Time to do an interview
    NumVueINE : integer !Number of flights surveyed by INE
    Ocupacion : real !Percentage of occupation
    Entrevistas : real ! Percentage of interviews regarding the passage
    datos_fichero : string !Name of the file:datos.txt
    pais_fichero : string !Name of the file:pais.txt
    INE_fichero : string !Name of the file:INE.txt
    dias_realizacion : string !Name of the file:dias_realizacion.txt
end-declarations

!Reading a file: configuracion.txt
fopen("configuracion_airport.name.txt",F_INPUT)
read(J)
read(NumVue)
read(NumPais)
read(NumEnt)
read(Speed)
read(NumVueINE)
read(Ocupacion)
read(Entrevistas)
read(datos_fichero)

```

```

read(pais_fichero)
read(dias_realizacion)
read(INE_fichero)
fclose(F_INPUT)

if(NumVue > MaxNumVue ) then
    write("ERROR: aumenta MaxNumVue por encima de ",NumVue)
    exit(1)
end-if
if(NumPais > MaxNumPais ) then
    write(" ERROR: aumenta MaxNumPais por encima de ",NumPais)
    exit(2)
end-if
if(NumEnt > MaxNumEnt ) then
    write("ERROR: aumenta MaxNumEnt por encima de ",NumEnt)
    exit(3)
end-if
if(NumVueINE > MaxNumVueINE ) then
    write(" ERROR: aumenta MaxNumVueINE por encima de ",NumVueINE)
    exit(4)
end-if

declarations

    Entre = 1..NumEnt ! Set of interviewers
    Vuelo = 1..NumVue ! Set of flights
    Pais = 1..NumPais ! Set of countries
    VueloINE = 1..NumVueINE !Set of flights surveyed by the INE
    Diasreal = 1..7 !Set of days

    ! Minimum number of interviews per country j
    NumMi : array(Pais) of integer

    !Number of surveys done by INE by each country j
    encuestas_INE : array(Pais) of integer

    ! Departure country of flight i
    pais : array(Vuelo) of integer

    ! Flight departure time i
    hora : array(Vuelo) of integer

    ! Number of seats on a flight i
    num_asientos : array(Vuelo) of integer

    !Number of flights surveys i
    encuestas : array(Vuelo) of integer

    ! Day on which flight is performed i
    dia : array(Vuelo) of integer

    ! Time it takes to poll a flight with only one interviewer
    consumo : array(Vuelo) of integer

    ! 0, if the flight i surveyed by the INE; 1, othe case.
    disponible : array(Vuelo) of integer

    !First flight interviewed by the interviewer k
    hora_minima : array(Entre) of integer

    !Each interviewer's final work time k
    hora_maxima : array(Entre) of integer

```

```

!Start time of each interviewer k
hora_inicial : array(Entre) of integer

!Country to where the flight is headed t polled by the INE
pais_INE : array(VueloINE) of integer

!Seats of the flight t that is surveyed by the INE
num_asientos_INE : array(VueloINE) of integer

!Hour in minutes to which flight t leaves being surveyed by INE
hora_INE : array(VueloINE) of integer

!Day that takes off the flight t that is surveyed by the INE
dia_INE : array(VueloINE) of integer

end-declarations

! We read the problem data from a file "datos_airport.name.txt"
fopen(datos_fichero,F_INPUT)
forall(i in Vuelo) do
    read(pais(i))
    read(num_asientos(i))
    read(hora(i))
    read(dia(i))
end-do

! We read the problem data from a file "pais_airport.name.txt"
fopen(pais_fichero,F_INPUT)
forall(j in Pais) read(NumMi(j))
fclose(F_INPUT)

!We read, from a "dias_realizacion.txt" file, the days of the realization
fopen(dias_realizacion,F_INPUT)
forall(p in Diasreal) read(dia_vuelo(p))
fclose(F_INPUT)

! We read the problem data from a file "INE_airport.name.txt"
fopen(INE_fichero, F_INPUT)
forall(t in VueloINE)do
    read(pais_INE(t))
    read(num_asientos_INE(t))
    read(hora_INE(t))
    read(dia_INE(t))
end-do
fclose(F_INPUT)

forall(j in Pais) do
!Number of people surveyed by INE for country j
encuestas_INE(j) := sum(t in VueloINE | j = pais_INE(t)) ceil(num_asientos_INE(t)*Ocupacion*Entrevistas)
end-do
forall(j in Pais) NumMi(j):= NumMi(j)-encuestas_INE(j) !Minimum number of people surveyed
forall(i in Vuelo) do
encuestas(i) := ceil(num_asientos(i)*Ocupacion*Entrevistas) !Number of surveys on flight i
end-do
forall(i in Vuelo) do
consumo(i):= ceil(encuestas(i)*Speed) !Time it takes to poll a flight i with only one interviewer
end-do
forall(i in Vuelo, t in VueloINE) do
    if(dia(i)=dia_INE(t) and hora(i)=hora_INE(t) and pais(i)= pais_INE(t) and num_asientos(i)
= num_asientos_INE(t)) then
        disponible(i):=0
    else disponible(i):=1

```



```

    end-if
end-do
forall(j in Pais) do
    Contador := 0
    !Total of people interviewed
    forall(i in Vuelo | pais(i)=j ) Contador := Contador + num_asientos(i)
    if (NumMi(j) <= 0 or Contador*Ocupacion*Entrevistas < NumMi(j) ) then
        NumMi(j) := 0
    end-if
end-do

declarations

!1 if flight i is interviewed by the interviewer k, 0 another case
x : array(Vuelo,Entre) of mpvar

