



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE HERRAMIENTAS DE
OPTIMIZACIÓN PARA LA PROGRAMACIÓN DE
EXÁMENES EN LA ETSII

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Organización Industrial

AUTOR/A: Tarín Ríos, Elena

Tutor/a: Alemany Díaz, María del Mar

Cotutor/a: Esteso Alvarez, Ana

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN ORGANIZACIÓN INDUSTRIAL

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE HERRAMIENTAS DE OPTIMIZACIÓN PARA LA PROGRAMACIÓN DE EXÁMENES EN LA ETSII

AUTOR: ELENA TARÍN RÍOS

TUTORA: M^a del MAR ALEMANY DIAZ

COTUTORA: ANA ESTESO ÁLVAREZ

AGRADECIMIENTOS

Aprovecho este espacio para agradecer a mis familiares y amigos, por el apoyo recibido durante la elaboración de este proyecto.

Especialmente agradezco a mis tutoras, Mareva y Ana, por su inmensa ayuda y dedicación.

RESUMEN

En el presente TFG se desarrollan herramientas de optimización como soporte a la toma de decisiones en la ordenación académica de organizaciones universitarias con un volumen importante de titulaciones y asignaturas que comparten recursos comunes.

El TFG se deriva de las oportunidades de mejora detectadas en los actuales procesos de asignación de fechas y aulas a los exámenes parciales, finales y extraordinarios en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII) de la UPV. Se trata de problemas complejos de asignación de recursos a actividades que requiere de un elevado tiempo de recursos de gestión y para los que los modelos de programación matemática resultan adecuados.

Es por ello que, con objeto de conseguir soluciones óptimas y reducir el tiempo de gestión invertido en los anteriores procesos, se propone el diseño e implementación en Python de dos modelos de programación lineal entera mixta: uno para la programación de fechas de exámenes extraordinarios y otro para la asignación de exámenes parciales y finales a fechas y aulas. Ambos modelos presentan diversas variantes que se diferencian en los objetivos perseguidos y las restricciones activadas, lo que permite que el/la decisor/a genere diversas soluciones, seleccionando finalmente aquella que mejor se adapte a sus preferencias en cada momento.

Una vez formulados, se procede a la validación de los modelos para posteriormente resolverlos con datos reales de la ETSII. Se analizan también las diferentes soluciones obtenidas, así como la eficiencia computacional. Finalmente, se puede afirmar que se han diseñado dos herramientas capaces de generar soluciones óptimas para la problemática objeto, tanto para los exámenes extraordinarios como ordinarios.

Palabras Clave: Optimización; Modelos Matemáticos; Programación de Exámenes; Universidad; ESTII.

RESUM

En el present TFG es desenvolupen eines d'optimització com a suport a la presa de decisions en l'ordenació acadèmica d'organitzacions universitàries amb un volum important de titulacions i assignatures que comparteixen recursos comuns.

El TFG es deriva de les oportunitats de millora detectades en els actuals processos d'assignació de dates i aules als exàmens parcials, finals i extraordinaris en l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial (ETSEI). Es tracta de problemes complexos d'assignació de recursos a activitats que requereix d'un elevat temps de recursos de gestió i per als quals els models de programació matemàtica resulten adequats.

És per això que, a fi d'aconseguir solucions òptimes i reduir el temps de gestió invertit en els anteriors processos, es proposa el disseny i implementació en *Python de dos models de programació matemàtica lineal sencera mixta: un per a la programació de dates d'exàmens extraordinaris i un altre per a l'assignació d'exàmens parcials i finals a dates i aules. Tots dos models presenten diverses variants que es diferencien en els objectius perseguits i les restriccions activades, la qual cosa permet que el/la *decisor/a genere diverses solucions, seleccionant finalment aquella que millor s'adapte a les seues preferències a cada moment.

Una vegada formulats, es procedeix a la validació dels models per a posteriorment resoldre'ls amb dades reals de l'ETSEI. S'analitzen també les diferents solucions obtingudes, així com l'eficiència computacional. Finalment, es pot afirmar que s'han dissenyat dues eines capaces de generar solucions òptimes per a la problemàtica objecte, tant per als exàmens extraordinaris com ordinaris.

Paraules Clau: Optimització; Models Matemàtics; Programació d'Exàmens; Universitat; ESTII.

ABSTRACT

This TFG develops optimisation tools to support decision-making in the academic organisation of university organisations with a large number of degrees and subjects that share common resources.

