Treball de Fi de Màster

Màster Universitari en Enginyeria Industrial

Diseño y desarrollo de un modelo matemático para la programación de los exámenes: aplicación a la ETSEIB

Autor: Joan Buñuel Farré

Directora: Amaia Lusa García

Convocatòria: Setembre 2016

ETSEIB

Escola Tècnica Superior

d'Enginyeria Industrial de Barcelona

UPC

Resumen

El proyecto presentado a continuación pretende dar solución a uno de los grandes problemas con los que se encuentran muchos estudiantes: el calendario de exámenes finales. Gracias a la solución aportada, se lograría una reducción en el estrés del alumnado y con ello una posible mejora en el rendimiento académico de éste.

Por otro lado, otro objetivo a conseguir es la simpleza en la utilización del programa elaborado para que la institución, en este caso la ETSEIB (*Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona*), pueda usarlo sin necesidad de conocimientos técnicos ni de un gran esfuerzo por parte del personal.

Para lograr dichos objetivos, se ha realizado un análisis de las necesidades de las diferentes partes, institución y alumnado, y con los datos facilitados por la escuela se ha diseñado e implementado un programa matemático, que se resuelve mediante el software IBM CPLEX.

Este proyecto podrá ser extrapolable a otras instituciones realizando pequeños ajustes en los datos iniciales y en el mismo programa matemático

Índice

1. Glosario

ETSEIB:	Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona
GETI:	Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials
GEQ:	Grau en Enginyeria Química
MUEI:	Màster Universitari en Enginyeria Industria
MUEO:	Màster Universitari en Enginyeria d'Organització
MUAR:	Màster Universitari en Automàtica i Robòtica
MAUTO:	Màster Universitari en Enginyeria d'Automoció
SCTM:	Màster Universitari en Cadena de Subministrament, Transport i Mobilitat
SIAE:	Servei d'Informació i Atenció als Estudiants
UPC:	Universitat Politècnica de Catalunya

2. Prefacio

2.1. Origen del proyecto

La oportunidad de llevar a cabo este proyecto surgió en una presentación ofrecida por la división de ingeniería de organización del Instituto de Organización y Control de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). En dicha presentación se dieron a conocer los diferentes proyectos en los que estaba trabajando el grupo y en los cuales el alumnado podría realizar alguna aportación si presentaba algún interés. En este caso, se escogió el proyecto presentado en este informe.

2.2. Motivación

A lo largo de la carrera universitaria, tanto en el *Grado en Tecnologías Industriales* (GETI) como en el *Máster Universitario en Enginyeria Industrial* (llamado también MUEI), siempre se había mostrado un gran interés por la organización industrial. Debido a que la naturaleza de este proyecto es de programación lineal y modelización matemática, temas tratados en más de una asignatura ya cursada, hizo que se despertara un gran interés por él.

Por otro lado, es bien conocido que una de las causas que generan más quejas y descontento entre el alumnado es la organización de los exámenes. Esto es debido, entre otras cosas, a que la menor falta de organización durante un período de tan alto estrés puede resultar en un gran malestar para el alumnado. Fue una gran sorpresa descubrir que, en una institución como es la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB) de la UPC, dicho proceso no había sido automatizado aún Por esta razón se quiso realizar como proyecto la programación automática de los horarios y la asignación de aulas para los exámenes finales para ambos cuatrimestres, el de primavera y el de otoño.

A pesar de no haber sido una de las motivaciones principales, se ha tenido también en cuenta cómo afecta la programación de los exámenes al centro y a su profesorado.

2.3. Información previa

Para poder realizar ese proyecto de forma satisfactoria, se tuvieron en cuenta, como ya se ha comentado anteriormente, a los alumnos y profesores de esta escuela.

Tras contactar con un miembro del *Servei d'Informació als Estudiants* (SIAE) o secretaría de la escuela, se pudo llegar a conocer los diferentes requerimientos que debería satisfacer el programa. A simple vista, antes de esa primera reunión, parecía que el programa solo debería satisfacer el no solapamiento de las asignaturas del mismo cuatrimestre, pero a lo largo del proyecto han ido surgiendo requisitos adicionales que han incrementado la complejidad del problema. Durante el encuentro se informó de otros requisitos básicos a satisfacer, los cuales se mencionan a lo largo del trabajo. Por otro lado, también se aclaró el proceso por el cual debía pasar la propuesta de programa para que al final pudiera llevarse a cabo.

Una vez realizado esto, ya se conocían las necesidades de la escuela. Llegado a este punto, se concertó una cita con la delegación de estudiantes. El objetivo de dicha reunión era conocer las exigencias o necesidades de los estudiantes frente al calendario de exámenes finales. De esa forma se lograron conocer otros requisitos que el modelo matemático debería afrontar.

Conociendo los requisitos a cumplir, el siguiente paso a realizar para poder empezar a diseñar y desarrollar el programa era conseguir los datos necesarios como, por ejemplo, el número de matriculados de cada asignatura y el nombre de las mismas. Todos estos datos fueron facilitados por una de las integrantes del equipo del SIAE, la señora Núria Bort. Tras la recolecta de todo lo necesario se procedió a formalizar el problema, diseñar el modelo matemático, implementarlo en un software de optimización y hacer las pruebas necesarias para su calibración y validación.

3. Introducción

En este apartado se presentan los diferentes objetivos del proyecto y el alcance del mismo.

3.1. Objetivos del proyecto

El objetivo principal del proyecto consiste en diseñar y desarrollar un procedimiento para la programación de los exámenes finales de la ETSEIB, que tenga en cuenta, en la medida de lo posible, los requerimientos que provienen tanto del alumnado como de la escuela y su profesorado.

El primer objetivo mencionado, la satisfacción del alumnado, es el objetivo principal del proyecto. El agrado del alumnado implica no solo el no solapamiento de los exámenes que pudiera tener un alumno, sino también lograr que cada alumno pueda tener tiempo de preparar bien los exámenes. Es por esta razón que la existencia de días libres entre exámenes era de extremada necesidad, evitando así la concentración de dichas pruebas en un breve periodo de tiempo. Para conseguir tal objetivo, es necesario realizar un sistema de valoración que nos mida dicho grado de satisfacción.

El segundo objetivo mencionado es evitar el solapamiento de exámenes de asignaturas grandes de un mismo departamento para así evitar problemas al encontrar profesores que vigilen dichos exámenes.

El tercer objetivo a cumplir por este proyecto es conseguir dejar a punto un programa que sea de fácil utilización y que pueda ser adaptado de una forma sencilla ante cambios en las asignaturas..

A continuación se mencionan los objetivos parciales que se han completado a lo largo de la realización del proyecto:

- Comprender los requisitos básicos por todas las partes, es decir, el alumnado, el profesorado y la institución para la formalización del problema.
- Diseñar un modelo matemático (en este caso, un programa lineal mixto) para la resolución del problema.
- Recolectar los datos necesarios (matriculados, asignaturas, etc.).
- Ordenar los datos en un fichero de formato adecuado (Excel) para su posterior uso en el programa matemático.
- Implementar el modelo matemático mediante el programa informático de IBM

ILOG CPLEX Optimization Studio (optimizador comercial).

- Realizar pruebas y análisis para la calibración de los parámetros del modelo así como para su validación.
- Determinar la programación de los exámenes de otoño y de primavera del curso 2016/2017.

Es un punto clave destacar la importancia que tiene el orden y la clasificación de los datos, ya que, al tratarse de un programa que posteriormente deberá ser utilizado por personas ajenas al proyecto, la visualización es esencial. Por esta razón gran parte del tiempo del proyecto ha sido usado para lograr esta lista de datos que se van a utilizar.

3.2. Alcance del proyecto

Este proyecto se centra en la generación de los horarios de exámenes finales de la ETSEIB. Se tienen en consideración los dos periodos de exámenes que se dan a lo largo de un año natural. Estos son el periodo de otoño, cuyos exámenes son en enero, y el periodo de primavera, cuyos exámenes son en junio. En este proyecto sin embargo, la distribución de los alumnos queda fuera del alcance, ya que esto lo realiza el personal responsable de la asignatura y, en todo caso, se considera trivial.

Se han tenido en consideración los grados en ingeniería industrial (GETI) y el grado en química (GEQ). A nivel de grados, no se ha tenido en cuenta el de materiales, ya que todas las asignaturas impartidas en él y el grado entero han sido trasladados a otra escuela. Por otro lado, parte del grado de química también ha sido trasladado, pero al tener aún alumnos que cursan asignaturas de éste, se ha considerado muy relevante tenerlo en cuenta de manera completa.

A parte de los grados, también se han tenido en cuenta diferentes másteres:

- *Màster Universitari en Enginyeria Industrial* (MUEI) con todas sus especializaciones
- *Màster Universitari en Automàtica i Robòtica* (MUAR)
- *Màster Universitari en Enginyeria d'Organització* (MUEO)
- *Màster Universitari en Enginyeria d'Automoció* (MAUTO)
- *Màster Universitari en Cadena de subministrament, transport i Mobilitat* (SCTM)

A pesar de que aún se imparten otros masters durante el curso actual y debido a que el próximo año serán trasladados a otras escuelas, las asignaturas de los masters no mencionados no se han tenido en cuenta a lo largo de este proyecto.

Por otro lado, debido a los cambios constantes que van sufriendo los dobles másteres y el número reducido de alumnos que llevan a cabo estos estudios, no se han tenido en cuenta dichas dobles titulaciones, es decir, se han tenido en cuenta todos los masters comentados anteriormente, pero no las personas que cursan los dos masters a la vez.

Debido a que el proyecto tiene como objetivo que se pueda utilizar directamente por y para la universidad, se han utilizado datos reales de cursos pasados para poder realizar todas las pruebas, como también datos reales de la infraestructura del edificio al tener en cuenta las aulas donde se podrían realizar los exámenes.

4. Descripción del problema

4.1. Consideraciones previas

Tras una reunión con el SIAE de la escuela, y otra con la delegación de estudiantes de la escuela, se llegó a comprender las exigencias que ponían todas las partes al calendario de exámenes, mostrando siempre cierta flexibilidad, algo importante para la futura programación.

Las exigencias y consideraciones que provienen del SIAE fueron las siguientes:

- El día de examen se publica antes de las matrículas, ya que los alumnos deben saber si dos exámenes de asignaturas diferentes se les solaparían.

- A pesar de que el grado de química de la escuela se traslada a otro centro, algunas asignaturas se seguirán impartiendo en la ETSEIB para aquellos que aún no hubieran finalizado y por esta razón se deberían considerar todas las asignaturas de dicho grado.

- Al programar no se deberían tener en cuenta los masters de química ni de materiales, ya que serán trasladados a partir del cuatrimestre que viene a otra escuela de forma íntegra. Tampoco se debería tener en cuenta el máster de logística, transporte y movilidad debido a que éste se habrá extinguido al aplicar este proyecto (ha sido sustituido por el máster STCM, mencionado anteriormente). El último máster que tampoco se tendrá en cuenta es el de seguridad y salud en el trabajo, ya que tampoco se impartirá el año que viene en la escuela.

- Se debería tener en cuenta que algunas asignaturas son compartidas por más de una titulación, y que no en todas las titulaciones tienen por qué estar situadas en el mismo cuatrimestre del plan de estudios.

- Tener en cuenta la rotación de exámenes, es decir, que de un año al siguiente los exámenes no se repitan en día y franja horaria. En este caso, se sugirió que los exámenes que en un año se realizaron al principio del periodo, el año siguiente se realizaran al final y viceversa. De esta manera se consigue que no sean siempre los mismos profesores los que tengan que corregir al final y con prisas. También se ven beneficiados los que tienen los exámenes al principio, ya que no siempre deberán preparar el examen con tan poco tiempo de antelación. En cuanto a dicha rotación, el SEIAE explicó la estrategia a seguir, la cual se explicará más adelante durante la programación.

- El periodo de exámenes dura 15 días laborales

- Tener en cuenta que las clases de todos los masters, a excepción del MUEI, se imparten por la tarde, así que sería muy adecuado darle preferencia a los exámenes de estas asignaturas en la franja horaria de la tarde.

- Las asignaturas del tercer cuatrimestre del MUEI deberían tener sus exámenes por la tarde como en el caso del resto de masters, ya que la mayoría de alumnos de este cuatrimestre realizan prácticas en empresa durante las mañanas.

- Al contrario que los masters, en el caso de los dos grados (GETI y GEQ) los exámenes tendrán preferencia por la mañana, ya que la mayoría de asignaturas se imparten en este mismo horario.

- Evitar el solapamiento de asignaturas que pertenecen a un mismo departamento y tengan un gran volumen de estudiantes (con lo cual requerirán un gran número de aulas y vigilantes) ya que, de otro modo, puede ser difícil encontrar personas suficientes para vigilar los exámenes.

Al reunirse con la delegación, se repitieron algunas consideraciones, ya que siempre tienen en consideración al profesorado, pero al tratarse del alumnado se expusieron los siguientes puntos a tener en cuenta:

- Entre los exámenes de asignaturas pertenecientes al mismo cuatrimestre y titulación debería haber un día libre, sin examen, para que los alumnos tengan tiempo y margen para prepararse para el siguiente examen.

- Al igual que en el caso anterior, se consideraría un punto muy favorable si para asignaturas de la misma titulación y de cuatrimestres consecutivos los exámenes no coincidieran el mismo día, no solo en franja horaria, y que además hubiera un día libre entre ellos.

- Para asignaturas complicadas de un mismo cuatrimestre, o con un temario difícil, ponerlas lo más separadas posible.

En esta segunda reunión también se volvió a mencionar el caso de los masters y su preferencia por el horario de tardes, lo cual hizo aumentar su importancia.

Otra consideración propia que se tuvo en cuenta al desarrollar el proyecto fue la siguiente:

- Considerar que las aulas se encuentran en zonas diferentes y que si una asignatura requiere de diferentes aulas es aconsejable que éstas pertenezcan a la misma zona. Esto es muy importante para los profesores, ya que si ocurriera algún problema o surgieran dudas sobre el examen, se pudieran comunicar con facilidad.

Por otro lado, se explicó también que existen sólo 3 horarios o franjas de exámenes, cada una de 4 horas. Estas franjas son las siguientes:

- Dos franjas para el horario de la mañana. La primera empezando a las 8:00 y la segunda a las 12:30.

- Una franja para el horario de la tarde, la cual empieza a las 17:00.

4.2. Formalización del problema

Tras recibir toda la información mencionada con anterioridad, se decidió formalizar el problema.

Primero se dedujo que la solución aportada sería el aula en dónde se realizaría cada examen y el cuándo (incluyendo día y franja horaria).

El segundo paso fue deducir las restricciones que debía cumplir el programa, las cuales son:

- No solapamiento de diferentes asignaturas en una misma aula, día y franja

- No superar la capacidad de alumnos que tiene cada aula

- No solapamiento de día de aquellas asignaturas que pertenezcan a una misma titulación y cuatrimestre

- Que los exámenes se realicen en días laborables, lógicamente

El último paso fue deducir los criterios que se iban a tener en cuenta al evaluar los resultados obtenidos por el programa. Éstos son los siguientes:

- Los alumnos tiene tiempo suficiente para estudiar para sus exámenes, considerando pues, el número de días libres de estudio que tienen los alumnos entre exámenes

- El número de aulas usadas para los exámenes, ya que cuantas menos se utilicen menos recursos se consumirán

- Tener suficientes profesores para que vigilen asignaturas de un mismo departamento

- Brindarle la oportunidad a alumnos que se han ido retrasando en la carrera de volver a ponerse al día, ofreciéndoles poder cursar asignaturas de cuatrimestres consecutivos sin que aparezcan conflictos de horarios

- Conseguir el mayor agrado de horario de exámenes para el alumnado, decidiendo pues, si asignar una franja horaria de tardes o de mañanas

Teniendo en cuenta estos criterios, se dio paso a formalizar los criterios de optimización de problema.