! 1 if the flight i is surveyed, 0 another case
y : array(Vuelo) of mpvar

end-declarations

procedure write_results
case getprobatat of
    XPRS_OPT: do
        writeln("Tenemos solucion optima:")
        writeln("El numero de pasajeros entrevistados es ", sum(i in Vuelo) encuestas(i) * get-
sol(y(i)) )
        writeln("El numero de vuelos entrevistados es ", sum(i in Vuelo) getsol(y(i)) , " de un
total de ",NumVue)

        MaxDia := 0
        MinDia := 1000

        forall(i in Vuelo) do
            if( dia(i)<MinDia ) then MinDia := dia(i)
            end-if
            if( dia(i)>MaxDia ) then MaxDia := dia(i)
            end-if
        end-do
        forall(j in MinDia..MaxDia) do
            Contador := 0
            forall(i in Vuelo | dia(i)=j and getsol( y(i) )=1 ) Contador := Contador+1
            writeln(" Los vuelos entrevistados el dia ",j,"son ",Contador)
        end-do
        forall(k in Entre, j in MinDia..MaxDia) do
            Contador := 0
            forall(i in Vuelo | dia(i)=j and getsol( x(i,k) )=1 ) Contador := Contador+1
            writeln("Entrevistador ",k," el dia ",j," entrevista ",Contador," vuelos")
        end-do
        forall(i in Vuelo) do
            Contador := 0
            forall(k in Entre | getsol( x(i,k) )=1 ) do
                Contador := Contador+1
                writeln("Vuelo ",i," es encuestado por ",k," el dia ", dia(i))
            end-do
            if( Contador>1 ) then
                writeln("Vuelo ",i," realizado por ",Contador," entrevistadores")
            end-if
        end-do
        forall(k in Entre)do
            forall(p in Diasreal)do
                hora_maxima(k):= 0 !0 minutes
                hora_minima(k):= 1440 !24*60=1440 minutes
                forall(i in Vuelo | getsol(x(i,k))=1 and dia_vuelo(p)=dia(i))do

```

```

        if( hora_maxima(k) < hora(i) )then
            hora_maxima(k) := hora(i)
        end-if
        if( hora_minima(k) > hora(i)-consumo(i) ) then
            hora_minima(k) := hora(i)-consumo(i)
        end-if
    end-do
    writeln("El encuestador ", k, " en el dia ", dia_vuelo(p), " comienza a las ", hora_minima(k), " y termina a las ", hora_maxima(k), " es decir, trabaja ", (hora_maxima(k)-hora_minima(k))/60., " horas")
end-do
end-do
end-do
XPRS_INF: writeln("Problema no factible")
XPRS_UNB: writeln(" Problema no acotado")
XPRS_UNF: writeln(" Ejecucion sin terminar")
else
    writeln("XPRESS ha terminado con un estado extraño")
end-case
end-procedure

setparam("xprs_loadnames",true)

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!Restrictions:

forall(i in Vuelo) y(i) <= disponible(i)
forall(i in Vuelo) sum(k in Entre) x(i,k) <= 2*y(i)
forall(i in Vuelo) sum(k in Entre) x(i,k) >= y(i)
forall(i,j in Vuelo | i<>j and dia(i)=dia(j) and hora(j)>=hora(i) ) do
    if( hora(j)-hora(i) < consumo(j)/2 or hora(j)-hora(i) > J*60-consumo(i)/2 ) then
        forall(k in Entre) x(i,k)+x(j,k) <= 1
        elif( hora(j)-hora(i) < consumo(j) ) then
            forall(k in Entre) x(i,k)+x(j,k) <= 1 + sum(l in Entre | l<>k ) x(j,l)
        elif( hora(j)-hora(i) > J*60-consumo(i) ) then
            forall(k in Entre) x(i,k)+x(j,k) <= 1 + sum(l in Entre | l<>k ) x(i,l)
        end-if
    end-do
forall(j in Pais) sum(i in Vuelo | j=pais(i)) encuestas(i)*y(i) >= NumMi(j)
forall(i in Vuelo , k in Entre) x(i,k) is_binary
forall(i in Vuelo) y(i) is_binary

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!Objective function
maximize( sum(i in Vuelo) encuestas(i) * y(i))
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!We write the results on the screen
write_results

!We write the results in a file
fopen("resultados_airport.name.txt", F_OUTPUT + F_APPEND)
write_results
fclose(F_OUTPUT)