The TFG is derived from the opportunities for improvement detected in the current processes of assigning dates and classrooms for mid-term, final and extraordinary exams in the School of Industrial Engineering (ETSII). These are complex problems of assigning resources to activities that require a high level of management resources and for which mathematical programming models are suitable.

For this reason, in order to achieve optimal solutions and reduce the management time invested in the above processes, we propose the design and implementation in Python of two mixed integer linear mathematical programming models: one model for the scheduling of dates of extraordinary exams and another for the assignment of mid-term and final exams to dates and classrooms. Both models have several variants that differ in the objectives pursued and the constraints activated, allowing the decision-maker to generate several solutions, finally selecting the one that best suits his/her preferences at any given time.

Once the models have been formulated, they are validated and then solved with real data from the ETSII. The different solutions obtained are also analysed, as well as the computational efficiency. Finally, it can be stated that two tools have been designed capable of generating optimal solutions for the problem in question, both for the extraordinary and ordinary exams.

Keywords: Optimization; Mathematical Models; Exams programming; University; ETSII.

CONTENIDO

1. Memoria
2. Anexos

MEMORIA

ÍNDICE DE LA MEMORIA

Contenido

Índice de figuras	12
Índice de tablas	12
1. OBJETO, MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN	14
1.1. Objeto.....	14
1.2. Motivación	15
1.3. Justificación	15
1.3.1. Justificación profesional.....	16
1.3.2. Justificación académica	16
1.4. Estructura del TFG y vinculación con las Competencias Transversales UPV (CTs-UPV) ..	16
2. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	20
2.1. Descripción del contexto: la ETSII	20
2.2. Descripción de la problemática.....	21
2.2.1. Exámenes extraordinarios.....	22
2.2.2. Exámenes ordinarios	24
2.3. Propuesta de solución.....	25
2.4. Consideraciones finales: Impacto en la sostenibilidad	27
3. ANTECEDENTES	28
3.1. Introducción	28
3.2. Programación Matemática.....	28
3.3. Revisión de modelos de programación matemática para la definición de calendario de exámenes.	30
3.3.1. Descripción de la metodología de revisión	30
3.3.2. Definición del alcance de la revisión	31
3.3.3. Recolección del material	31
3.3.4. Selección de categorías y evaluación del material.....	33
3.3.5. Conclusiones.	41
4. HERRAMIENTA DE AYUDA A LA TOMA DE DECISIONES PARA LA PROGRAMACIÓN DE EXÁMENES EXTRAORDINARIOS.....	42
4.1. Introducción	42
4.2. Descripción del problema	42
4.3. Modelo de PLEM para la programación de exámenes extraordinarios.....	43

4.3.1. Nomenclatura.....	43
4.3.2. Funciones Objetivo.....	44
4.3.3. Restricciones	45
4.4. Arquitectura de la herramienta de optimización para la programación de exámenes extraordinarios	49
4.5. Aplicación a un caso real: análisis de resultados.	50
4.5.1. Descripción de los datos de entrada	51
4.5.2. Definición de escenarios	52
4.5.3. Análisis de resultados.....	53
4.5.4. Eficiencia computacional.....	61
4.6. Consideraciones finales.....	61
5. HERRAMIENTA DE AYUDA A LA TOMA DE DECISIONES PARA LA PROGRAMACIÓN DE EXÁMENES ORDINARIOS	63
5.1. Introducción	63
5.2. Descripción del problema	63
5.3. Modelo de PLEM para la programación de exámenes ordinarios	64
5.3.1. Nomenclatura.....	64
5.3.2. Funciones Objetivo.....	66
5.3.3. Restricciones	67
5.4. Arquitectura de la herramienta de optimización para la programación de exámenes ordinarios	72
5.5. Aplicación a un caso real: análisis de resultados.	74
5.5.1. Descripción de los datos de entrada	74
5.5.2. Definición de escenarios	75
5.5.3. Análisis de resultados.....	76
5.5.4. Eficiencia computacional.....	80
5.6. Consideraciones finales.....	81
6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE ACTUACIÓN	83
7. PRESUPUESTO	86
7.1 Introducción	86
7.2 Contenido del presupuesto	86
7.2.1. Descripción de la problemática.....	86
7.2.2. Antecedentes	87
7.2.3. Diseño, implementación y aplicación a un caso real de las herramientas de optimización.....	87
7.2.4. Redacción y preparación del proyecto.....	88
7.2.5. Resumen.....	88