4.3. Criterios

Tras las reuniones comentadas anteriormente y tras saber que querían las diferentes partes se definieron los requisitos u objetivos que debería cumplir el programa. Estos se pueden clasificar en dos diferentes: logísticos y académicos. En las siguientes tablas se presentan primero los diferentes criterios académicos con sus descripciones (tabla 1) y posteriormente los logísticos (tabla 2):

Académicos	
PreferenciaMaster	Implica la preferencia de tener los exámenes de los masters en la franja horaria de las tardes. Del MUEI solo incluye el tercer cuatrimestre
PreferenciaGrado	Implica la preferencia de tener los exámenes de los grados en las franjas horaria de las mañanas
UnDíaLibre	Indica el número de veces que no se cumple el tener un día libre, como mínimo, entre exámenes del mismo cuatrimestre y de la misma titulación
DosDíasLibres	Parecido al caso anterior pero con dos días libres. Este criterio no indica el número exacto de veces que se incumple este hecho, pero cuanto menor sea este valor, menos veces se incumple
Cuatrimestres	Indica cuantas veces coinciden el mismo día exámenes de asignaturas de cuatrimestres consecutivos y de las mismas titulaciones

SeparaciónDifíciles	Indica los días libres que hay entre parejas de asignaturas difíciles pertenecientes a la misma titulación y al mismo cuatrimestre. En este caso solo se han considerado los dos grados, GETI y GEQ, ya que los masters no han presentado un gran número de suspensos

Tabla 1 Criterios académicos

Logísticos	
AulasOcupadas	Al igual que en el programa inicial, este criterio indica el número de aulas ocupadas a lo largo del periodo de exámenes
ZonasOcupadas	Indica el número de zonas ocupadas por los exámenes a lo largo de todo el periodo de exámenes
Departamentos	Indica cuantas veces coinciden el mismo día y franja exámenes de asignaturas con un gran volumen de matriculados y pertenecientes al mismo departamento

Tabla 2 Criterios logísticos

5. Modelo matemático

Se ha modelizado el problema mediante un programa lineal con variables enteras. A pesar de tratarse de un problema de optimización combinatoria, que da lugar a un modelo previsiblemente difícil de resolver, se ha descartado el uso de heurísticas debido al gran número de variables, restricciones y criterios de optimización que se han de tener en cuenta.

En este apartado se presenta un modelo inicial básico que contiene las restricciones esenciales y posteriormente un modelo avanzado con el resto de restricciones y criterios de optimización. El modelo básico se podría utilizar en centros con una menor complejidad, es decir, un número más reducido de titulaciones, que cada titulación sea totalmente independiente de las otras, etc.

En todo momento se han tenido en cuenta los datos presentados en el apartado anterior, que se resumen en la tabla siguiente (tabla 3) con su explicación. En esta tabla se presentan los datos que se fueran a utilizar en un primer modelo básico, el cual se presenta en el próximo apartado.

Dato	Descripción
N	Número de asignaturas (a programar)
F	Número de franjas horarias (en este caso 3)
T	Número de días que tiene el periodo de exámenes (incluyendo los fines de semana)
M	Número de aulas para realizar los exámenes
NQ	Número de cuatrimestres que tiene la asignatura que tiene más cuatrimestres
MATi	Número de matriculados en la asignatura i
Qi	Cuatrimestre en el que se imparte la asignatura i
Cj	Capacidad de alumnos para el examen que tiene el aula j

Tabla 3 Datos para el modelo básico

Teniendo estos datos ya en mente, las variables del problema a resolver deben ser definidas. Se escogieron variables binarias que indican si se realiza el examen o no bajo esas condiciones. En la tabla siguiente (tabla 4) se presentan los dos tipos de variables binarias utilizadas, junto con su descripción:

Variable	Descripción
X_{ijtf}	Variable binaria que vale 1 si y sólo si el examen de la asignatura i se lleva a cabo en el aula j el día t durante la franja horaria f
Y_{itf}	Variable binaria que vale 1 si y sólo si el examen de la asignatura i se lleva a cabo en el día t durante la franja horaria f

Tabla 4 Variables del modelo básico

5.1. Modelo básico inicial

Tras definir los datos que se van a utilizar y las variables a encontrar, es el momento de presentar el primer modelo matemático que se ha realizado; se trata de un programa lineal binario puesto que utiliza únicamente variables binarias (y todas las expresiones son lineales).

En este modelo simplificado se tenía como objetivo, o función objetivo, que el número de aulas utilizadas fuera el menor posible. Con esto se pretendía reducir también la cantidad de profesores requeridos durante la supervisión de los exámenes, así como un cierto ahorro energético (menor consumo de electricidad al utilizar menos aulas). A continuación se presenta dicha función objetivo inicial:

$$\min[z] = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}\sum_{t=1}^{T}\sum_{f=1}^{F} x_{ijtf} \qquad (1)$$

Vemos pues que con esta función objetivo se pretende minimizar el número de aulas ocupadas.

En un principio este primer modelo debía ser factible y cumplir con unas restricciones que se consideraron fundamentales para los alumnos, entre otras.

La primera de estas restricciones es asegurarse de que cada examen se realice (y, por supuesto, solamente una vez). Esta condición viene definida por la siguiente restricción matemática:

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{f=1}^{F} y_{itf} = 1 \qquad i = 1 \ldots N \qquad (2)$$

Tras esta primera restricción se definió el número mínimo de aulas necesarias para realizar el examen. Se tiene en cuenta que la capacidad asignada a cada examen no puede ser menor que el número de matriculados. Dicha restricción viene definida a continuación:

$$MAT_i \leq \sum_{j=1}^{M} x_{ijtf} * c_j \qquad \begin{matrix} i = 1 \dots N \\ t = 1 \dots T \\ f = 1 \dots F \end{matrix} \tag{3}$$

El primer término representa el número de matriculados en la asignatura i, y el segundo término representa la capacidad total de las aulas ocupadas por esa asignatura (lógicamente en el periodo t y en la franja f).

La siguiente restricción tiene como objetivo que no se solapen exámenes de asignaturas diferentes en una misma aula.

$$\sum_{i=1}^{N} x_{ijtf} \leq 1 \qquad \begin{matrix} j = 1 \dots M \\ t = 1 \dots T \\ f = 1 \dots F \end{matrix} \tag{4}$$

Otra restricción básica que debe cumplir este primer modelo es la de no solapamiento de asignaturas pertenecientes a un mismo cuatrimestre en un mismo día y en la misma franja horaria. Esta restricción, sin embargo, no evita que dos asignaturas del mismo cuatrimestre se realicen el mismo día, lo cual se implementará posteriormente. A través de la siguiente expresión matemática se logra tal resultado en el programa:

$$\sum_{f=1}^{F} \sum_{\forall i | q_i = q} y_{itf} \leq 1 \qquad \begin{matrix} q = 1 \dots NQ \\ t = 1 \dots T \end{matrix} \tag{5}$$

La última restricción a tener en cuenta en este modelo es la que nos relaciona las variables binarias que estamos utilizando. Si un examen no se realiza en un día y una franja, no se le deben asignar aulas; y, al contrario, si se realiza un día y en una franja, se le pueden llegar a asignar todas las aulas. A continuación se presenta la relación entre dichas dos variables (en este caso M se corresponde con el número total de aulas):

$$\sum_{j=1}^{M} x_{ijtf} \leq M * y_{itf} \qquad \begin{array}{l} t = 1 \dots T \\ f = 1 \dots F \end{array} \qquad (6)$$

Con este primer modelo, pues, se logra una programación en la cual las asignaturas no se solapan en el caso de pertenecer al mismo cuatrimestre, sin tener en cuenta aún la titulación a la que pertenecen. También se logra que en cada aula se realice como máximo un examen a la vez y que se asignen suficientes aulas a cada examen.

Tras comprobar el correcto funcionamiento de este primer modelo simple, se procedió a entrar en detalle en el caso tratado.

5.2. Modelo avanzado

En el caso concreto de la ETSEIB se presentan muchas particularidades y que es por todo esto que, aunque se podría presentar un modelo más genérico, se ha decidido plantearlo considerando las asignaturas y titulaciones concretas de la ETSEIB para que se puedan ver todos los casos especiales.

En este apartado, pues, ya se procede a explicar un modelo mucho más complejo que logrará los resultados deseados.

Es de vital importancia comentar que en este programa ya se tendrán en cuenta las diferentes titulaciones y el hecho de si estamos programando los exámenes para el periodo de primavera u otoño. También se tendrá en cuenta el día de la semana, es decir, los fines de semana sin exámenes, y, en el caso de primavera, los días festivos (como San Juan).

Antes de presentar el modelo matemático, es decir, la función objetivo y todas las restricciones, es importante introducir los nuevos datos a utilizar en el nuevo programa, como también las nuevas variables.

5.2.1. Datos y variables

Tras tener ya los diferentes criterios a tener en cuenta, se deben definir los datos que se van a utilizar en la programación, como también las variables que va a resolver. A pesar de que algunos datos o variables son los mismos que en el programa simplificado, se presentarán de nuevo.

Como ya se ha comentado anteriormente, se ha tenido en cuenta si se trata de la programación del periodo de exámenes de primavera o de otoño. Es por esta razón que, como se podrá ver más adelante, muchos datos aparecen específicos para cada periodo, ya que hay más asignaturas en un periodo que en otro. Además de esto, antes de lanzar el programa, se realiza un preproceso para adecuar los datos al periodo seleccionado. Este preproceso se presentará más adelante.

Es importante mencionar que dentro del máster MUEI y del máster SCTM las asignaturas están ordenadas y las especializaciones de cada cuatrimestre van seguidas. Lo mismo pasa con las asignaturas optativas de los dos grados.

También es importante destacar que las asignaturas optativas del cuatrimestre 4 de los grados se deben solapar, y las optativas del MUEI de los dos primeros cuatrimestres también.

En las tablas siguientes se presentan todos los datos a utilizar por el programa (tabla 5) y todas las variables a resolver por el mismo (tablas 6 y 7), con una breve explicación de cada uno/a.

Datos	
Tarprim	Dato binario que indica si se trata del periodo de exámenes de otoño (0) o de primavera (1)
F	Número de franjas horarias
Np	Número de asignaturas en primavera
Nt	Número de asignaturas en otoño
M	Número de aulas de exámenes
T	Días que tiene el periodo de exámenes
NQ	Número de cuatrimestres
NZ	Número de zonas diferentes que existen
$\mathbf{zona_j}$	Zona a la que pertenece el aula j
$\mathbf{c_j}$	Capacidad en número de alumnos que tiene el aula j
D	Número de departamentos

$MATp_i$/ $MATt_i$	Número de matriculados de la asignatura i en el periodo de primavera (p) / otoño (t)
Qp_i/ Qt_i	Número de cuatrimestre al que pertenece la asignatura i en el periodo de primavera (p)/ otoño (
$LABp_t$/$LABt_t$	Número binario que indica si ese día es laborable (1) o festivo o fin de semana (0). Se debe separar entre otoño (t) y primavera (p) debido a que existe el día de San Juan que es un día festivo
$TITp_i$/ $TITt_i$	Titulación (número) a la que pertenece la asignatura i en el periodo de primavera (p) / otoño (t).
$ESPp_i$/$ESPt_i$	Número de especialización a la que pertenece la asignatura i en el periodo de primavera (p)/ otoño (t). En este caso, si la asignatura no pertenece a ninguna especialización, o la titulación a la que pertenece no tiene especializaciones, el valor de este dato será 0
$OPTp_i$/ $OPTt_i$	Número binario que indica si la asignatura i en el periodo de primavera (p) / otoño (t) es una asignatura optativa (1) o no lo es (0). No se consideran asignaturas optativas aquellas que sean de especialización, como es en el caso del máster MUEI. De esta manera solo hay asignaturas optativas como tales en los dos grados GETI y GEQ.
$DEPp_i$/ $DEPt_i$	Número de departamento al que pertenece la asignatura i en el periodo de primavera (p) / otoño (t). Este número se le ha dado en este proyecto, es decir, no tiene por qué coincidir con el número que le concede la universidad
$GRANDEp_i$/ $GRANDEt_i$	Número binario que indica si la asignatura i en el periodo de primavera (p) / otoño (t) es una asignatura con un gran volumen de matriculados (1) o no (0). Se ha considerado que a partir de 100 matriculados la asignatura ya tiene un gran volumen
$DIFp_i$/ $DIFt_i$	Número binario que indica si la asignatura i en el periodo de primavera (p) / otoño (t) es una asignatura difícil (1) o no (0). Este dato solo afecta a los grados, como se ha mencionado anteriormente en la definición de los criterios
ZZ	Indicador de la posición i de la primera asignatura de especialización del primer cuatrimestre del máster MUEI
ZG1	Indicador de la posición i de la primera asignatura optativa del cuarto cuatrimestre de las asignaturas perteneciente al GETI y al GEQ

Tabla 5 Resumen de los datos usados en el programa avanzado

Variables principales	
X_{ijtf}	Variable binaria que vale 1 si y sólo si el examen de la asignatura i se lleva a cabo en el aula j el día t durante la franja horaria f
Y_{itf}	Variable binaria que vale 1 si y sólo si el examen de la asignatura i se lleva a cabo en el día t durante la franja horaria f
MU_{vtq}	Variable que vale 0 si se cumple para el día t la condición de que haya un día libre entre dos exámenes del mismo cuatrimestre q o no. Existen v restricciones distintas (más de una para alguna titulación).
$MU2_{vtq}$	Variable que vale 0 si se cumple para el día t la condición de que haya dos días libres entre dos exámenes del mismo cuatrimestre q o no. Existen v restricciones distintas (más de una para alguna titulación).
$MDEP_{dtf}$	Variable que indica cuantas veces coinciden asignaturas grandes del mismo departamento d en el mismo día t y en la misma franja horaria f
$S_{i,j}$	Variable binaria que vale 1 si el examen i se realiza antes que el examen j y 0 si el j se realiza antes que el i, donde (i,j) son parejas de asignaturas difílices
$SEP_{i,j}$	Días de separación entre el examen i y el examen j pertenecientes al mismo cuatrimestre y a la misma titulación, donde (i,j) son parejas de asignaturas difílices
$QUAD_{rtq}$	Variable que indica si en el día t coinciden asignaturas de la misma titulación r y de cuatrimestres consecutivos q y q+1
ZONAOCUPADAiz	Variable binaria que vale 1 si y solo si el examen i ocupa la zona z

Tabla 6 Variables principales del programa avanzado

Las variables definidas anteriormente son las principales y básicas del modelo. Sin embargo, para facilitar la comprensión de este, y para su posterior análisis, se han definido otras variables que son más sencillas de interpretar. En la siguiente tabla (tabla 9) se detallan dichas variables:

Variables secundarias	
$DIAACTUAL_i$	Día en el que se realiza el examen i
$NUMEROZONASOCUPADAS_i$	Variable que indica el número de zonas diferentes que ocupa el examen i

Tabla 7 Variables secundarias del programa avanzado

Además de todas estas variables se crearon otras para los diferentes criterios definidos anteriormente. Estas variables tienen el mismo nombre que en la tabla 4 del apartado anterior.

5.2.2. Preproceso y preparación de datos

Como se ha mencionado anteriormente, debido al funcionamiento del programa y a que el número de asignaturas que se imparten en primavera es diferente al de otoño, se debe realizar un preproceso para adaptar los datos al programa. Este paso previo es simplemente escoger los datos a utilizar, otoño o primavera. Esta parte del código determinará el valor de los datos siguientes, dependiendo del periodo tratado:

	tarprim = 0	**tarprim = 1**
N =	Nt	Np
MAT_i =	$MATt_i$	$MATp_i$
Q_i =	Qt_i	Qp_i
LAB_i =	$LABt_t$	$LABp_t$
TIT_i =	$TITt_i$	$TITp_i$
ESP_i =	$ESPt_i$	$ESPp_i$
OPT_i =	$OPTt_i$	$OPTp_i$
DEP_i =	$DEPt_i$	$DEPp_i$
$GRANDE_i$ =	$GRANDEt_i$	$GRANDEp_i$
DIF_i	$DIFt_i$	$DIFp_i$

Tabla 8 Resumen del preproceso

5.2.3. Función Objetivo

Teniendo ya todos los datos, las variables y los criterios definidos es el momento de describir la función objetivo a optimizar por el programa. Esta función objetivo es la siguiente:

$$\min[z] = w_1 * C_1 - w_2 * C_2 - w_3 * C_3 + w_4 * C_4 + w_5 * C_5 + w_6 * C_6 + w_7 * C_7 + w_8 * C_8 - w_9 * C_9 \quad (7)$$

Donde w_i son los diferentes pesos asociados a cada criterio i, y los criterios son:

- C_1: AulasOcupadas
- C_2: PreferenciasMaster
- C_3: PreferenciasGrado
- C_4: ZonasOcupadas
- C_5: UnDiaLibre
- C_6: DosDiasLibres
- C_7: Departamentos
- C_8: Cuatrimestres
- C_9: SeparacionDificiles

Los pesos mencionados antes se calibrarán en apartados posteriores.

5.2.4. Restricciones

En este apartado se presentarán todas las restricciones a las que se ha sometido el programa con la explicación de cada una de ellas.

Primero se debe comentar que casi todas las restricciones del modelo simplificado se han conservado. La única que no se ha tenido en cuenta (a parte de la función objetivo (1), substituida por la mencionada en el apartado anterior) es la referente a que las asignaturas pertenecientes a un mismo cuatrimestre no pueden solaparse (5). Esta restricción ha sido substituida por otras más específicas para el problema tratado.