end-model

```

---

## Resultados computacionales

En este capítulo mostraremos los resultados obtenidos en algunos aeropuertos. Sabiendo que son muchos aeropuertos canarios, y además, algunos cuentan con destinos similares, entonces no desarrollaremos todos.

Iremos describiendo los vuelos que se deben encuestar con origen un aeropuerto canario y destino nacional o internacional. Empezaremos por SPC, para después enseñar TFN, ACE y, por último, LPA. Como cada día se encuestan bastantes vuelos para determinados aeropuertos, expondremos todos los vuelos encuestados únicamente para el aeropuerto con menor frecuencia, éste es, SPC, y para los demás aeropuertos se mostrará un único día escogido al azar.

Reseñar que según los valores que se utilicen para Speed (tiempo que se tarda en hacer una encuesta), el problema será factible o no.

### 4.1. Resultados de SPC (aeropuerto de La Palma)

En esta sección vamos a distinguir varios casos, dependiendo del valor de Speed. Esto también sucederá en secciones posteriores, pero en ellas observaremos únicamente los vuelos encuestados para un cierto Speed que proporcione un problema factible.

#### 4.1.1. Problemas no factibles

Nombremos los casos donde el problema es no factible. Por ejemplo, si establecemos que se tarda 2.0 minutos en realizar cada encuesta, XPRESS MOSEL nos muestra por pantalla “Problema no factible”. Además, si exigimos que se tarda 1.5 minutos, también nos sale “Problema no factible”.

Esto es debido a que se debe cumplir el tamaño muestral mínimo de la tabla 1.1 para cada comunidad autónoma o país, y también, para los vuelos

regulares y chárteres. Por lo que, pueden haber coincidencias entre vuelos que despeguen a la misma hora (o que tengan una hora cercana de despegue) del mismo aeropuerto, y que, además, tengan pocos vuelos hacia ese destino.

#### 4.1.2. Problemas factibles

Mencionar que cuanto más pequeño sea Speed, mayor es el número de encuestas, y por lo tanto, mayor es la posibilidad de estar ante un problema factible, y, por supuesto, con solución óptima.

Sucede que para Speed := 1.0 estamos ante un problema factible. Por lo tanto, para cualquier valor que tome Speed tal que éste sea menor que 1 minuto, tendríamos solución óptima. Veamos los resultados que se obtienen para Speed := 1.0 minuto en SPC.

#### Resultados

- El número de pasajeros entrevistados es 2.289 pasajeros.
- El número de vuelos entrevistados es 25 de un total de 205.
- Entrevistas por día:
  1. Los vuelos entrevistados el día 10 son 4.
  2. Los vuelos entrevistados el día 11 son 4.
  3. Los vuelos entrevistados el día 12 son 3.
  4. Los vuelos entrevistados el día 13 son 4.
  5. Los vuelos entrevistados el día 14 son 3.
  6. Los vuelos entrevistados el día 15 son 4.
  7. Los vuelos entrevistados el día 16 son 3.
- Todos los vuelos son entrevistados por un único entrevistador, ya que SPC sólo posee uno.

Ahora vamos a enseñar los vuelos encuestados en cada día. Vamos a mostrar diferentes cuadros, en los cuales aparecen los vuelos entrevistados en cada día, desde el 10 al 16 de abril. En estos cuadros tenemos: el primer dato que aparece es el aeropuerto de destino; luego, el país o comunidad autónoma de destino; después, la hora de salida del vuelo; y, por último, nos indica si éste es regular o chárter.

#### Vuelos encuestados día 10 de abril de 2017.

##### Día 10.

- BLL, Dinamarca, 11:25, Chárter.
- MAD, Comunidad de Madrid, 14:10, Regular.
- ZRH, Suiza, 15:40, Regular.
- AMS, Holanda, 17:50, Regular.

**Vuelos encuestados día 11 de abril de 2017.****Día 11.**

- CPH, Dinamarca, 11:40, Chárter.
- LGW, Reino Unido, 14:35, Chárter.
- DUS, Alemania, 16:20, Regular.
- AMS, Holanda, 18:00, Regular.

**Vuelos encuestados día 12 de abril de 2017.****Día 12.**

- LGW, Reino Unido, 10:15, Regular.
- GOT, Suecia, 13:40, Chárter.
- MUC, Alemania, 16:35, Regular.

**Vuelos encuestados día 13 de abril de 2017.****Día 13.**

- CPH, Dinamarca, 11:40, Chárter.
- LGW, Reino Unido, 14:35, Chárter.
- DUS, Alemania, 16:20, Regular.
- AMS, Holanda, 18:00, Regular.

**Vuelos encuestados día 14 de abril de 2017.****Día 14.**

- LGW, Reino Unido, 10:15, Regular.
- MAD, Comunidad de Madrid, 14:10, Regular.
- MUC, Alemania, 16:35, Regular.

**Vuelos encuestados día 15 de abril de 2017.****Día 15.**

- NTE, Francia, 09:50, Chárter.
- HAM, Alemania, 11:25, Regular.
- MAD, Comunidad de Madrid, 14:10, Regular.
- ZRH, Suiza, 15:40, Regular.

**Vuelos encuestados día 16 de abril de 2017.****Día 16.**

- LGW, Reino Unido, 10:15, Regular.
- LGW, Reino Unido, 14:35, Chárter.
- DUS, Alemania, 16:20, Regular.