8. BIBLOGRAFÍA 91

Índice de figuras

Figura 1. Competencias transversales trabajadas en los capítulos y relaciones entre ellos (Fuente: elaboración propia).	19
Figura 2. Plano de los edificios gestionados por la ETSII (Fuente: adaptado de https://www.etsii.upv.es/).....	21
Figura 3. Diagrama de factores necesarios para el modelado (Fuente: elaboración propia). 21	
Figura 4. Estructura de examinación en los grados de la ETSII (Fuente: elaboración propia).25	
Figura 5: Descripción de la metodología de revisión de literatura empleada (Fuente: elaboración propia).	31
Figura 6. Revisión y selección de fuentes bibliográficas (Fuente: elaboración propia).	32
Figura 7. Años de publicación de los artículos analizados (Fuente: elaboración propia).	33
Figura 8. Taxonomía para el análisis de los artículos (Fuente: elaboración propia).	34
Figura 9. Arquitectura técnica de la herramienta de optimización para la programación de exámenes extraordinarios. (Fuente: elaboración propia).	49
Figura 10. Número de estudiantes que solicitan el examen de cada asignatura (Fuente: elaboración propia).....	51
Figura 11. Definición de Escenarios (Fuente: elaboración propia).	53
Figura 12. Arquitectura técnica de la herramienta de optimización para la programación de exámenes ordinarios. (Fuente: elaboración propia).	73
Figura 13. Escenarios de ejecución del segundo modelo (Fuente: elaboración propia).	76

Índice de tablas

Tabla 1: Clasificación inicial de los estudios analizados (Fuente: elaboración propia).	37
Tabla 2. Comparación de los estudios con el modelo de exámenes extraordinarios propuesto (Fuente: elaboración propia).	39
Tabla 3. Comparación de los estudios con el modelo de exámenes ordinarios propuesto (Fuente: elaboración propia).	39
Tabla 4. Descripción de los índices del modelo matemático extraordinario. (Fuente: elaboración propia).....	43
Tabla 5. Descripción de los parámetros del modelo matemático extraordinario. (Fuente: elaboración propia).....	43
Tabla 6. Descripción de las variables de decisión del modelo matemático extraordinario. (Fuente: elaboración propia).....	44
Tabla 7. Asignación de fechas a asignaturas para el caso 1-TIT (Fuente: elaboración propia).	55
Tabla 8. Asignación de fechas a asignaturas para el caso 2-TIT (Fuente: elaboración propia).	56

Tabla 9. Asignación de fechas a asignaturas para el caso 3-TIT (Fuente: elaboración propia).	58
Tabla 10. Asignación de fechas a asignaturas para el caso 1-GITI (Fuente: elaboración propia).	59
Tabla 11. Asignación de fechas a asignaturas para el caso 2-GITI (Fuente: elaboración propia).	59
Tabla 12. Asignación de fechas a asignaturas para el caso 3-GITI (Fuente: elaboración propia).	60
Tabla 13. Comparativa de la eficiencia de la herramienta en cada caso planteado (Fuente: elaboración propia).	61
Tabla 14. Índices del modelo matemático ordinario (Fuente: elaboración propia).	64
Tabla 15: Conjuntos de índices del modelo matemático ordinario (Fuente: elaboración propia).	65
Tabla 16. Parámetros del modelo matemático ordinario (Fuente: elaboración propia).	65
Tabla 17. Variables de decisión del modelo matemático ordinario (Fuente: elaboración propia).	66
Tabla 18. Correspondencia entre cursos de cada titulación con los cursos para la programación (Fuente: elaboración propia).	75
Tabla 19. Resumen de las soluciones obtenidas en todos los escenarios planteados en el modelo de exámenes ordinarios (Fuente: elaboración propia).	77
Tabla 20: Resultados de la eficiencia computacional de los escenarios del modelo ordinario (Fuente: elaboración propia).	80
Tabla 21. Presupuesto asociado a la descripción de la problemática (Fuente: elaboración propia).	86
Tabla 22. Presupuesto asociado a los Antecedentes (Fuente: elaboración propia).	87
Tabla 23. Presupuesto asociado al diseño, implementación y aplicación a un caso real de las herramientas de optimización (Fuente: elaboración propia).	88
Tabla 24. Presupuesto asociado a la redacción y preparación del proyecto (Fuente: elaboración propia).	88
Tabla 25. Resumen del presupuesto global de la elaboración del proyecto (Fuente: elaboración propia).	89

1. OBJETO, MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

1.1. Objeto

Mediante el presente Trabajo Fin de Grado (TFG) se diseñan e implementan dos herramientas de optimización como soporte a la definición de calendarios de exámenes universitarios con objeto de mejorar los procesos de toma de decisión que actualmente se llevan a cabo en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII) de la UPV.