Por otro lado se debe agregar una leyenda definiendo algunos datos como el número que representa a cada titulación, el número que representa a cada franja y el número perteneciente a cada especialización. Esta leyenda se presenta, además de en el Excel entregado con este informe, en las siguientes tablas:

Franja	Hora
1	8:00
2	12:30
3	17:00

Tabla 9 Leyenda franjas horarias

Número	Titulación
1	GETI+GEQ
2	GETI
3	GEQ
4	MUEI
5	MUEO
6	MUAR
7	MAUTO
8	MUAR+MAUTO
9	STCM

Tabla 10 Leyenda titulaciones

Titulación	Especialidad (nombre)	Especialidad (número)
MUEI	1	Mecànica
	2	Biomedicina
	3	Automàtica
	4	Electricitat
	5	Electrònica
	6	Organització
	7	Química
	8	Edificació
	9	Energia
SCTM	10	Supply Chain
	11	Transport i Mobilitat

Tabla 11 Leyenda especializaciones

La primera restricción que se añadió al programa era la que impone que los días que caen en fin de semana o en día festivo no puedan tener un examen. Como ya se ha comentado antes, se creó a través del programa Excel, un dato llamado LAB_t que indica si ese día es laborable, fin de semana o festivo. A través de esto se programó la siguiente restricción:

$$\sum_{f=1}^{F} \sum_{\forall t|LABt=0} \sum_{i=1}^{N} y_{itf} = 0 \qquad (8)$$

Esta restricción puede parecer superflua ya que se podrían excluir los fines de semana con lo cual no haría falta incluirla, pero incluir los días no laborables tiene ventajas en cuanto a la modelización del criterio de separación entre exámenes.

Para lograr conseguir el no solapamiento de asignaturas del mismo cuatrimestre, se tuvo que tener en cuenta además la titulación a la que cada asignatura pertenece, es decir, dos asignaturas de la misma titulación y del mismo cuatrimestre no se deben solapar. Por otro lado, existen titulaciones que comparten alguna asignatura, como, por ejemplo, el GETI con el GEQ. Teniendo en cuenta esto ya se podía poner las restricciones pertenecientes a los másteres MUAR, MAUTO y MUEO. Dichas restricciones se presentan a continuación:

- MUEO:

$$\sum_{f=1}^{F} \sum_{i \in A} y_{itf} \leq 1 \qquad t = 1 \dots T \tag{9}$$

Donde,

$$A : i = 1 \dots N \mid TITi = 5 \;\&\; Qi = q \qquad q = 1 \dots NQ \tag{10}$$

- SCTM:

$$\sum_{f=1}^{F} \sum_{i \in B} y_{itf} \leq 1 \qquad t = 1 \dots T \tag{11}$$

Donde,

$$B : i = 1 \dots N \mid TITi = 9 \;\&\; Qi = q \qquad q = 1 \dots NQ \tag{12}$$

- MUAR:

$$\sum_{f=1}^{F} \sum_{i \in C} y_{itf} \leq 1 \qquad t = 1 \dots T \tag{13}$$

Donde,

$$C : i = 1 \dots N \mid (TITi = 8 \text{ ó } TITi = 6) \,\&\, Qi = q \qquad q = 1 \dots NQ \tag{14}$$

- MAUTO:

$$\sum_{f=1}^{F} \sum_{i \in D} y_{itf} \leq 1 \qquad t = 1 \dots T \tag{15}$$

Donde,

$$D : i = 1 \dots N \mid (TITi = 7 \text{ ó } TITi = 6) \,\&\, Qi = q \qquad q = 1 \dots NQ \tag{16}$$

Vemos pues que cada conjunto A, B, C y D representa a uno de los masters mencionados anteriormente. El conjunto A representa todas aquellas asignaturas pertenecientes al MUEO y el conjunto B a todas aquellas pertenecientes al SCTM. Por otro lado, el conjunto C representa a todas las asignaturas que pertenecen al MUAR, incluyendo aquellas que son compartidas con el MAUTO. En el caso del conjunto D, se trata de las asignaturas que pertenecen al MAUTO, incluidas aquellas asignaturas compartidas con el MUAR.

Para estos cuatro masters, el solapamiento de asignaturas es más simple, pero, en el caso del MUEI y de los dos grados, GETI y GEQ, aparecen muchas limitaciones.

En el caso del MUEI, separado en 4 cuatrimestres, sabemos que las asignaturas optativas del primer cuatrimestre se realizan el mismo día, ya que solo hay una por cada especialización. Esto ocurre también con las asignaturas optativas del segundo cuatrimestre. Como las del primer cuatrimestre solo se pueden realizar en otoño y las del segundo cuatrimestre solo se pueden realizar en primavera, con una misma restricción podemos decir que todas las optativas se realicen el mismo día. De esta manera, llegamos a la siguiente restricción:

$$y_{itf} + y_{jtf} \leq 1 \qquad \begin{array}{l} t = 1 \dots T \\ f = 1 \dots F \\ i \in E \\ j \in E' \end{array} \tag{17}$$

Donde,

$$E : i = 1 \ldots N \mid TITi = 4 \;\; \& \, Qi < 3 \, \& \, ESPi > 0 \tag{18}$$

$$E' : j = 1 \ldots N \mid TITj = 4 \;\; \& \, Qj < 3 \, \& \, ESPj > 0 \tag{19}$$

Los conjuntos E y E' representan aquellas asignaturas optativas tanto del primer como del segundo cuatrimestre.

Tras esto, otra restricción que se tuvo en cuenta es que las asignaturas optativas mencionadas anteriormente no pueden coincidir con las asignaturas troncales de los dos primeros cuatrimestres pertenecientes al MUEI. De esta manera y teniendo en cuenta que, como ya se ha mencionado antes, el dato ZZ indica la posición de la primera asignatura optativa de una especialización, se llega a las siguientes dos restricciones:

$$\sum_{f=1}^{F} \sum_{i \in F} y_{itf} + \sum_{f=1}^{F} y_{zztf} \leq 1 \qquad t = 1 \ldots T \tag{20}$$

$$\sum_{f=1}^{F} \sum_{i \in G} y_{itf} + \sum_{f=1}^{F} y_{zztf} \leq 1 \qquad t = 1 \ldots T \tag{21}$$

Donde,

$$F : i = 1 \ldots N \mid TITj = 4 \;\; \& \, Qi = 1 \, \& \, ESPi = 0 \tag{22}$$

$$G : i = 1 \ldots N \mid TITi = 4 \;\; \& \, Qi = 2 \, \& \, ESPi = 0 \tag{23}$$

Aquí el conjunto F representa todas las asignaturas troncales del primer cuatrimestre del MUEI y el conjunto G las asignaturas troncales del segundo cuatrimestre de la misma titulación.

Para finalizar la programación de esta titulación, queda modelizar las restricciones correspondientes al tercer cuatrimestre. Con esto se pretende lograr que las asignaturas optativas y las troncales no se solapen, para cada una de las especializaciones. Teniendo en cuenta esto, se logra la siguiente restricción:

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{i\in H} y_{itf} + \sum_{f=1}^{F}\sum_{i\in K} y_{itf} \leq 1 \qquad t = 1 \ldots T \qquad (24)$$

Donde,

$$H : i = 1 \ldots N \mid TITj = 4 \ \& \ Qi = 3 \ \& \ ESPi = 0 \qquad (25)$$

$$K : i = 1 \ldots N \mid TITj = 4 \ \& \ Qi = 3 \ \& \ ESPi = specspec = 1 \ldots 9 \qquad (26)$$

El conjunto E representa a todas las asignaturas troncales del tercer cuatrimestre de MUEI y el conjunto K representa las optativas del mismo.

Tras tener todas las restricciones de los masters, ahora es el momento de definir las de los dos grados, lo cual se realizará de manera conjunta, ya que están relacionados entre ellos. Primero de todo se deben tratar los casos especiales de los dos grados y luego el resto de casos.

El primer caso especial a tratar son las asignaturas optativas que se dan en el cuarto cuatrimestre de ambas titulaciones. Como los alumnos solamente pueden cursar una de estas, los exámenes de todas estas asignaturas se realizarán el mismo día. Teniendo estas premisas en cuenta, se llega a las siguientes restricciones:

$$\sum_{f=1}^{F} f * y_{itf} = \sum_{f=1}^{F} f * y_{jtf} \qquad \begin{matrix} i \in L \\ t = 1 \ldots T \end{matrix} \qquad (27)$$

$$\sum_{t=1}^{T} t * y_{itf} = \sum_{t=1}^{T} t * y_{jtf} \qquad \begin{matrix} j \in L' \\ f = 1 \ldots F \end{matrix} \qquad (28)$$

Donde,

$$L : i = 1 \ldots (N-1) \mid TITi = 1 \ \& \ OPTi = 1 \ \& \ Qi = 4 \qquad (29)$$

$$L': j = (i+1) \dots N \mid TITj = 1 \ \& OPTj = 1 \ \& Qj = 4 \tag{30}$$

Por otro lado, dicho día no puede coincidir con los exámenes de las asignaturas troncales de dicho cuatrimestre. Sabiendo que ZG1 representa la primera asignatura optativa del cuatrimestre 4, ya mencionado anteriormente, se añaden las siguientes restricciones:

$$\sum_{f=1}^{F} \sum_{i \in O} y_{itf} + \sum_{f=1}^{F} y_{ZG1tf} \leq 1 \qquad t = 1 \dots T \tag{31}$$

$$\sum_{f=1}^{F} \sum_{i \in P} y_{itf} + \sum_{f=1}^{F} y_{ZG1tf} \leq 1 \qquad t = 1 \dots T \tag{32}$$

Donde,

$$O: i = 1 \dots N \mid (TITi = 1 \text{ ó } TITi = 2) \ \& Qi = 4 \ \& OPTi = 0 \tag{33}$$

$$P: i = 1 \dots N \mid (TITi = 1 \text{ ó } TITi = 3) \ \& Qi = 4 \ \& OPTi = 0 \tag{34}$$

El conjunto O representa las asignaturas troncales del cuatrimestre 4 del GETI mientras que el conjunto P representa las mismas pero del GEQ.

En el caso del cuatrimestre 8 de estas dos titulaciones, las asignaturas optativas se comparten. Al tratarse de asignaturas optativas, al haber muchas y como los alumnos toman pocas a la vez, se ha considerado que muchos exámenes de estas podrían ser el mismo día. Se ha considerado el valor 12 como un valor aceptable. Con esto obtenemos la siguiente restricción:

$$\sum_{f=1}^{F} \sum_{i \in Q} y_{itf} \leq 12 \qquad t = 1 \dots T \tag{35}$$

Donde,

$$Q: i = 1 \dots N \mid TITi = 1 \,\&\, Qi = 8 \tag{36}$$

También se debe imponer que el resto de asignaturas, que pertenecen al mismo cuatrimestre y titulación, no se solapen ni en día ni en franja:

$$\sum_{f=}^{F} \sum_{i \in S} y_{itf} \leq 1 \qquad t = 1 \dots T \tag{38}$$

$$\sum_{f=}^{F} \sum_{i \in U} y_{itf} \leq 1 \qquad t = 1 \dots T \tag{37}$$

Donde:

$$S: i = 1 \dots N \mid (TITi = 1 \text{ ó } TITi = 2) \,\&\, Qi = q \qquad q = 1 \dots NQ \mid q \neq 4 \,\&\, q \neq 8 \tag{39}$$

$$U: i = 1 \dots N \mid (TITi = 1 \text{ ó } TITi = 3) \,\&\, Qi = q \qquad q = 1 \dots NQ \mid q \neq 4 \,\&\, q \neq 8 \tag{40}$$

Por último, se ha de tratar el caso excepcional de la asignatura de termodinámica. Esta se realiza en el cuarto cuatrimestre del GEQ y en el quinto del GETI. Sin embargo, se trata de una misma asignatura, es decir, solo tiene un código, y es por esta razón que se debe programar como un caso aparte. Tales restricciones son para toda t=1…T.

$$\sum_{f=1}^{F} y_{1tf} + \sum_{i=2 \mid Qi=5 \,\&\, (TITi=1 \text{ ó } TITi=2)}^{N} y_{itf} \leq 1 \tag{41}$$

$$\sum_{f=1}^{F} y_{1tf} + \sum_{i=2 \mid Qi=4 \,\&\, (TITi=1 \text{ ó } TITi=3)}^{N} y_{itf} \leq 1 \tag{42}$$

Estas son pues todas las restricciones que tendrá que tener en cuenta el programa a la hora de optimizar.

5.2.5. Programación criterios

Tras tener ya todas las restricciones definidas, se realizó la modelización de los diferentes criterios mencionados con anterioridad.

El primero de estos criterios es el del número de aulas ocupadas. Este criterio es el mismo que el de la función objetivo del modelo simplificado (1), es decir, no se ha cambiado nada en este criterio al implementar el modelo avanzado.

Los dos siguientes criterios son los de los horarios preferenciales de los masters y de los dos grados. Ambos criterios tienen una estructura similar, y es por esta misma razón que se presentan juntos. Nos creamos pues las dos variables asociadas a dichos criterios llamadas PreferenciasMaster y PreferenciasGrado, ambas definidas como:

$$\sum_{t=1}^{T} \sum_{i \in (MASTER\text{ ó }H\text{ ó }K)} y_{it3} = PreferenciasMaster \tag{43}$$

$$\sum_{t=1}^{T} \sum_{f=1}^{2} \sum_{i \in GRADO} y_{itf} = PreferenciasGrado \tag{44}$$

Donde,

$$MASTER: i = 1 \dots N \mid TITi = 5 \text{ ó } TITi = 6 \text{ ó } TITi = 7 \text{ ó } TITi = 8 \text{ ó } TITi = 9 \tag{45}$$

$$MASTER: i = 1 \dots N \mid TITi = 1 \text{ ó } TITi = 2 \text{ ó } TITi = 3 \tag{46}$$

El siguiente criterio a tener en cuenta es el número de zonas que están siendo ocupadas por todos los exámenes. Las restricciones siguientes relacionan las variables x_{ijtf} con zonaocupada$_i$. El valor 35 corresponde al número de aulas.

$$\sum_{f=1}^{F} \sum_{t=1}^{T} \sum_{j=1 \mid zona_j = z}^{M} x_{ijtf} \geq ZONAOCUPADA_{iz} \qquad i = 1 \dots N \quad z = 1 \dots NZ \tag{47}$$

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1\,|\,zona_j=z}^{M} x_{ijtf} \leq 35 * ZONAOCUPADA_{iz} \qquad \begin{matrix} i = 1 \dots N \\ z = 1 \dots NZ \end{matrix} \tag{48}$$

$$NUMEROZONASOCUPADAS_i = \sum_{z=1}^{NZ} ZONAOCUPADA_{iz} \qquad i = 1 \dots N \tag{49}$$

$$ZonasOcupadas = \sum_{i=1}^{N} NUMEROZONASOCUPADAS_i \tag{50}$$

Los dos siguientes criterios, UnDiaLibre y DosDiasLibres, se presentan también conjuntamente, ya que el primero tiene en cuenta el día actual y el siguiente, y el segundo los dos días siguientes, es decir, al programar la diferencia entre las restricciones presentadas para ambos son casi idénticas.

Las restricciones son las mismas que las de apartado anterior dónde se intentaba evitar el solapamiento de asignaturas, pero en este caso se tiene en cuenta el mismo día y el siguiente (o los dos siguientes) poniendo una penalización en caso de incumplirse la restricción.