**4.2. Resultados de TFN (aeropuerto de Tenerife Norte)**

En esta segunda sección se observarán los vuelos que son encuestados según XPRESS MOSEL para TFN en dicha semana. Tomaremos Speed := 0.5 minutos, lo que equivale a que no se puede tardar más de 30 segundos en hacer una encuesta porque si no el problema es no factible. También, se exigirá que Entrevistas := 0.5, es decir, se encuesta a la mitad del pasaje; y Ocupación := 0.8.

**Resultados**

- El número de pasajeros entrevistados es 12.840 pasajeros.
- El número de vuelos entrevistados es 184 de un total de 537.
- Entrevistas por día:
  1. Los vuelos entrevistados el día 10 son 25.
  2. Los vuelos entrevistados el día 11 son 26.
  3. Los vuelos entrevistados el día 12 son 30.
  4. Los vuelos entrevistados el día 13 son 26.
  5. Los vuelos entrevistados el día 14 son 26.
  6. Los vuelos entrevistados el día 15 son 26.
  7. Los vuelos entrevistados el día 16 son 25.
- Número de vuelos encuestados por día y entrevistador:
  - Entrevistador 1: Día 10 entrevista 10 vuelos, día 11 entrevista 9 vuelos, día 12 entrevista 11 vuelos, día 13 entrevista 9 vuelos, día 14 entrevista 10 vuelos, día 15 entrevista 10 vuelos. día 16 entrevista 10 vuelos.
  - Entrevistador 2: Día 10 entrevista 9 vuelos, día 11 entrevista 9 vuelos, día 12 entrevista 11 vuelos, día 13 entrevista 12 vuelos, día 14 entrevista 10 vuelos, día 15 entrevista 10 vuelos, día 16 entrevista 9 vuelos.
  - Entrevistador 3: Día 10 entrevista 11 vuelos, día 11 entrevista 9 vuelos, día 12 entrevista 11 vuelos, día 13 entrevista 12 vuelos, día 14 entrevista 10 vuelos, día 15 entrevista 7 vuelos, día 16 entrevista 9 vuelos.

Para este caso, XPRESS no ha encontrado prueba de optimalidad, sino que, en las dos horas de ejecución que se ha dejado al programa, ha generado 38 soluciones enteras. Por lo que, tenemos una “buena” solución.

A continuación, mostraremos un único cuadro, el cual corresponde al día 10 de abril de 2017. Para el resto de días se obtienen diversos vuelos seleccionados de forma idéntica. En este cuadro habrá diferentes datos. El primer dato será el aeropuerto de destino, luego, el país, la hora de despegue; después, se indica si el vuelo es regular o chárter, y, por último, se expone el entrevistador que lo encuesta.

### Vuelos encuestados día 10 de abril de 2017.

#### Día 10.

- ZAZ, Aragón, 07:00, Chárter, Entrevistador: 2.
- AGP, Andalucía, 07:55, Regular, Entrevistador: 2.
- VLC, Comunidad Valenciana, 08:05, Regular, Entrevistador: 3.
- BCN, Cataluña, 08:35, Regular, Entrevistador: 2.
- BIO, País Vasco, 08:45, Regular, Entrevistador: 3.
- MAD, Comunidad de Madrid, 09:10, Regular, Entrevistadores: 2 y 3.
- BIO, País Vasco, 09:30, Regular, Entrevistadores: 2 y 3.
- DKR, Senegal, 09:45, Regular, Entrevistador: 2.
- MAD, Comunidad de Madrid, 10:25, Regular, Entrevistador: 3.
- AGA, Marruecos, 10:35, Regular, Entrevistador: 1.
- OVD, Asturias, 11:40, Regular, Entrevistador: 1.
- AGP, Andalucía, 12:05, Regular, Entrevistadores: 1 y 3.
- AGP, Andalucía, 12:05, Regular, Entrevistador: 2.
- MAD, Comunidad de Madrid, 13:15, Regular, Entrevistador: 1.
- MAD, Comunidad de Madrid, 13:40, Regular, Entrevistador: 3.
- MAD, Comunidad de Madrid, 13:40, Regular, Entrevistador: 2.
- PMI, Baleares, 14:00, Chárter, Entrevistador: 1.
- BCN, Cataluña, 14:15, Regular, Entrevistadores: 2 y 3.
- ALC, Comunidad Valenciana, 14:45, Regular, Entrevistador: 1.
- SVQ, Galicia, 15:00, Regular, Entrevistador: 3.
- MAD, Comunidad de Madrid, 15:35, Regular, Entrevistador: 1.
- MAD, Comunidad de Madrid, 15:35, Regular, Entrevistador: 3.
- MAD, Comunidad de Madrid, 16:55, Regular, Entrevistador: 1.
- MAD, Comunidad de Madrid, 17:40, Regular, Entrevistador: 1.
- CMN, Marruecos, 18:10, Regular, Entrevistador: 1.

### 4.3. Resultados de ACE (aeropuerto de Lanzarote)

En esta sección veremos los resultados para el aeropuerto de Lanzarote. Destacar que los destinos de los vuelos nacionales o internacionales con origen FUE (y la cantidad de viajes hacia cada destino) son similares a los destinos de los vuelos con salida en ACE, por eso, se va a obviar los resultados para el aeropuerto de la isla de Fuerteventura.

Sea  $\text{Speed} := 0.5$  minutos,  $\text{Ocupación} := 0.8$  y  $\text{Entrevistas} := 0.5$ . Para estos datos, y después de 1 hora de ejecución, se observó una “buena” solución, pero no se llegó a la solución óptima. Obsérvese la siguiente figura.

Stats			
<b>Matrix:</b>		<b>Presolved:</b>	
Rows(constraints):	206552	Rows(constraints):	60839
Columns(variables):	6507	Columns(variables):	6507
Nonzero elements:	467429	Nonzero elements:	289708
Global entities:	6507	Global entities:	6507
Sets:	0	Sets:	0
Set members:	0	Set members:	0
<b>Overall status: Performing LP relaxation...</b>			
<b>LP relaxation:</b>		<b>Global search:</b>	