La primera de ellas está destinada a proporcionar la programación de los exámenes extraordinarios de manera que se obtenga, para un periodo predeterminado, las fechas de realización de dichos exámenes, de forma que los estudiantes que cumplan las condiciones necesarias puedan presentarse a todas las asignaturas solicitadas asegurando que no se producen solapes de fechas entre las mismas. Dado que el número de estudiantes que finalmente realiza el examen extraordinario de una misma asignatura no suele ser muy elevado, no se contempla en este primer modelo la asignación de exámenes a aulas, por no considerarse un recurso crítico ya que son los propios profesores los que reservan el espacio.

A través de la segunda herramienta se programa el calendario de exámenes ordinarios, donde además de asignar la realización de exámenes de asignaturas a periodos temporales se considerarán ciertos recursos limitados como son las aulas y los profesores disponibles para la vigilancia de estos.

Ambas propuestas se pueden enmarcar dentro de la problemática de asignación de recursos limitados a actividades, estrechamente vinculada al ámbito de los Métodos Cuantitativos de Organización Industrial y a la Programación de Operaciones. Es por ello que para resolver ambos problemas se plantean dos modelos de Programación Lineal Entera-Mixta, cada uno con distintas funciones objetivos y restricciones, algunas de las cuales pueden ser activadas de manera independiente previa selección por el decisor. De esta manera, se generan soluciones alternativas entre las que poder elegir la más satisfactoria a implementar según las circunstancias de cada momento.

Los modelos de programación matemática han sido implementados en Python 6.4.1 y el solver utilizado para su resolución ha sido Gurobi 9.5.1 con la interfaz de programación **JupyterLab 3.4.2**. Puesto que los datos disponibles se han proporcionado en MS Excel siendo necesario que la solución estuviera también en este formato, ha sido necesario crear una herramienta de preprocesado de los datos y posprocesado de la solución en Excel mediante Visual Basic.

Tras su implementación se ha llevado a cabo la validación de éstos a través de la definición de diversos escenarios utilizando datos reales de la ETSII de la UPV.

Las soluciones proporcionadas por ambas herramientas proporcionan resultados óptimos asegurando que se cumplen las distintas restricciones con un ahorro en tiempo de gestión sustancial. Se comprueba también que especialmente para el segundo caso, el tiempo de solución puede verse afectado de manera importante por la función objetivo planteada.

1.2. Motivación

La problemática abordada en este TFG deriva de la complejidad de asignar exámenes a periodos temporales y aulas con el consiguiente consumo de profesorado para su vigilancia. Dependiendo de si los exámenes pertenecen a la convocatoria ordinaria o extraordinaria, las limitaciones que se deben respetar y los objetivos a alcanzar son diferentes. Es por este motivo por el que se plantea la necesidad de dos herramientas de optimización diferenciadas.

Partiendo de esta base, en los últimos años se han llevado a cabo diversos estudios que proponen soluciones a una problemática estrechamente vinculada, conocida como ETP (Educational Timetabling Problem). Sin embargo, tras analizar la literatura publicada más significativa en torno al tema, se concluye que no se ha encontrado ningún modelo que resuelva exactamente las problemáticas planteadas y que contemple simultáneamente todo el conjunto de restricciones consideradas. Por este motivo, se propone el diseño de dos herramientas de ayuda a la toma de decisiones para dar soporte a dos problemáticas reales en el marco de la programación de exámenes en la ETSII-UPV.

La ETSII se caracteriza por impartir cinco titulaciones de grado y ocho titulaciones de máster. Cada grado contempla un total de 240 ECTS, divididos en cuatro cursos y cada uno de ellos dividido, a su vez, en dos cuatrimestres, A y B. Cada asignatura dentro de estos cuatrimestres cuenta con tres periodos diferenciados de exámenes: exámenes parciales de cuatrimestre A, exámenes parciales de cuatrimestre B y exámenes finales. Además, la programación de exámenes comparte unos recursos muy escasos para la ETSII, como son las aulas. Dado el gran volumen de asignaturas, el limitado intervalo temporal para programar los exámenes que, además son coincidentes para muchos títulos, la escasez de recursos y la repetitividad del proceso, se hace necesario dotar de soluciones que permitan optimizar los objetivos planteados contribuyendo en diferente grado a los **tres pilares de la sostenibilidad**:

1. **Dimensión social:** se pretende cubrir las necesidades de evaluación del alumnado de la manera más satisfactoria, de forma que se programe un calendario de exámenes que permita obtener un mayor rendimiento académico a éste y facilitar la corrección por parte del profesorado teniendo en cuenta los estudiantes matriculados en las asignaturas.
2. **Dimensión económica:** utilizar la mínima inversión en recursos, tanto de gestión (tiempo necesario para resolver el problema) como de ejecución (aulas, profesorado, etc.)
3. **Dimensión medioambiental:** indirectamente, la utilización de menos recursos como aulas supondrá un menor consumo de energía, contribuyendo no sólo a la dimensión económica sino también tangencialmente a la dimensión medioambiental.

1.3. Justificación

Una vez expresada la motivación del TFG, en relación con su justificación se puede considerar en dos ámbitos principales: profesional y académico. A continuación, se exponen los motivos de cada ámbito más detalladamente.

1.3.1. Justificación profesional

En primer lugar, la justificación profesional de este proyecto reside en proveer con una solución óptima a dos problemas reales vinculados al ámbito de la Ingeniería de Organización Industrial, existentes en Escuelas de diferentes universidades, entre ellas la Universidad Politécnica de Valencia (UPV).

Si bien es cierto que existen elementos comunes a la hora de programar los exámenes académicos, la normativa que los regula, las limitaciones de recursos y la forma de ordenar la docencia y la evaluación, hace que cada problema tenga sus particularidades específicas, como es el caso de la ETSII en la UPV.

En este contexto, la justificación profesional del presente TFG consiste en mejorar un proceso clave dentro de la ordenación académica de los títulos de grado y máster de la Escuelas como es el proceso de realización de exámenes parciales, finales y extraordinarios. La mejora se espera provenga no sólo de la solución obtenida sino también de la inversión en los recursos de gestión necesarios para definir dicha solución. Así se espera, un impacto positivo tanto para los gestores académicos como profesores y estudiantes de la ETSII de la UPV. Adicionalmente, dada las similitudes entre Escuelas de la UPV, cabría la posibilidad de extender a éstas el desarrollo realizado.

1.3.2. Justificación académica

Por lo que respecta a la justificación desde el punto de vista académico, se aborda una problemática propia del ámbito de la Ingeniería de Organización que ha requerido no sólo aplicar conocimientos, habilidades y competencias adquiridas en diversas asignaturas del Grado de Ingeniería en Organización Industrial, sino también ha sido necesaria ampliarlas, poniendo en práctica fuertemente la competencia de aprendizaje permanente.

Entre las asignaturas clave para el desarrollo de este TFG se encuentran la de Métodos Cuantitativos para la Organización Industrial, sí como competencias adquiridas en asignaturas como Matemáticas I y II, Informática, Programación y Control de Producción y Operaciones y Proyectos. Por último, cabe resaltar el esfuerzo adicional realizado de aprender a programar en un nuevo lenguaje que no se estudia en la carrera, como es el lenguaje *Python* de total actualidad.

Relacionado también con la justificación académica, en el siguiente apartado se aprovecha la descripción de la estructura del TFG para vincular cada capítulo del mismo con las Competencias Transversales (CTs) de la UPV que se han trabajado en cada uno de ellos.

1.4. Estructura del TFG y vinculación con las Competencias Transversales UPV (CTs-UPV)

El presente TFG está compuesto por un total de 7 capítulos. El primero de ellos es en el que se ubica el actual subapartado, tratándose del primer capítulo “1. OBJETO, MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN”. Tras este primer capítulo de carácter introductorio, en el capítulo dos “2. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA” se explica de manera más detallada la problemática