Las de UnDiaLibre son para t=1…(t-1) y son las siguientes:

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{i\in O}(y_{itf} + y_{i(t+1)f}) + \sum_{f=1}^{F}(y_{ZG1tf} + y_{ZG1(t+1)f}) \leq 1 + mu_{1t4} \tag{51}$$

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{i\in P}(y_{itf} + y_{i(t+1)f}) + \sum_{f=1}^{F}(y_{ZG1tf} + y_{ZG1(t+1)f}) \leq 1 + mu_{2t4} \tag{52}$$

$$\sum_{f=}^{F}\sum_{i\in S}(y_{itf} + y_{i(t+1)f}) \leq 1 + mu_{3t4} \tag{53}$$

$$\sum_{f=}^{F}\sum_{i\in U}(y_{itf} + y_{i(t+1)f}) \leq 1 + mu_{4t4} \tag{54}$$

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{i\in H}(y_{itf}+y_{i(t+1)f})+\sum_{f=1}^{F}\sum_{i\in K}(y_{itf}+y_{i(t+1)f})\leq 1+mu_{5t3} \tag{55}$$

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{i\in F}(y_{itf}+y_{i(t+1)f})+\sum_{f=1}^{F}(y_{ztf}+y_{z(t+1)f})\leq 1+mu_{6t1} \tag{56}$$

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{i\in G}(y_{itf}+y_{i(t+1)f})+\sum_{f=1}^{F}(y_{ztf}+y_{z(t+1)f})\leq 1+mu_{7t1} \tag{57}$$

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{i\in A}(y_{itf}+y_{i(t+1)f})\leq 1+mu_{8tq} \tag{58}$$

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{i\in B}(y_{itf}+y_{i(t+1)f})\leq 1+mu_{9tq} \tag{59}$$

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{i\in C}(y_{itf}+y_{i(t+1)f})\leq 1+mu_{10tq} \tag{60}$$

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{i\in D}(y_{itf}+y_{i(t+1)f})\leq 1+mu_{11tq} \tag{61}$$

Por otro lado, las restricciones de DosDiasLibre son para t=1…(T-2), y son las siguientes:

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{i\in O}(y_{itf}+y_{i(t+1)f})+\sum_{f=1}^{F}(y_{ZG1tf}+y_{ZG1(t+1)f})\leq 1+mu_{1t4} \tag{62}$$

$$\textstyle\sum_{f=1}^{F}\sum_{i\in P}(y_{itf}+y_{i(t+1)f})+\sum_{f=1}^{F}(y_{ZG1tf}+y_{ZG1(t+1)f})\leq 1+mu_{2t4} \tag{63}$$

$$\sum_{f=}^{F}\sum_{i\in S}(y_{itf}+y_{i(t+1)f}) \leq 1 + mu_{3t4} \tag{64}$$

$$\sum_{f=}^{F}\sum_{i\in U}(y_{itf}+y_{i(t+1)f}) \leq 1 + mu_{4t4} \tag{65}$$

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{i\in H}(y_{itf}+y_{i(t+1)f}) + \sum_{f=1}^{F}\sum_{i\in K}(y_{itf}+y_{i(t+1)f}) \leq 1 + mu_{5t3} \tag{66}$$

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{i\in F}(y_{itf}+y_{i(t+1)f}) + \sum_{f=1}^{F}(y_{ztf}+y_{z(t+1)f}) \leq 1 + mu_{6t1} \tag{67}$$

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{i\in G}(y_{itf}+y_{i(t+1)f}) + \sum_{f=1}^{F}(y_{ztf}+y_{z(t+1)f}) \leq 1 + mu_{7t1} \tag{68}$$

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{i\in A}(y_{itf}+y_{i(t+1)f}) \leq 1 + mu_{8tq} \tag{69}$$

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{i\in B}(y_{itf}+y_{i(t+1)f}) \leq 1 + mu_{9tq} \tag{70}$$

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{i\in C}(y_{itf}+y_{i(t+1)f}) \leq 1 + mu_{10tq} \tag{71}$$

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{i\in D}(y_{itf}+y_{i(t+1)f}) \leq 1 + mu_{11tq} \tag{72}$$

Con estas restricciones se logra pues obtener los criterios deseados de la función objetivo:

$$UnDiaLibre = \sum_{v=1}^{11}\sum_{t=1}^{T-1}\sum_{q=1}^{NQ} mu_{vtq} \tag{73}$$

$$DosDiasLibres = \sum_{v=1}^{11}\sum_{t=1}^{T-2}\sum_{q=1}^{NQ} mu2_{vtq} \tag{74}$$

Para determinar el criterio denominado Departamentos, se programan la siguiente restricción:

$$\sum_{i=1|GRANDEi=1\,\&\,DEPi=d}^{N} y_{itf} \leq 1 + MDEP_{dtf} \qquad \begin{matrix} t = 1 \dots T \\ f = 1 \dots F \\ d = 1 \dots D \end{matrix} \tag{75}$$

De esta manera, se obtiene el siguiente criterio:

$$Departamentos = \sum_{d=1}^{D}\sum_{t=1}^{T}\sum_{f=1}^{F} MDEP_{dtf} \tag{76}$$

El siguiente criterio es el no solapamiento de asignaturas troncales de una misma titulación de cuatrimestres consecutivos. Dichas restricciones son para todo t=1...T y para todo q=1...(NQ-1). De esta manera, se obtienen las siguientes restricciones:

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{i=1|Qi=q\,\&\,(TITi=1\,ó\,TITi=2)}^{N} y_{itf} + \sum_{f=1}^{F}\sum_{i=1|Qi=(q+1)\,\&\,(TITi=1\,ó\,TITi=2)}^{N} y_{itf} \leq 1 + QUAD_{1tq} \tag{77}$$

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{i=1|Qi=q\,\&\,(TITi=1\,ó\,TITi=3)}^{N} y_{itf} + \sum_{f=1}^{F}\sum_{i=1|Qi=(q+1)\,\&\,(TITi=1\,ó\,TITi=3)}^{N} y_{itf} \leq 1 + QUAD_{2tq} \tag{78}$$

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{i=1|Qi=q\,\&\,TITi=4\,\&\,ESPi=0}^{N} y_{itf} + \sum_{f=1}^{F}\sum_{i=1|Qi=(q+1)\,\&\,TITi=4\,\&\,ESPi=0}^{N} y_{itf} \leq 1 + QUAD_{3tq} \tag{79}$$

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{i=1|Qi=q\,\&\,TITi=4\,\&\,ESPi=0}^{N} y_{itf} + \sum_{f=1}^{F}\sum_{i=1|Qi=(q+1)\,\&\,TITi=4\,\&\,ESPi=0}^{N} y_{itf} \leq 1 + QUAD_{3tq} \tag{80}$$

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{i=1|Qi=q\,\&\,TITi=5}^{N} y_{itf} + \sum_{f=1}^{F}\sum_{i=1|Qi=(q+1)\,\&\,TITi=5}^{N} y_{itf} \leq 1 + QUAD_{4tq} \tag{81}$$

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{i=1|Qi=q\,\&\,TITi=6}^{N} y_{itf} + \sum_{f=1}^{F}\sum_{i=1|Qi=(q+1)\,\&\,TITi=6}^{N} y_{itf} \leq 1 + QUAD_{5tq} \tag{82}$$

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{i=1|Qi=q\,\&\,TITi=7}^{N} y_{itf} + \sum_{f=1}^{F}\sum_{i=1|Qi=(q+1)\,\&\,TITi=7}^{N} y_{itf} \leq 1 + QUAD_{6tq} \tag{83}$$

Con todo esto, se obtiene el criterio deseado:

$$Cuatrimestres = \sum_{r=1}^{6}\sum_{t=1}^{T}\sum_{q=1}^{NQ} QUAD_{rtq} \tag{84}$$

Por último queda el criterio sobre las asignaturas difíciles. Como por cada cuatrimestre hay un máximo de 3 asignaturas difíciles y en los masters no se considera que haya ninguna asignatura difícil, existe un número reducido de asignaturas difíciles. Es por esta misma razón que se decidió crear dos listas (una para GETI y otra para GEQ) en forma de tuplas y evitar crear un número excesivo de variables. En estas listas aparecen las parejas de asignaturas difíciles que pertenecen al mismo cuatrimestre de la misma titulación. Dichas tuplas son llamadas *dificils1* (GETI) y *dificils2* (GEQ). Teniendo ya estas dos listas de parejas i y j, se imponen las siguientes restricciones:

$$DIAADCTUALi - DIAACTUALj \leq 21 * s1_{<i,j>} \tag{85}$$

$$DIAADCTUALj - DIAACTUALi \leq 21 * s1_{<i,j>} \tag{86}$$

$$SEP1_{<i,j>} \leq DIAACTUALi - DIAACTUALj + 42 * (1 - s1_{<i,j>}) \tag{87}$$

$$SEP1_{<i,j>} \leq DIAACTUALj - DIAACTUALi + 42 * (1 - s1_{<i,j>}) \quad (88)$$

$$DIAADCTUALi - DIAACTUALj \leq 21 * s2_{<i,j>} \quad (89)$$

$$DIAADCTUALj - DIAACTUALi \leq 21 * s2_{<i,j>} \quad (90)$$

$$SEP2_{<i,j>} \leq DIAACTUALi - DIAACTUALj + 42 * (1 - s2_{<i,j>}) \quad (91)$$

$$SEP2_{<i,j>} \leq DIAACTUALj - DIAACTUALi + 42 * (1 - s2_{<i,j>}) \quad (92)$$

Donde,

$$DIAACTUALi = \sum_{t=1}^{T} \sum_{f=1}^{F} y_{itf} * t \quad (93)$$

Teniendo ya estas restricciones, ya se puede añadir el criterio:

$$SeparacionDificiles = \sum_{<i,j> \in dificils1} SEP1_{<i,j>} + \sum_{<i,j> \in dificils1} SEP2_{<i,j>} \quad (94)$$

6. Calibración y validación del modelo

Antes de empezar con la calibración y validación del modelo, es adecuado presentar como se han conseguido todos los datos referentes a la ETSEIB y como han sido adaptados al programa.

6.1. Recolecta y acondicionamiento de datos

Los objetivos a conseguir requerían, como ya se ha mencionado con anterioridad, de los datos provistos por parte del SIAE de la escuela. Tras diversas reuniones se pudieron sacar de la base de datos de la que disponen (PRISMA) los datos necesarios. Con los datos obtenidos se hizo un tratamiento (ordenar, clasificar según titulación, especificar si compartían titulación, etc.) para poder ser utilizados en la implementación del programa.

Los datos de las asignaturas que se extrajeron son los siguientes:

- Nombre de la asignatura.
- Código de la asignatura.
- Créditos ECTS.
- Si se trata de una asignatura optativa u obligatoria.
- Número de matriculados en esa asignatura de los últimos años.
- Titulación a la que pertenece esa asignatura.
- Número de cuatrimestre (de su respectiva titulación) en el cual se imparte la asignatura.
- En el caso del MUEI y del SCTM, especialización a la que pertenece esa asignatura.
- Si esa asignatura se imparte en el cuatrimestre de otoño, de primavera o en ambos.
- Nombre del departamento al cual pertenece esa asignatura.
- Código del departamento al que pertenece esa asignatura.
- Historial del ratio de suspensos de esa asignatura.

Por otro lado, también se requerían los datos de las diferentes aulas de las que se dispone para realizar exámenes. Los datos que se obtuvieron de éstas, y que eran relevantes para el desarrollo del proyecto son las siguientes:

- Nombre del aula.
- Capacidad de alumnos para la realización de los exámenes.
- Ubicación en la que se encuentra el aula, lo cual incluye tanto el edificio, la planta y el número del aula, para así asignarle una zona.

Tras obtener todos los datos mencionados anteriormente, se tuvieron que acomodar a un formato adecuado para que el programa pudiera leerlos de manera rápida y eficaz. Por esta razón se escogió el programa EXCEL (que también tiene la ventaja de ser conocido por el personal del SIAE), para representar los datos y los resultados que se fueran a obtener.

En las tablas siguientes (tablas 12 y 13) se puede apreciar el formato en que se leen los datos. Se presentan solo una de las asignaturas y una de las aulas como ejemplo. A su vez, en el anexo del proyecto se proporciona el Excel con el cual se ha llevado a cabo la programación, para su mejor entendimiento.

Número	Código	Nombre	ECTS	OPT/OBL	Matriculados	Titulación	Cuatri.	Espec.	Prim./Ot.	Depart.	Grande /Peq.	Dificil
2	240012	Càlcul I	6	OBL	562	GETI/GEQ	1	-	P/O	725	Grande	Si

Tabla 12 Información de las asignaturas

Aula (Número)	Nombre	Capacidad Exámenes	Planta	Zona
1	0.1	40	0	1

Tabla 13 Información de las aulas

Para decidir si se trata de una asignatura difícil o no se realizó un análisis del porcentaje de suspensos en el examen final. Tras este análisis se preguntó a diversos alumnos acerca de su opinión sobre la dificultad de las asignaturas, y, a pesar de alguna diferencia en alguna asignatura, los resultados obtenidos por ambos métodos coincidían.

Por otro lado, se ha considerado como asignatura grande aquella que tenga más de 100 matriculados, ya que ocupa seguro más de dos aulas y necesita mucha atención por parte del profesorado en cuanto a dudas y vigilancia se refiere.

6.2. Calibración del modelo

Tras formular el modelo matemático con todos los criterios definidos el siguiente paso a tomar es la elección de unos pesos adecuados para cada criterio y con ello lograr calibrar el modelo para obtener una solución satisfactoria. Se tiene un modelo de optimización lineal mixto multicriterio. Para resolverlo se hace uso del programa de *IBM CPLEX Optimization Studio*. Los ordenadores utilizados para la optimización son los ofrecidos por el laboratorio de logística del Instituto de Organización y Control de la UPC, los cuales son dos ordenadores Intel con un procesador i5 y un ordenador Intel con un procesador i7.

Al tener dos juegos de datos diferentes, uno para otoño y otro para primavera, se consideró realizar un análisis independiente para cada uno de ellos.

6.2.1. Calibración Otoño

Este primer juego de datos y su correspondiente modelo consta de 458.092 variables, de las cuales 452.082 son binarias. Se puede ver pues no solo la gran complejidad del problema, sino también el gran tamaño que tiene. En el de otoño, el juego de datos consta de 204 asignaturas diferentes.

Además de esto y debido a la complejidad y el tamaño del problema el programa de IBM solo puede encontrar una solución con un gap del 5% por lo cual no se puede garantizar que la solución sea óptima. El valor del gap indica cuanto peor es la solución encontrada respecto a la mejor cota no descartada que ha encontrado el programa. Sin embargo, como el objetivo es encontrar una solución factible y muy buena, dicho objetivo se ve satisfecho. A parte de imponer este gap del 5%, se ha impuesto también que el tiempo máximo de ejecución de programa sea de 10 horas, sin embargo en la mayoría de los casos se llega a dicho gap mucho antes. En los casos en los que no se llega a dicho gap y se acaba el tiempo de ejecución, el valor obtenido del gap es uy cercano al 5%, es decir, como máximo un 8%.

El primer paso a seguir era diferenciar los diferentes criterios entre principales y secundarios. Al considerar el factor académico muy por encima del logístico, se decidió primero implementar el modelo con dichos criterios y añadir posteriormente y jerárquicamente los logísticos.

Para lograr unos pesos adecuados en los criterios académicos, y más tarde los logísticos, lo primero que se realizó fue normalizar dichos criterios. De esta manera se realizaron una serie de optimizaciones del modelo, como demuestra la siguiente tabla (tabla 14), dándole en cada optimización un peso muy elevado un criterio, y al resto un peso ε (un peso muy pequeño).

	W2	W3	W5	W6	W8	W9	Preferencias Master (max)	Preferencias Grado (max)	1 Día Libre (min)	2 Días Libres (min)	Cuatrimestres (min)	Separación Difíciles (max)
2	**1**	ε	E	ε	E	ε	**107**	68	17	51	14	145
3	ε	**1**	ε	ε	ε	ε	103	**76**	13	46	8	171
5	ε	ε	**1**	ε	ε	ε	107	70	**8**	38	9	246
6	ε	ε	ε	**1**	ε	E	103	71	10	**31**	5	147
8	ε	ε	ε	ε	**1**	ε	107	73	18	43	**3**	129
9	ε	ε	ε	ε	E	**1**	88	65	15	39	18	**289**

Tabla 12 Búsqueda de máximos de los criterios y valores óptimos

Tras obtener los resultados anteriores, se cogieron los valores más elevados para cada criterio para utilizarlos en su normalización, obteniendo así la siguiente tabla (tabla 15):

Preferencias Masters	Preferencias Grados	1 día libre	2 días libres	Cuatrimestre	Separación Difíciles
107	76	22	55	19	289

Tabla 13 Máximo de cada criterio

Antes de experimentar con diferentes configuraciones de pesos, se analizaron los datos representados en las tablas 14 y 15 para ver qué criterios van en la misma dirección y cuales son opuestos. Se puede apreciar claramente, y como es lógico, que los criterios Preferencias Masters y Preferencias Grados van en la misma dirección. Por otro lado, los criterios de uno o dos días libres van también en la misma dirección. De esta manera, y considerando un único peso para las dos preferencias y otro para los días libres, pasamos de tener seis pesos diferentes a 4.

$$\min[z] = -w_2 * (C_2 + C_3) + w_5 * (C_5 + C_6) + w_8 * C_8 - w_9 * C_9$$

Dividiendo cada criterio entre su máximo se logra su normalización. Posteriormente, se realizaron varios experimentos con pesos diversos, esta vez en porcentajes (%). Como ya se ha mencionado, solo se consideran en este punto 6 criterios, ya que el resto se añadirán jerárquicamente, y solo 4 pesos, ya que algunos criterios van en la misma dirección. En la siguiente tabla (tabla 16) se aprecia el resultado de las diferentes optimizaciones realizadas:

Configuración	w2	w5	w8	w9	Preferencias Master	Preferencias Master	1 Día Libre	2 Días Libres	Cuatrimestres (min)	Separación Difíciles
1	20	40	10	30	107	76	8	33	4	287
2	15	35	20	30	107	76	8	33	4	287
3	10	40	10	40	107	76	8	32	5	288
4	5	50	20	25	107	76	8	33	3	288
5	30	20	30	20	107	76	8	34	3	287
6	5	70	5	20	107	76	8	32	4	286
7	5	80	5	10	107	76	8	32	5	286
8	5	60	5	30	107	76	8	32	4	286
9	25	25	25	25	107	76	8	33	3	286

Tabla 14 Pruebas con diferentes valores para los pesos de los criterios académicos

Tras analizar los resultados obtenidos, la configuración deseada fue la tercera, ya que los criterios tienen valores muy cercanos a los óptimos, además de ser los más adecuados considerando la importancia de cada criterio. Ya teniendo estos pesos fijados, era el momento de añadir los criterios restantes. Para lograr esto, se añadieron las siguientes restricciones al modelo, las cuales iban a lograr que la solución obtenida no empeorara al añadir los criterios logísticos.

$$PreferenciasMaster \geq 107 \tag{95}$$

$$PreferenciasGrado \geq 76 \tag{96}$$

$$UnDiaLibre \leq 8 \tag{97}$$

$$DosDiasLibres \leq 32 \tag{98}$$

$$Cuatrimestres \leq 5 \tag{99}$$

$$SeparacionDificiles \geq 288 \tag{100}$$

Con dichas restricciones añadidas era el momento de añadir los tres criterios logísticos sustituyendo a los académicos, los cuales fueron eliminados momentáneamente de la función objetivo. Tras realizar pruebas dándole un peso muy pequeño al criterio departamentos y pesos razonables a los otros dos, éste primero ya obtenía su valor óptimo, es decir, cero. De esta manera, se vio que departamentos era un criterio independiente del resto por lo cual ya se le dio un peso determinado que no se variaría a lo largo de esta etapa. Posteriormente, se realizaron las pruebas que aparecen en la tabla siguiente (tabla 17) para ver qué combinación de pesos para los dos criterios restantes iba a dar como resultado una solución satisfactoria:

Pesos	w1	w4	w7	Aulas Ocupadas	Zonas Ocupadas	Departamentos
1	95	5	10	447	289	0
2	75	25	10	452	268	0
3	50	50	10	468	251	0
4	25	75	10	479	247	0
5	5	95	10	483	247	0

Tabla 15 Análisis posterior para los criterios logísticos

Como ya se ha comentado antes, se puede ver que el criterio departamentos adquiere dicho valor óptimo en todas las configuraciones. Teniendo en cuenta esta tabla se dibujó un diagrama de Pareto (figura 1) para apreciar a relación existente entre el criterio referente a las aulas ocupadas y el de las zonas ocupadas, los cuales van en direcciones opuestas. Esto es debido a que en este caso concreto las aulas más grandes están situadas en zonas diferentes, pero, en otro caso con una distribución diferente estos criterios no tendrían por qué ser opuestos.