<b>Algorithm:</b>	<b>Simplex primal</b>	Current node:	65218
Simplex iterations:	7630	Depth:	195
Objective:	24867.2	Active nodes:	28980
Status:	Unfinished	Best bound:	23301.5
Time:	5.4s	Best solution:	11751
		Gap:	98.2936%
		Status:	36 integer solution(s) found...
		Time:	3604.3s

**Figura 4.1.** Ejecución de ACE con XPRESS.

En esta figura se puede observar que para ACE no se obtiene solución óptima, sino 36 posibles soluciones enteras. La tardanza en encontrar una solución se debe al excesivo número de variables (6.507) y sobre todo, al número de restricciones (60.839).

### Resultados

- El número de pasajeros entrevistados es 11.751 pasajeros.
- El número de vuelos entrevistados es 145 de un total de 2.169.
- Entrevistas por día:
  1. Los vuelos entrevistados el día 10 son 21.
  2. Los vuelos entrevistados el día 11 son 20.
  3. Los vuelos entrevistados el día 12 son 20.
  4. Los vuelos entrevistados el día 13 son 20.



5. Los vuelos entrevistados el día 14 son 21.
  6. Los vuelos entrevistados el día 15 son 21.
  7. Los vuelos entrevistados el día 16 son 22.
- Número de vuelos encuestados por día y entrevistador:
    - Entrevistador 1: Día 10 entrevista 10 vuelos, día 11 entrevista 12 vuelos, día 12 entrevista 10 vuelos, día 13 entrevista 12 vuelos, día 14 entrevista 12 vuelos, día 15 entrevista 10 vuelos. día 16 entrevista 11 vuelos.
    - Entrevistador 2: Día 10 entrevista 11 vuelos, día 11 entrevista 11 vuelos, día 12 entrevista 11 vuelos, día 13 entrevista 11 vuelos, día 14 entrevista 12 vuelos, día 15 entrevista 11 vuelos, día 16 entrevista 12 vuelos.

De forma idéntica a TFN, se mostrará, a continuación, un único cuadro (día 14 de abril de 2017) para ACE. Recordar que en este aeropuerto se corresponden 2 encuestadores, a diferencia de TFN, que hay 3.

#### Vuelos encuestados día 14 de abril de 2017.

##### Día 14.

- AMS, Holanda, Regular, 10:40, Entrevistador: 2.
- MAN, Reino Unido, Regular, 11:40, Entrevistador: 2.
- BHX, Reino Unido, Regular, 12:25, Entrevistador: 2.
- AGP, Andalucía, Regular, 12:50, Entrevistadores: 1 y 2.
- HEL, Finlandia, Chárter, 13:10, Entrevistadores: 1 y 2.
- BFS, Reino Unido, Regular, 13:50, Entrevistador: 1.
- GLA, Reino Unido, Chárter, 14:00, Entrevistador: 2.
- BCN, Cataluña, Regular, 14:45, Entrevistador: 2.
- MAN, Reino Unido, Regular, 15:05, Entrevistador: 1.
- LUX, Luxemburgo, Regular, 15:25, Entrevistador: 2.
- SCQ, Galicia, Regular, 15:45, Entrevistador: 1.
- BCN, Cataluña, Regular, 16:05, Entrevistador: 2.
- MAD, Comunidad de Madrid, Regular, 16:25, Entrevistador: 1.
- BIO, País Vasco, Regular, 17:00, Entrevistador: 2.
- SVQ, Andalucía, Regular, 17:05, Entrevistador: 1.
- STN, Reino Unido, Regular, 17:45, Entrevistador: 1.
- STN, Reino Unido, Regular, 17:45, Entrevistador: 2.
- FMO, Alemania, Regular, 18:00, Entrevistadores: 1 y 2.
- EMA, Reino Unido, Chárter, 18:35, Entrevistador: 1.
- MAD, Comunidad de Madrid, Regular, 19:20, Entrevistador: 1.
- GLA, Reino Unido, Regular, 20:15, Entrevistador: 1.

4.4. Resultados de LPA (aeropuerto de Gran Canaria)

En esta cuarta sección veremos los resultados obtenidos para LPA. Del mismo modo que en la anterior sección, los resultados de LPA serán parecidos a los obtenidos en TFS, por eso, este aeropuerto se obviará. Los destinos de los vuelos con origen dichos aeropuertos son prácticamente los mismos. Pero, sí podemos detallar una principal diferencia, la cual es que en TFS hay 3 encuestadores, mientras que, en LPA hay 4.

Para que hubiera solución factible, se ha tomado Speed := 0.5 minutos, Ocupación := 0.8 y Entrevistas := 0.5. A pesar de esto, después de algo más de una hora, no se ha obtenido solución óptima, como veremos en la siguiente imagen.

Stats			
<b>Matrix:</b>		<b>Presolved:</b>	
Rows(constraints):	1059080	Rows(constraints):	291349
Columns(variables):	17255	Columns(variables):	17255
Nonzero elements:	2788832	Nonzero elements:	2192343
Global entities:	17255	Global entities:	17255
Sets:	0	Sets:	0
Set members:	0	Set members:	0
Overall status:		Performing global search...	
<b>LP relaxation:</b>		<b>Global search:</b>	
Algorithm:	Simplex primal	Current node:	5143
Simplex iterations:	0	Depth:	11
Objective:	59419.1	Active nodes:	38
Status:	Unfinished	Best bound:	50227.4
Time:	73.7s	Best solution:	21790
		Gap:	130.507%
		Status:	33 integer solution(s) found...
		Time:	4287.8s

Figura 4.2. Ejecución de LPA con XPRESS.

Resultados

- El número de pasajeros entrevistados es 21.790 pasajeros.
- El número de vuelos entrevistados es 311 de un total de 3.451.
- Entrevistas por día:
  1. Los vuelos entrevistados el día 10 son 46.
  2. Los vuelos entrevistados el día 11 son 44.
  3. Los vuelos entrevistados el día 12 son 46.
  4. Los vuelos entrevistados el día 13 son 46.
  5. Los vuelos entrevistados el día 14 son 42.
  6. Los vuelos entrevistados el día 15 son 44.
  7. Los vuelos entrevistados el día 16 son 43.

- Número de vuelos encuestados por día y entrevistador:
  - Entrevistador 1: Día 10 entrevista 14 vuelos, día 11 entrevista 11 vuelos, día 12 entrevista 15 vuelos, día 13 entrevista 15 vuelos, día 14 entrevista 12 vuelos, día 15 entrevista 16 vuelos. día 16 entrevista 12 vuelos.
  - Entrevistador 2: Día 10 entrevista 13 vuelos, día 11 entrevista 13 vuelos, día 12 entrevista 14 vuelos, día 13 entrevista 15 vuelos, día 14 entrevista 18 vuelos, día 15 entrevista 14 vuelos, día 16 entrevista 14 vuelos.
  - Entrevistador 3: Día 10 entrevista 16 vuelos, día 11 entrevista 18 vuelos, día 12 entrevista 13 vuelos, día 13 entrevista 17 vuelos, día 14 entrevista 11 vuelos, día 15 entrevista 12 vuelos. día 16 entrevista 13 vuelos.
  - Entrevistador 4: Día 10 entrevista 14 vuelos, día 11 entrevista 17 vuelos, día 12 entrevista 19 vuelos, día 13 entrevista 15 vuelos, día 14 entrevista 17 vuelos, día 15 entrevista 16 vuelos, día 16 entrevista 14 vuelos.

Como en secciones anteriores, mostraremos los resultados de un único día para el aeropuerto de Gran Canaria. Se ha escogido, de manera aleatoria, el día 14 de abril, que tiene 42 vuelos encuestados, entre los que se encuentran los vuelos regulares y chárteres. Como son bastantes vuelos (42), los separaremos en dos cuadros.

#### Vuelos encuestados día 14 de abril de 2017.

##### Día 14.

- FRA, Hungría, Regular, 05:45, Entrevistador: 3.
- BSL, Francia, Regular, 06:35, Entrevistador: 3.
- JKG, Suecia, Chárter, 07:30, Entrevistador: 3.
- MAD, Comunidad de Madrid, Regular, 09:00, Entrevistador: 3.
- RAK, Marruecos, Regular, 09:15, Entrevistador: 3.
- LUX, Luxemburgo, Regular, 09:50, Entrevistador: 3.
- FDH, Alemania, Regular, 10:30, Entrevistador: 3.
- FRA, Alemania, Regular, 11:20, Entrevistador: 3.
- HEL, Finlandia, Chárter, 11:40, Entrevistador: 1.
- KRS, Noruega, Chárter, 11:50, Entrevistador: 4.
- CGN, Alemania, Regular, 12:00, Entrevistador: 3.
- OSL, Suecia, Chárter, 12:10, Entrevistador: 4.
- MUC, Alemania, Regular, 12:20, Entrevistadores: 2 y 3.
- BIO, País Vasco, Regular, 12:40, Entrevistadores: 2 y 4.
- CPH, Dinamarca, Regular, 12:50, Entrevistador: 1.
- HAM, Alemania, Regular, 13:05, Entrevistador: 2 y 4.
- ARN, Suecia, Chárter, 13:05, Entrevistador: 3.
- EDI, Reino Unido, Chárter, 13:25, Entrevistadores: 2 y 4.

**Día 14.**

- LGG, Bélgica, Regular, 13:55, Entrevistador: 1.
- MAD, Comunidad de Madrid, Regular, 14:05, Entrevistador: 2.
- GLA, Reino Unido, Chárter, 14:20, Entrevistador: 4.
- ARN, Suecia, Regular, 14:40, Entrevistadores: 2 y 4.
- ARN, Suecia, Regular, 14:40, Entrevistador: 1.
- KRS, Noruega, Chárter, 15:00, Entrevistadores: 2 y 4.
- ZRH, Suiza, Chárter, 15:20, Entrevistador: 1.
- STR, Alemania, Regular, 15:25, Entrevistadores: 2 y 4.
- NDB, Mauritania, Chárter, 15:30, Entrevistador: 2.
- BIO, País Vasco, Regular, 15:55, Entrevistadores: 2 y 4.
- WMI, Polonia, Regular, 16:05, Entrevistador: 1.
- SCQ, Galicia, Regular, 16:20, Entrevistadores: 2 y 4.
- SCQ, Galicia, Regular, 16:40, Entrevistadores: 2 y 4.
- SVQ, Andalucía, Regular, 17:00, Entrevistador: 1.
- CMN, Marruecos, Regular, 17:10, Entrevistadores: 1 y 2.
- HAJ, Alemania, Regular, 17:25, Entrevistador: 4.
- MAD, Comunidad de Madrid, Regular, 17:35, Entrevistadores: 1 y 2.
- HAJ, Alemania, Regular, 18:00, Entrevistadores: 1 y 2.
- EMA, Reino Unido, Regular, 18:20, Entrevistador: 4.
- LGW, Reino Unido, Regular, 18:40, Entrevistadores: 2 y 4.
- BCN, Cataluña, Regular, 18:50, Entrevistador: 1.
- BCN, Cataluña, Regular, 19:20, Entrevistador: 4.
- AMS, Holanda, Regular, 19:20, Entrevistador: 2.
- DSA, Reino Unido, Chárter, 20:00, Entrevistador: 2.

**4.5. Propuestas futuras**

Como podemos observar, el problema no es siempre factible. Depende del valor que tome Speed, Ocupación y Entrevistas. Sin embargo, si el ISTAC quiere establecerlos como fijos, provocaría un gran problema, ya que la mayoría de veces daría problema no factible. Por ejemplo, si suponemos que se tarda, para todos los aeropuertos, 2 minutos en hacer cada encuesta, es decir,  $\text{Speed} := 2$ , el problema nos daría no factible. Lo mismo sucedería si el porcentaje de personas a encuestar supera el 60 %, esto es,  $\text{Entrevistas} > 0.6$ . Entonces, nuestro problema daría siempre no factible.

Una solución a esto que se propone para el futuro es reducir el número de comunidades autónomas o países que hay que representar. Por ejemplo, se puede