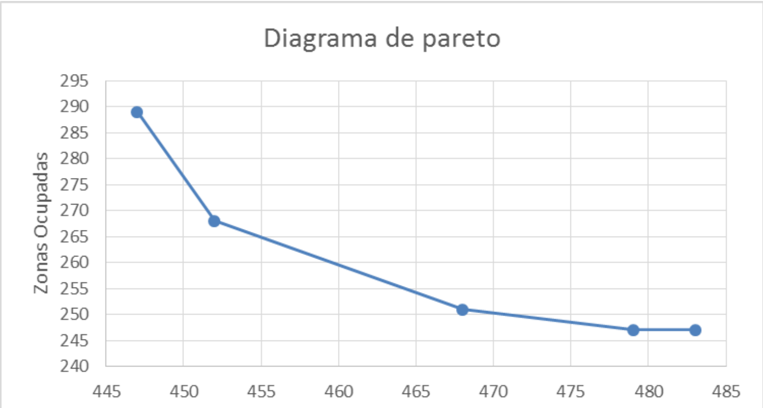

Figura 1 Diagrama de Pareto de los criterios zonas y aulas

Una vez analizado el diagrama, y sabiendo que ambos criterios deben minimizarse, se aprecia que una buena combinación para ambos criterios es otorgarles el mismo peso, es decir un peso de 50 a cada uno. Como ya se ha comentado, se seguirá otorgando un peso de 10 al criterio departamentos.

Tras escoger esta configuración de pesos para los tres criterios logísticos, se realizó una última optimización con el programa eliminando las restricciones añadidas al final ((95), (96), (97), (98), (99) y (100)) y sustituyendo la función objetivo por la del modelo avanzado, presentada anteriormente (7). Para tratar los criterios de forma jerárquica se realiza poniendo pesos con magnitudes diferentes, ya que, si no sería necesario ejecutar el modelo dos veces, dificultando así su implementación y utilización por parte de personal del SIAE.

Teniendo ya el programa preparado se escogió la siguiente configuración de pesos, manteniendo la relación entre los criterios académicos y también entre los logísticos. Dichos pesos y los resultados obtenidos aparecen a continuación (tabla 18):

Pesos	w1	w2	w3	w4	w5	w6	w7	w8	w9	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
Optimización	50	1000	1000	50	4000	4000	10	1000	4000	467	107	76	270	8	32	0	4	282
Valores óptimos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	443	101	76	234	8	31	0	3	289
Variación %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5%	0%	0%	15%	0%	3%	0%	33%	2%

Tabla 16 Resultado optimización otoño 2016

Como se puede observar los resultados obtenidos son muy favorables, presentando poca diferencia con los valores óptimos encontrados para cada uno de los criterios. Se puede considerar pues que el modelo y los pesos son los adecuados.

Tras esta última validación, es interesante presentar los resultados o propuestas de calendario de exámenes para el periodo de otoño del próximo curso, es decir, enero del año 2017. Los resultados para este año son los presentados a continuación y se comparan con los valores óptimos obtenidos para este periodo en el año 2016. Estos valores son una referencia, pero no tienen por qué coincidir con los del 2017:

	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
Optimización	469	107	76	269	10	43	0	4	243
Valores óptimos	443	101	76	234	8	31	0	3	289
Variación %	6%	0%	0%	15%	25%	39%	0%	33%	16%

Tabla 17 Optimización otoño 2017 vs Cotas Óptimas

Estos resultados obtenidos son también muy favorables por lo cual el programa queda validado para otoño. Presentar de forma gráfica el resultado que se obtienen teniendo en cuenta todas las titulaciones sería poco claro, así que se presenta el calendario para el grado GETI (figura 2), que es uno de los más difíciles de programar manualmente debido a la gran cantidad de asignaturas que tiene y que además comparte asignaturas con el grado GEQ. En la figura 3 aparece la leyenda de la figura 2, aclarando el código de colores asociado a cada cuatrimestre.

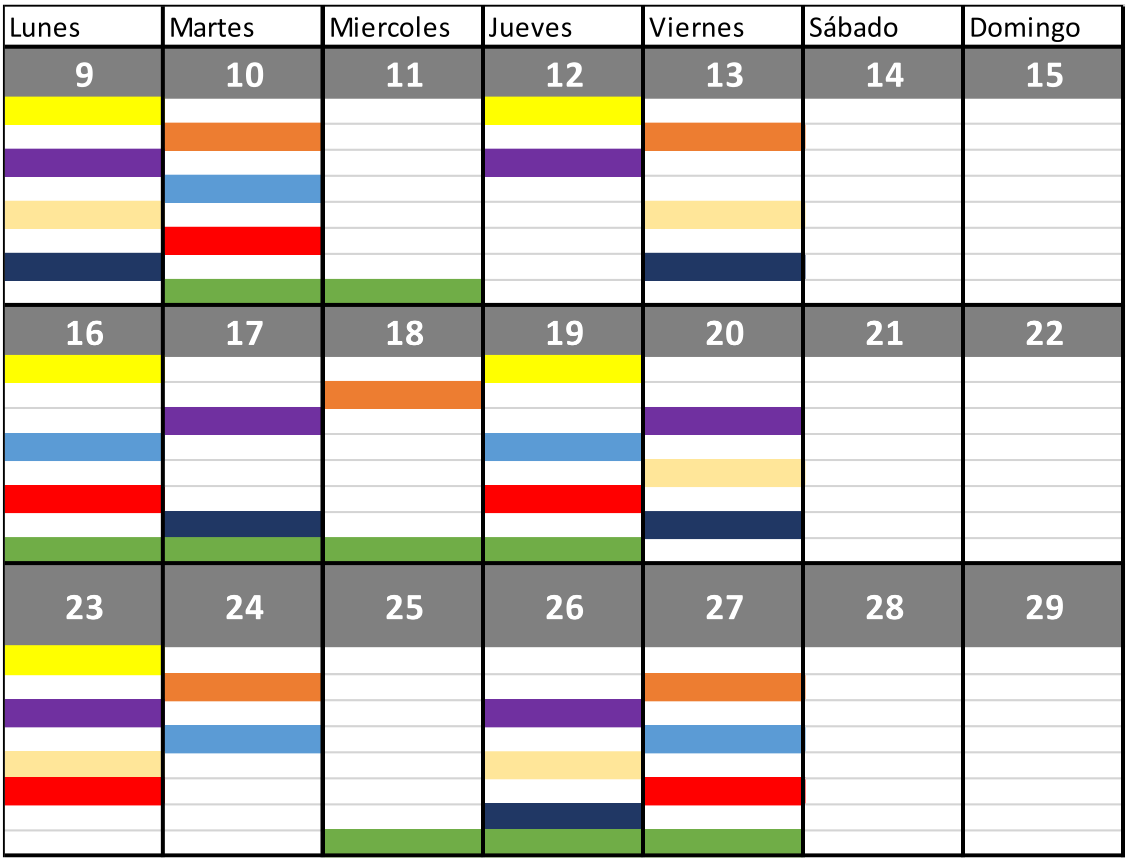

Figura 2 Representación visual del calendario de otoño 2017 del GETI

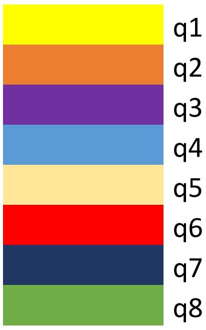

Figura 3 Leyenda colores del calendario de otoño 2017 del GETI

A pesar de que en el cuatrimestre 8 parece que los exámenes sean muy seguidos, esto no es del todo correcto, ya que en este caso, la visualización requiere de un análisis. Es en este cuatrimestre dónde todas las asignaturas son optativas y en el cual no se recompensa el hecho de que las asignaturas tengan días libres entre ellas. También es importante mencionar que en las restricciones se había impuesto que muchas de ellas se pudieran solapar.

6.2.2. Primavera

En el caso de primavera se volvió a ejecutar el programa con los mismos pesos. En el caso del año 2016, se logró obtener los mejores resultados para cada criterio, presentados en la siguiente tabla (tabla 20):

Peso									RESULTADO								
c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
1	ε	ε	ε	ε	ε	ε	ε	ε	364	-	-	-	-	-	-	-	-
ε	1	ε	ε	ε	ε	ε	ε	ε	-	53	-	-	-	-	-	-	-
ε	ε	1	ε	ε	ε	ε	ε	ε	-	-	96	-	-	-	-	-	-
ε	ε	ε	1	ε	ε	ε	ε	ε	-	-	-	241	-	-	-	-	-
ε	ε	ε	ε	1	ε	ε	ε	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
ε	ε	ε	ε	ε	1	ε	ε	0	-	-	-	-	-	0	-	-	-
ε	ε	ε	ε	ε	ε	1	ε	0	-	-	-	-	-	-	0	-	-
ε	ε	ε	ε	ε	ε	ε	1	0	-	-	-	-	-	-	-	0	-
ε	ε	ε	ε	ε	ε	ε	ε	1	-	-	-	-	-	-	-	-	245

Tabla 18 Valores óptimas para primavera

Igual que en el caso anterior, se lograron obtener también los máximos de cada criterio, logrando así la posterior normalización de los pesos.

Con estas optimizaciones se obtuvieron también los valores máximos para cada criterio, con los cuales se realizaría la normalización de los pesos. Dichos valores se presentan a continuación:

Aulas	Preferencias Máster	Preferencias Grado	Zonas Ocupadas	1 Día Libre	2 Días Libres	Departamentos	Cuatrimestres	Separación Difíciles
456	53	96	341	22	28	1	12	245

Tabla 19 Máximos de cada criterio primavera

Tras esto, se realizó la optimización haciendo uso de los pesos utilizados para otoño. Realizando la comparativa en la tabla 21 se puede comprobar que los resultados obtenidos son muy favorables, ya que a variación con los valores óptimos encontrados en la tabla 22 son muy pequeños (máximo 9%).

	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
Optimización	392	50	96	262	0	0	0	6	233
Valores óptimos	364	53	96	241	0	0	0	0	245
Variación %	8%	0%	0%	9%	0%	0%	0%	-	5%

Tabla 20 Optimización primavera 2016 vs Cotas Óptimas

Tras probar el programa para la primavera del año 2016, se realizó la optimización para primavera del 2017, cuyos resultados obtenidos fueron muy favorables. Se encuentra una solución de forma rápida y efectiva, presentada a continuación (tabla 23):

	Aulas	Preferencias Máster	Preferencias Grado	Zonas Ocupadas	1 Día Libre	2 Días Libres	Departamentos	Cuatrimestres	Separación Difíciles
Optimización	387	53	92	260	0	0	0	1	201
Valores óptimos	364	53	96	241	0	0	0	0	245
Variación %	6%	0%	0%	8%	0%	0%	0%	-	18%

Tabla 23 Optimización primavera 2017 vs Valores óptimos

6.2.3. Aclaraciones finales

Para finalizar este apartado es de vital importancia remarcar otra vez la complejidad del problema, ya que no sólo presenta un tamaño muy importante, sino que la dificultad que tienen las diferentes restricciones es muy elevada.

Muchas de las restricciones que se presentan son solamente aplicables al horario de exámenes de la ETSEIB, sin embargo, muchas restricciones como las impuestas en los masters MUEO, MUAR, MAUTO y SCTM ((9), (11), (13) y (15)) son totalmente extrapolables a otros centros. Los criterios empleados también se pueden utilizar para otros centros, a pesar de necesitar alguna adaptación. También las restricciones asociadas al programa simple son totalmente estándares y se pueden reutilizar para la programación en otras instituciones.

En el anexo se incluye un manual de uso del programa para que así la facultad pueda aprovecharlo en un futuro para programar los horarios de los exámenes, que, como se ha podido comprobar, logra de manera efectiva.

Para finalizar es importante resumir los valores de los pesos que se otorga a cada criterio (en este caso o normalizados aún) y los valores con los cuales se normalizan. En la siguiente tabla se pueden apreciar dichos valores:

	Aulas	Preferencias Máster	Preferencias Grado	Zonas Ocupadas	1 Día Libre	2 Días Libres	Departamentos	Cuatrimestres	Separación Difíciles
Peso	500	10000	10000	500	40000	40000	100	10000	40000
Valor normalización otoño	484	101	76	353	22	55	1	19	289
Valor normalización primavera	456	53	96	341	22	28	1	12	245

Tabla 214 Resumen pesos y normalización

7. Conclusiones y extensiones futuras

Tras realizar la programación de los exámenes se ha logrado cumplir los objetivos principales del proyecto, es decir, el diseño y desarrollo de un procedimiento para que la ETSEIB pueda hacer la programación de los exámenes de forma automática y de manera que se tengan en cuenta todas las restricciones relevantes y unos criterios que incrementen la satisfacción y el rendimiento académico de los estudiantes.

Con los resultados obtenidos de la optimización de la programación de los exámenes se logra obtener una distribución que permitirá a los alumnos tener el máximo de tiempo para preparar sus exámenes (criterios de un día y dos días libres) y mantener lo más separados posibles los exámenes difíciles (criterio de separación). Por otro lado, se ha permitido que los alumnos que hagan asignaturas de cuatrimestres consecutivos tengan la oportunidad de realizar los exámenes en un mismo periodo sin problemas con el solapamiento de estos (criterio cuatrimestres). Por último, los alumnos que cursan el grado (con su mayoría de clases por la mañana) y los que cursan casi todos los masters (con su mayoría de clases por la tarde) verán que no deberán cambiar su rutina en época de exámenes ya que se les adaptará la organización perfectamente (criterios de preferencias masters y preferencias grados).

Además, el profesorado y la institución también se verán complacidos por la solución aportada, ya que no se solapan asignaturas que requieran muchos profesores del mismo departamento (criterio departamento) y los exámenes de una misma asignatura no serán impartidos en aulas muy separadas, ayudando así la comunicación entre los profesores (criterio zonas).

Por otro lado también se han logrado completar los objetivos parciales del proyecto, se han comprendido los requisitos básicos que ponen los alumnos, el profesorado y el alumnado. Además se han recolectado y adaptado todos los datos para el programa y se han ordenado de manera adecuada para su futuro uso por parte del SIAE.

Se había comentado que un criterio importante a tener en cuenta en la programación de los exámenes finales debía ser la rotación, es decir, que los exámenes no se programaran siempre en el mismo día (o siempre al principio o siempre al final). A pesar de no haberla tenido en cuenta en el proyecto debido a que se realiza normalmente de forma manual, un de las extensiones futuras podría ser la implementación de esta rotación.