observar que para LPA sucede que es no factible al tomar  $\text{Speed} := 1$  minuto, debido a que, entre otras cosas, hay países (por ejemplo, Rusia y Marruecos) que tienen un único vuelo, los cuales coinciden en la hora de despegue, y, además, éstos deben ser encuestados para que se cumpla la matriz  $\text{NumMi}_j$ , donde  $j \in \text{País}$ . Así, para tener una solución a esto, propongo que se reduzca dicha matriz realizando lo siguiente: si hay países con pocos vuelos como Rusia, Finlandia, Suecia, Letonia, etc., podemos reunirlos en un conjunto que tenga como nombre países nórdicos, y se califique a este conjunto como un país. También se podría hacer lo mismo con algunos países de África, Centro Europa, Asia, o incluso, América. Esto provocaría una mayor probabilidad de soluciones factibles, y por lo tanto, de obtener una solución óptima.

La misma idea que presentamos en el párrafo anterior, se podría realizar para las comunidades autónomas. Según el número de vuelos que hubiera y el aeropuerto canario de origen, se podría distinguir entre: Comunidad de Madrid, Cataluña, Andalucía (o cualquier otra comunidad autónoma hacia donde se dirigieran bastantes vuelos) y resto de España.

También, se podría plantear para el futuro la siguiente cuestión. Supongamos que AENA no permite que hayan más de 2 entrevistadores a la vez en un aeropuerto, por lo que, habría que cambiar el modelo (poner alguna restricción más) debido a que, para algunos aeropuertos, como TFN, TFS y LPA, este modelo no serviría, ya que estos aeropuertos tienen 3, 3 y 4 encuestadores, respectivamente.

Como conclusión, expresar que se ha obtenido un modelo (y la implementación de éste) que se acerca bastante a la realidad del problema, pero que puede ser mejorado en un futuro, con las propuestas que detallé en los párrafos anteriores o con cualquier otra variante que modifique el modelo diseñado en este TFG.



---

## Bibliografía

- [1] SALAZAR GONZÁLEZ, JUAN JOSÉ.  
*Programación Matemática*. Madrid : Diaz de Santos, 2001.
- [2] ISTAC. ENCUESTA FRONTUR - CANARIAS.  
[http://www.gobiernodecanarias.org/istac/galerias/  
documentos/E16028B/metodologia\\_FRONTUR.pdf](http://www.gobiernodecanarias.org/istac/galerias/documentos/E16028B/metodologia_FRONTUR.pdf)
- [3] LENGUAJE DE MODELADO GNU MATHPROG.  
<https://fossies.org/linux/glpk/doc/gmpl-es.pdf>
- [4] XPRESS MOSEL MANUAL.  
[http://www.maths.ed.ac.uk/hall/Xpress/FICO\\_Docs/  
mosel/mosel\\_lang/dhtml/moselref.html](http://www.maths.ed.ac.uk/hall/Xpress/FICO_Docs/mosel/mosel_lang/dhtml/moselref.html)
- [5] ARCHIVOS GESLOT CANARIAS.  
*Geslot\_Canarias\_S17\_21\_03\_2017*  
*Geslot\_Canarias\_W16\_21\_03\_2017*
- [6] HOJA DE INCIDENCIAS MARZO 2017.  
*Hoja de incidencias ACE 2017\_03*  
*Hoja de incidencias FUE 2017\_03*  
*Hoja de incidencias LPA 2017\_03*  
*Hoja de incidencias TFN 2017\_03*  
*Hoja de incidencias TFS 2017\_03*





---

# Lista de Tablas

1.1.	Tamaños mínimos necesarios. ....	2
1.2.	Tenerife Norte Regulares. ....	4
1.3.	Tenerife Norte Chárteres. ....	4
1.4.	Tenerife Sur Regulares. ....	5
1.5.	Tenerife Sur Chárteres. ....	6



---

## Lista de Figuras

3.1. Datos de LPA (9 de marzo de 2017).	19
3.2. Datos de S-2016 de ACE.	19
3.3. Tabla datos mínimos FUE-Regular.	20
3.4. Asignación países FUE.	21
3.5. Tabla final ACE.	22
3.6. <i>configuracion_TFN.txt</i> .	23
4.1. Ejecución de ACE con XPRESS.	34
4.2. Ejecución de LPA con XPRESS.	36



# Optimization in the design of the tourism survey for ISTAC.



Universidad  
de La Laguna

Javier de León Morales

Facultad de Ciencias · Sección de Matemáticas  
Universidad de La Laguna  
alu0100834024@ull.edu.es

FACULTAD DE  
CIENCIAS

## Abstract

The ISTAC conducts various surveys of passengers on flights departing from Canary Islands airports. Among them is FRONTUR - Canarias. This work is based on the design of a mathematical model that maximizes the number of FRONTUR - Canarias surveys, which are as representative as possible, that is, they include surveys of all destinations to where the flights originate from a Canary Island airport. These surveys are also carried out by the INE, so, we must observe the surveys made by them not to survey the same flight.

This model is performed to obtain the optimal flight selection a survey by ISTAC. This has been implemented in a mathematical programming program called XPRESS MOSEL, and this is used to obtain computational results at each Canary Island airport.

**Keywords:** Representation - Mathematical model - ISTAC - INE.

## 1. Introduction

The TFG will be to optimize, in this case, to maximize the number of surveys that the ISTAC must make so that the FRONTUR survey is as representative as possible.

In order to maximize the number of flights we must take into account the following restrictions:

- Pollsters are hired for only one week, ie 7 continuous days a month.
- The week is pre-set.
- The hours of workers are continuous and 8 hours. There are no demands on the schedule.
- Number of workers fixed by airport.
- The FRONTUR survey is conducted on a large part of the passage.
- Airports are: SPC, TFS, TFN, LPA, FUE y ACE.
- The flights surveyed have as their origin a Canary Island airport.
- It differs between charter and regular flights.
- The time to perform each survey is called Speed.

**Objective:** It is to maximize the number of surveys that can be carried out by the interviewers so that there is the greatest representation of the trips knowing the number of departures of each one of them, the number of passengers, and

the schedule of the trips. We must also take into account the country and the autonomous community of destination of the flight.

## 2. Chapter 1 (mathematical model)

We will start by describing the ISTAC's work on the FRONTUR-Canarias survey. Finally, to describe the mathematical model.

### The mathematical model:

#### Values:

- NumInter; NumFlig, NumCoun  $\equiv$  Number of interviewers at each airport; Number of flights at each airport (departures); Number of countries to where the flights are directed with origin a Canary airport.
- J  $\equiv$  8 hours.
- Speed  $\equiv$  time in minutes it takes to complete the survey.
- Occupation  $\equiv$  percentage of occupancy on the number of seats.
- Interviews  $\equiv$  percentage of surveys carried out on the total of the passage.
- Inter = {1,..., NumInter}.
- Flight = {1,..., NumFlig}.
- Country = {1,..., NumCoun}.
- country<sub>i</sub>, hour<sub>i</sub>, num\_seating<sub>i</sub>, day<sub>i</sub>, surveys<sub>i</sub>  $\equiv$  country, hour, number of seatings, day, number of surveys of the flight i, i  $\in$  Flight.
- MinNum<sub>j</sub>  $\equiv$  minimum number of surveys for the country j, j  $\in$  Country.
- consumption<sub>i</sub>  $\equiv$  time to poll flight i (only an interviewer), i  $\in$  Flight.
- available<sub>i</sub>  $\equiv$  1, if flight i is *not* surveyed by the INE; 0, in other case.

#### Variables.

- i  $\in$  Flight and k  $\in$  Inter, x<sub>i,k</sub> :
  - 1, k works on i.
  - 0, in other case.
- i  $\in$  Flight, y<sub>i</sub> :
  - 1, Flight i is surveyed.
  - 0, in other case.

#### Objective function.

$$\max \sum_i \text{surveys}_i \cdot y_i$$

where i  $\in$  Flight.

#### Restrictions

1. subject to: y<sub>i</sub>  $\leq$  available<sub>i</sub>, where i  $\in$  Flight.
2. s.t.:  $\sum_k x_{i,k} \leq 2 \cdot y_i$ , where i  $\in$  Flight, k  $\in$  Inter.
3. s.t.:  $\sum_k x_{i,k} \geq y_i$ , where i  $\in$  Flight, k  $\in$  Inter.

4. For i, j  $\in$  Flight where i  $\neq$  j, day<sub>i</sub> = day<sub>j</sub> y hour<sub>i</sub>  $\geq$  hour<sub>j</sub>, there are four cases:

- (a) If hour<sub>j</sub> - hour<sub>i</sub> < consumption<sub>j</sub>/2, so:

$$\text{s.t.: } x_{i,k} + x_{j,k} \leq 1$$

where k  $\in$  Inter.

- (b) If hour<sub>j</sub> - hour<sub>i</sub> > J\*60 - consumption<sub>j</sub>/2, so:

$$\text{s.t.: } x_{i,k} + x_{j,k} \leq 1$$

where k  $\in$  Inter.

- (c) If hour<sub>j</sub> - hour<sub>i</sub> < consumption<sub>j</sub>, so:

$$\text{s.t.: } x_{i,k} + x_{j,k} \leq 1 + \sum_l x_{j,l}$$

where k, l  $\in$  Inter y l  $\neq$  k.

- (d) If hour<sub>j</sub> - hour<sub>i</sub> > J\*60 - consumption<sub>j</sub>, so:

$$\text{s.t.: } x_{i,k} + x_{j,k} \leq 1 + \sum_l x_{l,i}$$

where k, l  $\in$  Inter y l  $\neq$  k.

5. s.t.:  $\sum_j \text{surveys}_j \cdot y_j \geq \text{MinNum}_j$  where i  $\in$  Flight, j  $\in$  Country and j = country<sub>i</sub>.

6. s.t.: x<sub>i,k</sub>  $\in$  {0,1},  $\forall i \in$  Flight y  $\forall k \in$  Inter.

7. s.t.: y<sub>i</sub>  $\in$  {0,1},  $\forall i \in$  Flight.

## 3. Chapter 2

It briely describe the *Mathematical Programming*.

## 4. Chapter 3

Development of the TFG and implementation of the model in the XPRESS software.

## 5. Chapter 4

Computational results of the different Canarian airports.

## References

- [1] SALAZAR GONZÁLEZ, JUAN JOSÉ. *Programación Matemática*. Madrid : Diaz de Santos, 2001.
- [2] ISTAC. ENCUESTA FRONTUR - CANARIAS. [http://www.gobiernodecanarias.org/istac/galerias/documentos/E16028B/metodologia\\_FRONTUR.pdf](http://www.gobiernodecanarias.org/istac/galerias/documentos/E16028B/metodologia_FRONTUR.pdf)
- [3] XPRESS MOSEL MANUAL. [http://www.maths.ed.ac.uk/hall/Xpress/FICO\\_Docs/mosel/mosel\\_lang/dhtml/moselref.html](http://www.maths.ed.ac.uk/hall/Xpress/FICO_Docs/mosel/mosel_lang/dhtml/moselref.html)
- [4] ARCHIVOS GESLOT CANARIAS *Geslot\_Canarias\_S17\_21\_03\_2017*  
*Geslot\_Canarias\_W16\_21\_03\_2017*