Por último es importante remarcar que, a pesar de que el problema es de una gran complejidad, que el modelo contiene un gran número de variables binarias y restricciones, y a pesar de que es de optimización combinatoria , el programa consigue unos resultados muy buenos. Se logra mejorar el sistema actual cambiando la resolución manual por la resolución automática (y óptima) del problema, logrando mejores resultados y en un tiempo más reducido sin gastar recursos de la universidad.

Como conclusión se puede afirmar que el proyecto ha sido elaborado y complejo pero satisfactorio a nivel global.

8. Agradecimientos

Agradecer a la gran ayuda que ha dado la señora Nuria Bort en la obtención de los datos requeridos para llevar a cabo la programación y agradecerle también sus explicaciones de las necesidades a satisfacer por parte de éste. Esperar que le sea útil este programa al tener que organizar los periodos de exámenes.

También agradecer a mi tutora de proyecto Amaia Lusa, que gracias a toda la información aportada sobre el programa, la teoría sobre la optimización lineal con múltiples variables y todo el apoyo ofrecido tanto al programar y a afrontar los diversos problemas que se han presentado en la posterior optimización, se ha podido llegar a esta solución para un complejo problema que debe afrontar cada año la escuela.

Espero que este programa ayude no solo a la institución sino también a todos los alumnos que cursan alguna de las titulaciones de la ETSEIB.

9. Bibliografía

Lusa, Amaia. “Mètodes Quantitatius d’organització Industrial”. Universitat Politècnica de Catalunya. 16 de junio de 2016.

[http://www.etseib.upc.edu/ca/portal-dassignatures-i-horaris], 15 de abril de 2016

10. Anexo

En este anexo se incluye el código del programa, es decir , los ficheros .mod, . dat y .ops que se corresponden con el modelo matemático escrito en lenguaje OPL (Optimization Programming Language), que es el que entiende el optimizador comercial utilizado. Los dos primeros también se presentarán de forma escrita. A continuación se pueden ver ambos archivos:

Archivo .mod:

```
/*********************************************
 * OPL 12.6.0.0 Model
 * Author: Joan
 * Creation Date: 29/03/2016 at 19:28:53
 *********************************************/
int tarprim=...; // seleccionador tardor o primavera
int F=...; // nombre franges=3
int Np=...; // nombre assignatures
int Nt=...;
int M=...; // nombre aules
int T=...; //nombre dies
int NQ=...; //nombre quatris
int NZ=...; //nombre zones
int zonaj[1..M]=...;//zona en la que se encuentra el aula j
int valor=...;

int zz=...;//indicador primera optativa Q1 MUEI
int zg1=...;//indicador primera optativa Q4 GET/GEQ
int D=...;//numero de departamentos

//pesos
float w1=...;
float w2=...;
float w3=...;
float w4=...;
float w5=...;
float w6=...;
float w7=...;
float w8=...;
float w9=...;

int MATpi[1..Np]=...; //nombre matriculats
int MATti[1..Nt]=...;
int cj[1..M]=...; // capacitat de cada aula
int Qpi[1..Np]=...; // quatrimestre de la assignatura i
int Qti[1..Nt]=...;
int labpt[1..22]=...;
int labtt[1..21]=...;
int TITpi[1..Np]=...;
int TITti[1..Nt]=...;
int ESPpi[1..Np]=...;
int ESPti[1..Nt]=...;
int OPTpi[1..Np]=...;
```

```
➢ int OPTti[1..Nt]=...;
➢ int DEPpi[1..Np]=...;
➢ int GRANDEpi[1..Np]=...;
➢ int DEPti[1..Nt]=...;
➢ int GRANDEti[1..Nt]=...;
➢ int DIFti[1..Nt]=...;
➢ int DIFpi[1..Np]=...;
➢
➢ int maxopt=12; //numero maximo de asignaturas del Q8 de GETI y GEQ
  que se realizan en el mismo dia
➢
➢ int N;
➢ int TTot;
➢
➢
➢ execute
➢ {
➢       if(tarprim==0)
➢       {
➢             N=Nt;
➢             TTot=21;
➢       }
➢       else
➢       {
➢             N=Np;
➢             TTot=22;
➢       }
➢ }
➢
➢ range NN=1..N;
➢ range Tp=1..22;
➢ range Tt=1..21;
➢
➢ int MATi[1..N];
➢ int Qi[1..N];
➢ int TITi[1..N];
➢ int ESPi[1..N];
➢ int labt[1..TTot];
➢ int OPTi[1..N];
➢ int DEPi[1..N];
➢ int GRANDEi[1..N];
➢ int DIFi[1..N];
➢
➢ execute
➢ {
➢       if(tarprim==0)
➢       {
➢             for(var i in NN) MATi[i]=MATti[i];
➢             for(var i in NN) Qi[i]=Qti[i];
➢             for(var i in NN) ESPi[i]=ESPti[i];
➢             for(var i in NN) TITi[i]=TITti[i];
➢             for(var t in Tt) labt[t]=labtt[t];
➢             for(var i in NN) OPTi[i]=OPTti[i];
➢             for(var i in NN) DEPi[i]=DEPti[i];
➢             for(var i in NN) GRANDEi[i]=GRANDEti[i];
➢             for(var i in NN) DIFi[i]=DIFti[i];
```

```
➢         }
➢         else
➢         {
➢               for(var i in NN) MATi[i]=MATi[i];
➢               for(var i in NN) Qi[i]=Qpi[i];
➢               for(var i in NN) ESPi[i]=ESPpi[i];
➢               for(var i in NN) TITi[i]=TITpi[i];
➢               for(var t in Tp) labt[t]=labpt[t];
➢               for(var i in NN) OPTi[i]=OPTpi[i];
➢               for(var i in NN) DEPi[i]=DEPpi[i];
➢               for(var i in NN) GRANDEi[i]=GRANDEpi[i];
➢               for(var i in NN) DIFi[i]=DIFpi[i];
➢         }
➢ }
➢
➢ tuple Parella {
➢        int i;
➢        int j;
➢     };
➢ {Parella} dificils1 = {<i,j> | i in 1..(N-1), j in (i+1)..N:
  DIFi[i]+DIFi[j]==2 && Qi[i]==Qi[j] && (TITi[i]==1||TITi[i]==2) &&
  (TITi[j]==1||TITi[j]==2)};
➢ {Parella} dificils2 = {<i,j> | i in 1..(N-1), j in (i+1)..N:
  DIFi[i]+DIFi[j]==2 && Qi[i]==Qi[j] && (TITi[i]==1||TITi[i]==3) &&
  (TITi[j]==1||TITi[j]==3)};
➢
➢ dvar boolean x[1..N][1..M][1..T][1..F]; //binaria que vale 1 sii el
  examen i se realiza en el aula j el dia t en la franja f
➢ dvar boolean y[1..N][1..T][1..F]; //binaria que vale 1 sii el
  examen i se realiza el dia t en la franja f
➢ dvar float preferenciaGRAUS;//valor referente a la preferencia de
  horario de los grados por la mañana
➢ dvar float preferenciaMASTERS;//valor referente a la preferencia de
  horario de los masters por la tarde
➢ dvar boolean ZonaOcupada[1..N][1..NZ];//vale 1 sii el examen de la
  asignatura i ocupa la zona z
➢ dvar float NumeroZonasOcupadas[1..N];//numero de zonas ocupadas por
  la asignatura i
➢ dvar float+ mu[1..11][1..T-1][1..NQ];//indicador de veces que no se
  cumple el dia libre entre examenes del mismo cuatrimestre
➢ dvar float+ mdep[1..D][1..T][1..F] in 0..1;//indicador de cuantas
  veces se realiza un examen grande del mismo departamento en la
  misma franja del mismo dia
➢ dvar float+ mu2[1..11][1..T-2][1..NQ];//indicador de veces que no
  se cumple el dia libre entre examenes del mismo cuatrimestre
➢ dvar float+ quad[1..6][1..T][1..NQ-1];
➢ dvar float+ Diaactuali[1..N];//dia en el que se realiza el examen i
➢
➢ //dvar boolean s[1..2][1..N][1..N];
➢ dvar boolean s1[dificils1];
➢ dvar boolean s2[dificils2];
➢
➢ //dvar float+ sep[1..2][1..N][1..N] in 0..21;
➢ dvar float+ sep1[dificils1] in 0..21;
➢ dvar float+ sep2[dificils2] in 0..21;
➢
➢ dvar float+ aulas;
```

```
➢ dvar float+ zonas;
➢ dvar float+ undialibre;
➢ dvar float+ dosdiaslibres;
➢ dvar float+ departamentos;
➢ dvar float+ cuatrimestres;
➢ dvar float+ separacion;
➢
➢ minimize
➢     w1*aulas+w4*zonas+w7*departamentos-w2*preferenciaMASTERS-
  w3*preferenciaGRAUS+w5*undialibre+w6*dosdiaslibres+w8*cuatrimestres
  -w9*separacion;
➢       //w1*aulas+w4*zonas+w7*departamentos;
➢
➢       subject to
➢       {
➢
➢ //programar dias de fin de semana y dia st joan
➢             sum(i in 1..N)sum(f in 1..F)sum(t in 1..T:
  labt[t]==0)y[i][t][f]<=0;
➢
➢
➢ //programar cada examen un dia y una franja
➢             forall (i in 1..N)
➢               {
➢                   sum(t in 1..T)sum(f in 1..F) y[i][t][f]==1;

➢
➢               }
➢
➢
➢ //relació x, y
➢             forall (i in 1..N, t in 1..T, f in 1..F)
➢               {
➢                   sum(j in 1..M) x[i][j][t][f]<=M*y[i][t][f];
➢
➢               }
➢
➢ //Generacion dia en el que se realiza el examen
➢
➢             forall(i in 1..N)
➢                  {
➢                  Diaactuali[i]==sum(f in 1..F, t in
  1..T)t*y[i][t][f];
➢                  }
➢
➢ //assignar aules suficients (capacitat suficient)
➢             forall(i in 1..N)
➢               {
➢                 sum(t in 1..T, f in 1..F, j in 1..M)
  x[i][j][t][f]*cj[j]>=MATi[i];
➢
➢               }
➢
➢
➢             //no solapament examens en una aula
➢             forall (j in 1..M, t in 1..T, f in 1..F)
➢               {
```

```
➢                   sum(i in 1..N) x[i][j][t][f]<=1;
➢               }
➢
➢
➢ //No solapamiento asignaturas mismo cuatri y titulacion
➢             //GETI y GEQ
➢
➢             //OPTATIVAS Q4 Y Q8 GETI Y GEQ
➢
➢             //Optativas Q4 en el mismo dia
➢             forall(i in 1..(N-1): OPTi[i]==1 && Qi[i]==4 &&
TITi[i]==1)
➢               {
➢               forall(j in (i+1)..N: OPTi[j]==1 && Qi[j]==4 &&
TITi[j]==1)
➢                 {
➢                 forall(t in 1..T)
➢                   {
➢                   sum(f in 1..F)(f*y[i][t][f])==sum(f in
1..F)(f*y[j][t][f]);
➢                   }
➢                 forall(f in 1..F)
➢                   {
➢                   sum(t in 1..T)(t*y[i][t][f])==sum(t in
1..T)(t*y[j][t][f]);
➢                   }
➢           }
➢
➢               }
➢
➢
➢             //Q4 GETI
➢             forall(t in 1..T)
➢               {
➢               (sum(f in 1..F)sum(i in 2..N: Qi[i]==4 && OPTi[i]==0
&& (TITi[i]==1||TITi[i]==2))y[i][t][f])+(sum(f in
1..F)y[zg1][t][f])<=1;
➢               }
➢             //Q4 GEQ
➢             forall(t in 1..T)
➢               {
➢               (sum(f in 1..F)sum(i in 2..N: Qi[i]==4 && OPTi[i]==0
&& (TITi[i]==1||TITi[i]==3))y[i][t][f])+(sum(f in
1..F)y[zg1][t][f])<=1;
➢               }
➢
➢             //Q8 GETI y GEQ
➢             forall(t in 1..T)
➢               {
➢                (sum(f in 1..F)(sum(i in 1..N: Qi[i]==8 &&
TITi[i]==1)y[i][t][f]))<=maxopt;
➢               }
➢
➢
➢             //assignaturas de la gente que hace GETI (menos Q4 y
Q8)
```

```
➢               forall (t in 1..T, q in 1..NQ: q!=4 && q!=8)
➢                 {
➢                     sum(i in 1..N : (TITi[i]==1 || TITi[i]==2) &&
Qi[i]==q)sum(f in 1..F) y[i][t][f]<=1;
➢                 }
➢
➢                 //assignaturas de la gente que hace GEQ (menos Q4 y
Q8)
➢               forall (t in 1..T, q in 1..NQ: q!=4 && q!=8)
➢                 {
➢                     sum(i in 1..N : (TITi[i]==1 || TITi[i]==3) &&
Qi[i]==q)sum(f in 1..F) y[i][t][f]<=1;
➢                 }
➢
➢                 //Termodinamica
➢               forall (t in 1..T)
➢                 {
➢                   sum(f in 1..F)y[1][t][f]+sum(f in 1..F)(sum(i in
2..N : Qi[i]==5 && (TITi[i]==1||TITi[i]==2) &&
OPTi[i]==0)y[i][t][f])<=1;
➢                   sum(f in 1..F)y[1][t][f]+sum(f in 1..F)(sum(i in
2..N : Qi[i]==4 && (TITi[i]==1||TITi[i]==3) &&
OPTi[i]==0)y[i][t][f])<=1;
➢
➢                 }
➢
➢               //assignatures de la gent que fa el MUEI
➢
➢                 //Q3
➢               forall (t in 1..T, spec in 1..9)
➢                 {
➢                     (sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==3 &&
ESPi[i]==0 && TITi[i]==4)y[i][t][f])+(sum(f in 1..F)sum(i in 1..N:
Qi[i]==3 && ESPi[i]==spec)y[i][t][f])<=1;
➢                 }
➢
➢                 //Q1 y Q2
➢                 //Optativas Q1 y Q2 en el mismo dia
➢               forall(i in 1..(N-1), j in (i+1)..N, f in 1..F:
TITi[i]==4 && TITi[j]==4 && ESPi[i]>0 && Qi[i]<3 && ESPi[j]>0 &&
Qi[j]<3)
➢                     sum(t in 1..T)(t*y[i][t][f])==sum(t in
1..T)(t*y[j][t][f]);
➢
➢               forall(i in 1..(N-1), j in (i+1)..N, t in 1..T:
TITi[i]==4 && TITi[j]==4 && ESPi[i]>0 && Qi[i]<3 && ESPi[j]>0 &&
Qi[j]<3)
➢                     sum(f in 1..F)(f*y[i][t][f])==sum(f in
1..F)(f*y[j][t][f]);
➢
➢
➢
➢
➢                 // no solapamiento optativas con troncales de Q1 y Q2
➢               forall(t in 1..T)
➢                 {
```

```
➢               (sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==1 && ESPi[i]==0
&& TITi[i]==4)y[i][t][f])+(sum(f in 1..F)y[zz][t][f])<=1;
➢               (sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==2 && ESPi[i]==0
&& TITi[i]==4)y[i][t][f])+(sum(f in 1..F)y[zz][t][f])<=1;
➢               }
➢
➢               //MUEO
➢               forall (t in 1..T, q in 1..NQ)
➢               {
➢                   sum(i in 1..N : TITi[i]==5 && Qi[i]==q)sum(f in
1..F) y[i][t][f]<=1;
➢               }
➢
➢
➢               //SCTM
➢               forall (t in 1..T, q in 1..NQ, spec in 10..11)
➢               {
➢                   sum(i in 1..N : TITi[i]==9 && ESPi[i]==spec &&
Qi[i]==q)sum(f in 1..F) y[i][t][f]<=1;
➢               }
➢
➢
➢
➢
➢               //MUAR y la compartida entre MUAR y MAUTO
➢               forall (t in 1..T, q in 1..NQ)
➢               {
➢                   sum(i in 1..N : (TITi[i]==6 || TITi[i]==8) &&
Qi[i]==q)sum(f in 1..F) y[i][t][f]<=1;
➢               }
➢
➢               //MAUTO y la compartidaa entre MUAR y MAUTO
➢               forall (t in 1..T, q in 1..NQ)
➢               {
➢                   sum(i in 1..N : (TITi[i]==7 || TITi[i]==8) &&
Qi[i]==q)sum(f in 1..F) y[i][t][f]<=1;
➢               }
➢
➢
➢ //Horario preferencial
➢               //GETI y GEQ
➢               preferenciaGRAUS == sum(t in 1..T, f in 1..2)(sum(i
in 1..N: (TITi[i]==1||TITi[i]==2||TITi[i]==3))y[i][t][f]);
➢
➢
➢  //Horario preferencial
➢               //Masters, pero solo Q3 MUEI y resto masters
➢               preferenciaMASTERS == sum(t in 1..T)((sum(i in 1..N:
(TITi[i]==5||TITi[i]==6||TITi[i]==7||TITi[i]==8||TITi[i]==9))y[i][t
][3])+(sum(i in 1..N: TITi[i]==4 && Qi[i]==3)y[i][t][3]));
➢
➢
➢  //Zonas
➢               forall(z in 1..NZ, i in 1..N)
➢               {
```

```
➢                   sum(f in 1..F,t in 1..T)(sum(j in 1..M:
zonaj[j]==z)x[i][j][t][f])<=35*ZonaOcupada[i][z];
➢                   sum(f in 1..F,t in 1..T)(sum(j in 1..M:
zonaj[j]==z)x[i][j][t][f])>=ZonaOcupada[i][z];
➢               }
➢
➢                forall(i in 1..N)
➢               {
➢               NumeroZonasOcupadas[i] == (sum(z in
1..NZ)ZonaOcupada[i][z]);
➢
➢               }
➢
➢               (sum(i in 1..N)NumeroZonasOcupadas[i])>=N;
➢
➢ //1 dia descanso entre asignaturas del mismo cuatrimestre
➢
➢             //GETI y GEQ
➢
➢             //OPTATIVAS Q4 Y Q8 GETI Y GEQ
➢
➢             //Q4 GETI
➢             forall(t in 1..(T-1), q in 4..4)
➢               {
➢               ((sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==q && OPTi[i]==0
&& (TITi[i]==1||TITi[i]==2))y[i][t][f])+(sum(f in
1..F)y[zg1][t][f]))+((sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==q &&
OPTi[i]==0 && (TITi[i]==1||TITi[i]==2))y[i][t+1][f])+(sum(f in
1..F)y[zg1][t+1][f]))<=1+mu[1][t][q];
➢
➢               }
➢             //Q4 GEQ
➢             forall(t in 1..(T-1))
➢               {
➢               ((sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==4 && OPTi[i]==0
&& (TITi[i]==1||TITi[i]==3))y[i][t][f])+(sum(f in
1..F)y[zg1][t][f]))+((sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==4 &&
OPTi[i]==0 && (TITi[i]==1||TITi[i]==3))y[i][t+1][f])+(sum(f in
1..F)y[zg1][t+1][f]))<=1+mu[2][t][4];
➢
➢               }
➢
➢
➢
➢             //assignaturas de la gente que hace GETI (menos Q4 y
Q8)
➢             forall (t in 1..(T-1), q in 1..NQ: q!=4 && q!=8)
➢               {
➢                   (sum(i in 1..N : (TITi[i]==1 || TITi[i]==2) &&
Qi[i]==q)sum(f in 1..F) y[i][t][f])+(sum(i in 1..N : (TITi[i]==1 ||
TITi[i]==2) && Qi[i]==q)sum(f in 1..F)
y[i][t+1][f])<=1+mu[3][t][q];
➢               }
➢
➢             //assignaturas de la gente que hace GEQ (menos Q4 y Q8)
➢             forall (t in 1..(T-1), q in 1..NQ: q!=4 && q!=8)
➢               {
```

```
➢                    (sum(i in 1..N : (TITi[i]==1 || TITi[i]==3) &&
   Qi[i]==q)sum(f in 1..F) y[i][t][f])+(sum(i in 1..N : (TITi[i]==1 ||
   TITi[i]==3) && Qi[i]==q)sum(f in 1..F)
   y[i][t+1][f])<=1+mu[4][t][q];
➢               }
➢
➢
➢
➢            //assignatures de la gent que fa el MUEI
➢
➢               //Q3
➢            forall (t in 1..(T-1), spec in 1..9)
➢               {
➢
➢               ((sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==3 && ESPi[i]==0
   && TITi[i]==4)y[i][t][f])+(sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==3 &&
   ESPi[i]==spec)y[i][t][f]))+((sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==3
   && ESPi[i]==0 && TITi[i]==4)y[i][t+1][f])+(sum(f in 1..F)sum(i in
   1..N: Qi[i]==3 && ESPi[i]==spec)y[i][t+1][f]))<=1+mu[5][t][3];

➢
➢               }
➢
➢
➢
➢
➢               //Q1 y Q2
➢
➢               // no solapamiento optativas con troncales de Q1 y Q2
➢            forall(t in 1..(T-1))
➢               {
➢               ((sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==1 && ESPi[i]==0
   && TITi[i]==4)y[i][t][f])+(sum(f in 1..F)y[zz][t][f]))+((sum(f in
   1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==1 && ESPi[i]==0 &&
   TITi[i]==4)y[i][t+1][f])+(sum(f in
   1..F)y[zz][t+1][f]))<=1+mu[6][t][1];
➢               ((sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==2 && ESPi[i]==0
   && TITi[i]==4)y[i][t][f])+(sum(f in 1..F)y[zz][t][f]))+(((sum(f in
   1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==2 && ESPi[i]==0 &&
   TITi[i]==4)y[i][t+1][f])+(sum(f in
   1..F)y[zz][t+1][f])))<=1+mu[7][t][2];
➢               }
➢
➢
➢
➢
➢               //MUEO
➢               forall (t in 1..(T-1), q in 1..NQ)
➢               {
➢                    (sum(i in 1..N : TITi[i]==5 && Qi[i]==q)sum(f in
   1..F) y[i][t][f])+(sum(i in 1..N : TITi[i]==5 && Qi[i]==q)sum(f in
   1..F) y[i][t+1][f])<=1+mu[8][t][q];
➢               }
➢
➢
➢
➢               //SCTM
➢               forall (t in 1..(T-1), q in 1..NQ, spec in 10..11)
```

```
➢               {
➢                   (sum(i in 1..N : ESPi[i]==spec && Qi[i]==q)sum(f
   in 1..F) y[i][t][f])+(sum(i in 1..N : ESPi[i]==spec &&
   Qi[i]==q)sum(f in 1..F) y[i][t+1][f])<=1+mu[11][t][q];
➢               }
➢
➢
➢
➢               //MUAR y la compartidaa entre MUAR y MAUTO
➢               forall (t in 1..(T-1), q in 1..NQ)
➢               {
➢                   (sum(i in 1..N : (TITi[i]==6 || TITi[i]==8) &&
   Qi[i]==q)sum(f in 1..F) y[i][t][f])+(sum(i in 1..N : (TITi[i]==6 ||
   TITi[i]==8) && Qi[i]==q)sum(f in 1..F)
   y[i][t+1][f])<=1+mu[9][t][q];
➢               }
➢
➢
➢
➢
➢               //MAUTO y la compartidaa entre MUAR y MAUTO
➢               forall (t in 1..(T-1), q in 1..4)
➢               {
➢                   (sum(i in 1..N : (TITi[i]==7 || TITi[i]==8) &&
   Qi[i]==q)sum(f in 1..F) y[i][t][f])+(sum(i in 1..N : (TITi[i]==7 ||
   TITi[i]==8) && Qi[i]==q)sum(f in 1..F)
   y[i][t+1][f])<=1+mu[10][t][q];
➢               }
➢
➢
➢
➢  //Mismo departamento asignaturas grandes
➢              forall(d in 1..D, t in 1..T, f in 1..F)
➢               {
➢               sum(i in 1..N: DEPi[i]==d && GRANDEi[i]==1)y[i][t][f]
   <= 1+mdep[d][t][f];
➢                   }
➢
➢
➢  //Dos Dias descanso entre asignaturas del mismo cuatrimestre
➢
➢              //GETI y GEQ
➢
➢              //OPTATIVAS Q4 Y Q8 GETI Y GEQ
➢
➢              //Q4 GETI
➢              forall(t in 1..(T-2))
➢               {
➢               ((sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==4 && OPTi[i]==0
   && (TITi[i]==1||TITi[i]==2))y[i][t][f])+(sum(f in
   1..F)y[zg1][t][f]))+((sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==4 &&
   OPTi[i]==0 && (TITi[i]==1||TITi[i]==2))y[i][t+1][f])+(sum(f in
   1..F)y[zg1][t+1][f]))+((sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==4 &&
   OPTi[i]==0 && (TITi[i]==1||TITi[i]==2))y[i][t+2][f])+(sum(f in
   1..F)y[zg1][t+2][f]))<=1+mu2[1][t][4];
➢
```

```
➢ }
➢ //Q4 GEQ
➢ forall(t in 1..(T-2))
➢ {
➢ ((sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==4 && OPTi[i]==0
&& (TITi[i]==1||TITi[i]==3))y[i][t][f])+(sum(f in
1..F)y[zg1][t][f]))+((sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==4 &&
OPTi[i]==0 && (TITi[i]==1||TITi[i]==3))y[i][t+1][f])+(sum(f in
1..F)y[zg1][t+1][f]))+((sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==4 &&
OPTi[i]==0 && (TITi[i]==1||TITi[i]==3))y[i][t+2][f])+(sum(f in
1..F)y[zg1][t+2][f]))<=1+mu2[2][t][4];
➢
➢ }
➢
➢
➢ //assignaturas de la gente que hace GETI (menos Q4 y
Q8)
➢ forall (t in 1..(T-2), q in 1..NQ: q!=4 && q!=8)
➢ {
➢ (sum(i in 1..N : (TITi[i]==1 || TITi[i]==2) &&
Qi[i]==q)sum(f in 1..F) y[i][t][f])+(sum(i in 1..N : (TITi[i]==1 ||
TITi[i]==2) && Qi[i]==q)sum(f in 1..F) y[i][t+1][f])+(sum(i in 1..N
: (TITi[i]==1 || TITi[i]==2) && Qi[i]==q)sum(f in 1..F)
y[i][t+2][f])<=1+mu2[3][t][q];
➢ }
➢
➢ //assignaturas de la gente que hace GEQ (menos Q4 y Q8)
➢ forall (t in 1..(T-2), q in 1..NQ: q!=4 && q!=8)
➢ {
➢ (sum(i in 1..N : (TITi[i]==1 || TITi[i]==3) &&
Qi[i]==q)sum(f in 1..F) y[i][t][f])+(sum(i in 1..N : (TITi[i]==1 ||
TITi[i]==3) && Qi[i]==q)sum(f in 1..F) y[i][t+1][f])+(sum(i in 1..N
: (TITi[i]==1 || TITi[i]==3) && Qi[i]==q)sum(f in 1..F)
y[i][t+2][f])<=1+mu2[4][t][q];
➢ }
➢
➢
➢
➢
➢ //assignatures de la gent que fa el MUEI
➢
➢ //Q3
➢ forall (t in 1..(T-2), spec in 1..9)
➢ {
➢
➢ ((sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==3 && ESPi[i]==0
&& TITi[i]==4)y[i][t][f])+(sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==3 &&
ESPi[i]==spec)y[i][t][f]))+((sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==3
&& ESPi[i]==0 && TITi[i]==4)y[i][t+1][f])+(sum(f in 1..F)sum(i in
1..N: Qi[i]==3 && ESPi[i]==spec)y[i][t+1][f]))+((sum(f in
1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==3 && ESPi[i]==0 &&
TITi[i]==4)y[i][t+2][f])+(sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==3 &&
ESPi[i]==spec)y[i][t+2][f]))<=1+mu2[5][t][3];
➢
➢ }
➢
➢ //Q1 y Q2
➢
```

```
➢ 	// no solapamiento optativas con troncales de Q1 y Q2
➢ 	forall(t in 1..(T-2))
➢ 	{
➢ 	((sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==1 && ESPi[i]==0 && TITi[i]==4)y[i][t][f])+(sum(f in 1..F)y[zz][t][f]))+((sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==1 && ESPi[i]==0 && TITi[i]==4)y[i][t+1][f])+(sum(f in 1..F)y[zz][t+1][f]))+((sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==1 && ESPi[i]==0 && TITi[i]==4)y[i][t+2][f])+(sum(f in 1..F)y[zz][t+2][f]))<=1+mu2[6][t][1];
➢ 	((sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==2 && ESPi[i]==0 && TITi[i]==4)y[i][t][f])+(sum(f in 1..F)y[zz][t][f]))+(((sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==2 && ESPi[i]==0 && TITi[i]==4)y[i][t+1][f])+(sum(f in 1..F)y[zz][t+1][f])))+(((sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==2 && ESPi[i]==0 && TITi[i]==4)y[i][t+2][f])+(sum(f in 1..F)y[zz][t+2][f])))<=1+mu2[7][t][2];
➢ 	}
➢
➢
➢
➢ 	//MUEO
➢ 	forall (t in 1..(T-2), q in 1..2)
➢ 	{
➢ 		(sum(i in 1..N : TITi[i]==5 && Qi[i]==q)sum(f in 1..F) y[i][t][f])+(sum(i in 1..N : TITi[i]==5 && Qi[i]==q)sum(f in 1..F) y[i][t+1][f])+(sum(i in 1..N : TITi[i]==5 && Qi[i]==q)sum(f in 1..F) y[i][t+2][f])<=1+mu2[8][t][q];
➢ 	}
➢
➢
➢
➢ 	//STCM
➢ 	forall (t in 1..(T-2), q in 1..NQ, spec in 10..11)
➢ 	{
➢ 		(sum(i in 1..N : ESPi[i]==spec && Qi[i]==q)sum(f in 1..F) y[i][t][f])+(sum(i in 1..N : ESPi[i]==spec && Qi[i]==q)sum(f in 1..F) y[i][t+1][f])+(sum(i in 1..N : ESPi[i]==spec && Qi[i]==q)sum(f in 1..F) y[i][t+2][f])<=1+mu2[11][t][q];
➢ 	}
➢
➢
➢
➢ 	//MUAR y la compartidaa entre MUAR y MAUTO
➢ 	forall (t in 1..(T-2), q in 1..3)
➢ 	{
➢ 		(sum(i in 1..N : (TITi[i]==6 || TITi[i]==8) && Qi[i]==q)sum(f in 1..F) y[i][t][f])+(sum(i in 1..N : (TITi[i]==6 || TITi[i]==8) && Qi[i]==q)sum(f in 1..F) y[i][t+1][f])+(sum(i in 1..N : (TITi[i]==6 || TITi[i]==8) && Qi[i]==q)sum(f in 1..F) y[i][t+2][f])<=1+mu2[9][t][q];
➢ 	}
➢
➢
➢
➢
➢ 	//MAUTO y la compartidaa entre MUAR y MAUTO
```

```
➢                forall (t in 1..(T-2), q in 1..4)
➢                {
➢                    (sum(i in 1..N : (TITi[i]==7 || TITi[i]==8) && Qi[i]==q)sum(f in 1..F) y[i][t][f])+(sum(i in 1..N : (TITi[i]==7 || TITi[i]==8) && Qi[i]==q)sum(f in 1..F) y[i][t+1][f])+(sum(i in 1..N : (TITi[i]==7 || TITi[i]==8) && Qi[i]==q)sum(f in 1..F) y[i][t+2][f])<=1+mu2[10][t][q];
➢                }
➢
➢
➢ //no solapacion cuatrimestras consecutivos
➢
➢
➢         //GETI y GEQ
➢
➢               //assignaturas de la gente que hace GETI
➢               forall (t in 1..T, q in 1..(NQ-1))
➢                {
➢                    sum(i in 2..N : (TITi[i]==1 || TITi[i]==2) && Qi[i]==q && OPTi[i]==0)sum(f in 1..F) y[i][t][f]+sum(i in 1..N : (TITi[i]==1 || TITi[i]==2) && Qi[i]==(q+1) && OPTi[i]==0)sum(f in 1..F) y[i][t][f]<=1+quad[1][t][q];
➢                }
➢
➢                //assignaturas de la gente que hace GEQ
➢               forall (t in 1..T, q in 1..(NQ-1))
➢                {
➢                    sum(i in 2..N : (TITi[i]==1 || TITi[i]==3) && Qi[i]==q && OPTi[i]==0)sum(f in 1..F) y[i][t][f]+sum(i in 1..N : (TITi[i]==1 || TITi[i]==3) && Qi[i]==(q+1) && OPTi[i]==0)sum(f in 1..F) y[i][t][f]<=1+quad[2][t][q];
➢                }
➢
➢
➢
➢
➢                // no solapamiento troncales MUEI
➢               forall(t in 1..T, q in 1..(NQ-1))
➢                {
➢                (sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==q && ESPi[i]==0 && TITi[i]==4)y[i][t][f])+(sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==(q+1) && ESPi[i]==0 && TITi[i]==4)y[i][t][f])<=1+quad[3][t][q];
➢
➢                }
➢
➢                //no solapamiento troncales MUEO
➢                forall (t in 1..T, q in 1..(NQ-1))
➢                {
➢                    (sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==q && ESPi[i]==0 && TITi[i]==5)y[i][t][f])+(sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==(q+1) && ESPi[i]==0 && TITi[i]==5)y[i][t][f])<=1+quad[4][t][q];
➢
➢                }
➢
➢
```

```
➢                //no solapamiento troncales MUAR
➢                forall (t in 1..T, q in 1..(NQ-1))
➢                {
➢                     (sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==q &&
ESPi[i]==0 && TITi[i]==6)y[i][t][f])+(sum(f in 1..F)sum(i in 1..N:
Qi[i]==(q+1) && ESPi[i]==0 &&
TITi[i]==6)y[i][t][f])<=1+quad[5][t][q];
➢
➢                }
➢
➢                //no solapamiento troncales MAUTO
➢                forall (t in 1..T, q in 1..(NQ-1))
➢                {
➢                     (sum(f in 1..F)sum(i in 1..N: Qi[i]==q &&
ESPi[i]==0 && TITi[i]==7)y[i][t][f])+(sum(f in 1..F)sum(i in 1..N:
Qi[i]==(q+1) && ESPi[i]==0 &&
TITi[i]==7)y[i][t][f])<=1+quad[6][t][q];
➢
➢                }
➢
➢
➢ //generacion del valor de la separación para grados
➢ /*
➢                //GETI
➢
➢                    forall(i in 1..(N-1), j in (i+1)..N:
DIFi[i]+DIFi[j]==2 && Qi[i]==Qi[j] && (TITi[i]==1||TITi[i]==2) &&
(TITi[j]==1||TITi[j]==2))
➢                     {
➢                     Diaactuali[i]-Diaactuali[j]<=21*s[1][i][j];
➢                     Diaactuali[j]-Diaactuali[i]<=21*(1-s[1][i][j]);
➢                     sep[1][i][j]<=Diaactuali[i]-Diaactuali[j]+42*(1-
s[1][i][j]);
➢                     sep[1][i][j]<=Diaactuali[j]-
Diaactuali[i]+42*s[1][i][j];
➢                     }
➢
➢                 //GEQ
➢
➢                    forall(i in 1..(N-1), j in (i+1)..N:
DIFi[i]+DIFi[j]==2 && Qi[i]==Qi[j] && (TITi[i]==1||TITi[i]==3) &&
(TITi[j]==1||TITi[j]==3))
➢                     {
➢                     Diaactuali[i]-Diaactuali[j]<=21*s[2][i][j];
➢                     Diaactuali[j]-Diaactuali[i]<=21*(1-s[2][i][j]);
➢                     sep[2][i][j]<=Diaactuali[i]-Diaactuali[j]+42*(1-
s[2][i][j]);
➢                     sep[2][i][j]<=Diaactuali[j]-
Diaactuali[i]+42*s[2][i][j];
➢                     }
➢ */
➢
➢ //GETI
➢
➢                    forall(<i,j> in dificils1)
➢                     {
➢                     Diaactuali[i]-Diaactuali[j]<=21*s1[<i,j>];
```

```
➢                      Diaactuali[j]-Diaactuali[i]<=21*(1-s1[<i,j>]);
➢                      sep1[<i,j>]<=Diaactuali[i]-Diaactuali[j]+42*(1-
s1[<i,j>]);
➢                      sep1[<i,j>]<=Diaactuali[j]-
Diaactuali[i]+42*s1[<i,j>];
➢                      }
➢
➢                   //GEQ
➢
➢                     forall(<i,j> in dificils2)
➢                      {
➢                      Diaactuali[i]-Diaactuali[j]<=21*s2[<i,j>];
➢                      Diaactuali[j]-Diaactuali[i]<=21*(1-s2[<i,j>]);
➢                      sep2[<i,j>]<=Diaactuali[i]-Diaactuali[j]+42*(1-
s2[<i,j>]);
➢                      sep2[<i,j>]<=Diaactuali[j]-
Diaactuali[i]+42*s2[<i,j>];
➢                      }
➢
➢
➢
➢ //criterios
➢ aulas==(sum(i in 1..N)sum(j in 1..M)sum(t in 1..T)sum(f in 1..F)
  (x[i][j][t][f]));
➢
➢ zonas==(sum(i in 1..N)NumeroZonasOcupadas[i]);
➢ undialibre==(sum(s in 1..11,t in 1..T-1, q in 1..NQ)mu[s][t][q]);
➢ dosdiaslibres>=(sum(s in 1..11,t in 1..T-2, q in
  1..NQ)mu2[s][t][q])-valor;
➢ departamentos==sum(d in 1..D, t in 1..T, f in 1..F)mdep[d][t][f];
➢ cuatrimestres==sum(m in 1..6, t in 1..T, q in 1..(NQ-
  1))quad[m][t][q];
➢ //separacion==sum(i in 1..(N-1), j in (i+1)..N: DIFi[i]+DIFi[j]==2
  && Qi[i]==Qi[j] && (TITi[i]==1||TITi[i]==2) &&
  (TITi[j]==1||TITi[j]==2))sep[1][i][j]+sum(i in 1..(N-1), j in
  (i+1)..N: DIFi[i]+DIFi[j]==2 && Qi[i]==Qi[j] &&
  (TITi[i]==1||TITi[i]==3) && (TITi[j]==1||TITi[j]==3))sep[2][i][j];;
➢ //separacion==sum(k in dificils1)sep1[k]+sum(k in
  dificils2)sep2[k];
➢ separacion==sum(<i,j> in dificils1)sep1[<i,j>]+sum(<i,j> in
  dificils2)sep2[<i,j>];
➢
➢ /*
➢ //fase 2
➢ preferenciaGRAUS>=76;
➢ preferenciaMASTERS>=101;
➢ undialibre<=8;
➢ dosdiaslibres<=32;
➢ cuatrimestres<=5;
➢ separacion>=288;
➢ */
➢
➢             }
➢
➢
➢
➢       //postProceso
```

```
➢
➢ int Aulat[i in 1..N][j in 1..M]=sum(f in 1..F, t in
  1..T)x[i][j][t][f];
➢ int Aulap[i in 1..Np][j in 1..M]=sum(f in 1..F, t in
  1..T)x[i][j][t][f];
➢ int Franjat[i in 1..N]=sum(f in 1..F, t in 1..T)f*y[i][t][f];
➢ int Franjap[i in 1..Np]=sum(f in 1..F, t in 1..T)f*y[i][t][f];
➢ int Diat[i in 1..N]=sum(f in 1..F, t in 1..T)t*y[i][t][f];

➢ int Diap[i in 1..Np]=sum(f in 1..F, t in 1..T)t*y[i][t][f];
```

Archivo .dat:

```
➢ /*********************************************
➢  * OPL 12.6.0.0 Data
➢  * Author: Joan
➢  * Creation Date: 29/03/2016 at 19:28:39
➢  *********************************************/
➢ SheetConnection excel("DadesDefinitives.xlsx");
➢
➢ tarprim from SheetRead(excel,"Assignatures!K1");
➢ F from SheetRead(excel,"Assignatures!B2");
➢ M from SheetRead(excel,"Assignatures!B4");
➢ NQ from SheetRead(excel,"Assignatures!E2");
➢ T from SheetRead(excel,"Assignatures!B3");
➢ cj from SheetRead(excel,"Aules!C8:C41");
➢ NZ from SheetRead(excel,"Assignatures!E4");
➢ zonaj from SheetRead(excel,"Aules!E8:E41");
➢ zz from SheetRead(excel,"Assignatures!H5");
➢ zg1 from SheetRead(excel,"Assignatures!H6");
➢ D from SheetRead(excel,"Assignatures!E3");
➢ w1 from SheetRead(excel,"FuncionObjetivo!B2");
➢ w2 from SheetRead(excel,"FuncionObjetivo!C2");
➢ w3 from SheetRead(excel,"FuncionObjetivo!D2");
➢ w4 from SheetRead(excel,"FuncionObjetivo!E2");
➢ w5 from SheetRead(excel,"FuncionObjetivo!F2");
➢ w6 from SheetRead(excel,"FuncionObjetivo!G2");
➢ w7 from SheetRead(excel,"FuncionObjetivo!H2");
➢ w8 from SheetRead(excel,"FuncionObjetivo!I2");
➢ w9 from SheetRead(excel,"FuncionObjetivo!J2");
➢ valor from SheetRead(excel,"FuncionObjetivo!E9");
➢
➢ Np from SheetRead(excel,"AssignaturesPrimavera!B1");
➢ MATpi from SheetRead(excel,"AssignaturesPrimavera!F12:F181");
➢ Qpi from SheetRead(excel,"AssignaturesPrimavera!I12:I181");
➢ TITpi from SheetRead(excel,"AssignaturesPrimavera!G12:G181");
➢ ESPpi from SheetRead(excel,"AssignaturesPrimavera!L12:L181");
➢ labpt from SheetRead(excel,"Diasemana!D2:D23");
➢ OPTpi from SheetRead(excel,"AssignaturesPrimavera!P12:P181");
➢ DEPpi from SheetRead(excel,"AssignaturesPrimavera!N12:N181");
➢ GRANDEpi from SheetRead(excel,"AssignaturesPrimavera!R12:R181");
➢ DIFpi from SheetRead(excel,"AssignaturesPrimavera!Q12:Q181");
➢ Nt from SheetRead(excel,"AssignaturesTardor!B1");
➢ MATti from SheetRead(excel,"AssignaturesTardor!F12:F215");
➢ Qti from SheetRead(excel,"AssignaturesTardor!I12:I215");
➢ TITti from SheetRead(excel,"AssignaturesTardor!G12:G215");
➢ ESPti from SheetRead(excel,"AssignaturesTardor!L12:L215");
```

```
➢ labtt from SheetRead(excel,"Diasemana!D2:D22");
➢ OPTti from SheetRead(excel,"AssignaturesTardor!P12:P215");
➢ DEPti from SheetRead(excel,"AssignaturesTardor!N12:N215");
➢ GRANDEti from SheetRead(excel,"AssignaturesTardor!R12:R215");
➢ DIFti from SheetRead(excel,"AssignaturesTardor!Q12:Q215");
➢
➢ Aulat to SheetWrite(excel,"MatricesSolucionTardor!B4:AI207");
➢ Aulap to SheetWrite(excel,"MatricesSolucionPrimavera!B4:AI173");
➢ Franjat to SheetWrite(excel,"MatricesSolucionTardor!AJ4:AJ207");
➢ Franjap to SheetWrite(excel,"MatricesSolucionPrimavera!AJ4:AJ173");
➢ Diat to SheetWrite(excel,"MatricesSolucionTardor!AK4:AK207");
➢ Diap to SheetWrite(excel,"MatricesSolucionPrimavera!AK4:AK173");
➢
➢
➢ aulas to SheetWrite(excel,"FuncionObjetivo!B3");
➢ preferenciaMASTERS to SheetWrite(excel,"FuncionObjetivo!C3");
➢ preferenciaGRAUS to SheetWrite(excel,"FuncionObjetivo!D3");
➢ zonas to SheetWrite(excel,"FuncionObjetivo!E3");
➢ undialibre to SheetWrite(excel,"FuncionObjetivo!F3");
➢ dosdiaslibres to SheetWrite(excel,"FuncionObjetivo!G3");
➢ departamentos to SheetWrite(excel,"FuncionObjetivo!H3");
➢ cuatrimestres to SheetWrite(excel,"FuncionObjetivo!I3");

➢ separacion to SheetWrite(excel,"FuncionObjetivo!J3");
```

En este apartado también se incluye un breve manual del usuario para explicar las funciones básicas del fichero Excel entregado con el programa, cómo utilizarlo y como leer la solución de éste.

Para empezar, se expondrá el archivo Excel, sus diferentes pestañas y las que deben ser de utilidad para el usuario.

La primera hoja llamada FuncionObjetivo no debe tocarse bajo ningún concepto, ya que es la encargada de la calibración del programa.

La segunda hoja, con el nombre de Assignatures, es la que el usuario deberá modificar para adaptar el problema a la fecha actual. En esta pestaña el usuario deberá cambiar la celda B5 encargada de indicar a fecha inicial del periodo de exámenes. Esta ceda está situada al lado de la celda 'data inicial'. En esta hoja el usuario deberá comprobar también que la celda H3 tenga la fecha correspondiente al día de San Juan del año correspondiente.

Las siguientes dos hoja ('AssignaturesTardor' y 'AssignaturesPrimavera') presentan las diferentes asignaturas que tiene cada periodo. En caso de querer añadir una asignatura al problema, se deberá añadir según la clasificación presentada, es decir, insertándola en la titulación correcta, cuatrimestre correspondiente y, en caso necesario, especialización correspondiente siguiendo la lógica del Excel presentado. A continuación se presentará una asignatura de ejemplo y se aclarará qué se tiene que rellenar en cada campo:

Assignatura (num)					MATi	TITi		Qi		ESP	ESPI	
Num	Codi	Nom	ECTS	OPT/OBL	Matriculats	Titulacion (num)	Titulacion (nom)	Quatri (1)	Quatri (2)	Especialitzacio (nom)	Especialitzacio (num)	Prim/ Tardor

DEPi		OPTi	DIFi	GRANDEi
Departament (num)	Departament (nom)	Opt(1)/Obl(0)	Dificultat (0 facil, 1 dificil)	Asignatura grande (1 si, 0 no)

A parte de los campos que ya indican bien su nombre como rellenarlos, existen algunos que no es tan intuitivo descifrarlo.

La casilla Quatri(2) no es necesario rellenarla ya que sólo es útil para la primera asignatura. La celda Quatri(1) debe rellenarse con el cuatrimestre al que corresponde esa asignatura.

La casilla 'Especialització (num)' debe ser rellenada con un número del 1 al 11, observando el resto de asignaturas con especialidades determinadas es fácil intuir a cual pertenecerá, sin embargo solo aquellas asignaturas pertenecientes al MUEI o al SCTM pueden catalogarse con alguna especialización en caso de no ser troncales.

La celda correspondiente a 'Departament (num)' debe rellenarse con el número que le corresponde, no el código (el cual va en la casilla 'Departament (nom)'). Para poder saber qué número le corresponde se debe buscar el código dentro de esta misma pestaña y ver qué número le corresponde.

La casilla OPTi se rellena con 1 en caso de que la asignatura sea optativa y con un 0 en caso contrario.

La celda 'Dificultat' se rellena con un 1 en caso de considerarse esa asignatura como difícil por parte del alumnado. Las asignaturas pertenecientes a los masters tendrán el valor 0 por defecto en esta campo.

La última celda, 'Asignatura Grande', se rellena de forma automática (comprobar por si acaso). Adquiere el valor 1 si el número de matriculados de la asignatura es mayor a 100, y 0 en caso contrario.

Además de estas hojas, también es importante remarcar la importancia de la hoja llamada 'Aules'. En esta se presentan las diferentes aulas que tiene la universidad disponibles para realizar exámenes. Para añadir un aula se añadiría al final rellenando los diferentes campos, los cuales salen ya bien explicados en el Excel.

Otra hoja informativa es la llamada 'Legenda', a cual presenta información muy valiosa para rellenar algunos campos de las asignaturas a añadir, como la titulación y la especialidad.

El resto de hojas, a parte de la hoja 'solución', son simplemente para el cálculo interno del programa.

Además de explicar cómo rellenar y editar el archivo Excel, también es importante saber leer los resultados pertinentes. Para hacer esto, se debe ir a la hoja 'solución'. En esta hoja veremos los siguientes campos:

Numero de asignatura	Nombre Asignatura	Día	Hora/Franja	Aula/s

Se puede ver pues el número de la asignatura, su nombre, el día en el cual se realizará el examen final, a qué hora empezará y qué aulas tiene asignadas. De esta manera se presentan los resultados de la optimización, una solución muy visual para el usuario.

Tras saber cómo editar el Excel para adaptarlo al nuevo curso universitario y añadiendo nuevas asignaturas, es momento de enseñar qué hay que modificar del programa. Lo único que hay que modificar es el archivo .dat.

Las líneas de código 31 a 34 y 36 a 39 deben modificarse. El último valor que aparece en cada línea (en el programa entregado es el 181) debe cambiarse. Este valor corresponde a la última fila de la hoja del Excel 'AssignaturesPrimavera'. En caso de añadir una asignatura a primavera este valor se cambiaría por el 182, por ejemplo. Lo mismo pasa con la líneas de código 54, 56 y 58, las cuales se asocian a la hoja 'MatricesSolucionPrimavera'. Por defecto el valor que tiene en el programa entregado es el 173, si se añadiera una asignatura a primavera este valor debería substituirse por 174.

Es el mismo caso para las asignaturas de otoño. En este caso se deberían cambiar las líneas de código 43 a 46 y 48 a 51, cuyo último valor corresponde a la última fila de la hoja del Excel 'AssignaturesTardor'. Como en el caso anterior, si se añade una asignatura a otoño el valor aumenta en uno. También se debería realizar un cambio en las líneas de código 53, 55 y 57, las cuales se asocian a la hoja 'MatricesSolucionTardor'. Se aumentará en uno el último valor si se añade una asignatura a otoño.