abordada en este TFG y un resumen del contexto en el que se aplican los modelos, siendo éste la ETSII. En el tercer capítulo “3. ANTECEDENTES” se realiza un análisis de la literatura publicada en los últimos años destinada a la problemática de definición de calendarios de exámenes y clases. El motivo principal consiste en identificar estudios similares y ver qué características se contemplan en cada uno, con el fin de ver el planteamiento realizado y los métodos de resolución propuestos. Los capítulos 4 y 5 “4. HERRAMIENTA DE AYUDA A LA TOMA DE DECISIONES PARA LA PROGRAMACIÓN DE EXÁMENES EXTRAORDINARIOS” y “5. HERRAMIENTA DE AYUDA A LA TOMA DE DECISIONES PARA LA PROGRAMACIÓN DE EXÁMENES ORDINARIOS”, contienen la presentación del modelo destinado a los exámenes extraordinarios y ordinarios, respectivamente. Incluyen una descripción del modelo, la arquitectura técnica empleada y la posterior aplicación a un caso real con datos pertenecientes a la ETSII. Una vez presentadas las dos herramientas propuestas, se procede, en el capítulo sexto “6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE ACTUACIÓN” las conclusiones obtenidas tras la finalización del proyecto desde una visión subjetiva, así como posibles futuras líneas de actuación para proseguir en la investigación de esta problemática y detectar puntos de mejora. El séptimo y último capítulo “7. BIBLOGRAFÍA” incluye todas las fuentes de información empleadas a lo largo del trabajo.

Para terminar con este capítulo, se detallan las distintas competencias transversales adquiridas y potenciadas a lo largo del desarrollo del TFG (Universidad Politécnica de Valencia, 2022):

- CT-1. Comprensión e integración: a lo largo de todo el TFG se desarrollan habilidades de comprensión, a la hora de extraer la información de otros estudios y fuentes bibliográficas, en el funcionamiento de los procesos de toma de decisiones, el análisis de resultados, y la integración de los diferentes capítulos mediante un hilo conductor.
- CT-2. Aplicación y pensamiento práctico: dada la complejidad de la problemática, es necesario desarrollar un plan de acciones concretas, que sean coherentes para el diseño de las herramientas propuestas, analizando de manera crítica el entorno y argumentando los pasos que se van realizando a lo largo de todo el TFG.
- CT-3. Análisis y resolución de problemas: principalmente en la descripción de la problemática y su análisis, así como en el desarrollo de los modelos matemáticos y su validación.
- CT-4. Innovación, creatividad y emprendimiento: al plantear dos modelos con un conjunto de objetivos y restricciones que no han sido definidos con anterioridad, se trabaja mucho la innovación y la creatividad en el diseño de los modelos y la definición de los escenarios a plantear.
- CT-5. Diseño y proyecto: desde el inicio en el planteamiento del problema hasta el desarrollo y obtención de las herramientas de resolución se requiere el diseño planificado de las fases que componen este trabajo final de grado.
- CT-7. Responsabilidad ética, medioambiental y profesional: el cumplimiento de la normativa impuesta por la ETSII para el desarrollo y presentación del TFG se vincula con la responsabilidad ética. También destaca la responsabilidad ética y profesional a la hora de referenciar todas las fuentes bibliográficas siguiendo el estilo APA. Además, en el

diseño de las herramientas desarrolladas se contempla las diferentes dimensiones de la sostenibilidad.

- CT-8. Comunicación efectiva: la redacción del TFG, el uso de figuras, tablas y esquemas pretende facilitar la comunicación al lector y proveer un mejor entendimiento del contenido persiguiendo así una comunicación efectiva. También se emplea un lenguaje con un nivel acorde al requerido en los documentos de este tipo.
- CT-9. Pensamiento crítico: Esta competencia se ha puesto en práctica en la identificación de oportunidades de mejora en los procesos de toma de decisiones actuales, en la argumentación y justificación de las decisiones que se toman a lo largo del trabajo, así como en el análisis e interpretación de los resultados obtenidos en la aplicación de las herramientas diseñadas.
- CT-10. Conocimiento de problemas contemporáneos: en la revisión de la literatura publicada en los últimos años acerca de la problemática de diseño de calendarios de exámenes universitarios se ha podido conocer los últimos avances e identificar la laguna de la herramienta propuesta.
- CT-11. Aprendizaje permanente: esta competencia se ha aplicado, desde la elección de la temática del TFG que ha requerido el aprendizaje del lenguaje de programación Python y el uso de herramientas informáticas para la elaboración de los modelos matemáticos, así como la revisión de artículos en torno al tema.
- CT-12. Planificación y gestión del tiempo: con el fin de cumplir con los plazos establecidos de propuesta de la temática, revisiones continuas y presentación del TFG para su defensa, es necesario una correcta gestión del tiempo.
- CT-13. Instrumental específico: se han empleado programas y softwares específicos para el diseño y resolución de los modelos matemáticos. Estas instrumentales se emplean con frecuencia en el ámbito profesional de un Ingeniero de Organización Industrial.

A continuación, en la Figura 1 se puede observar en qué capítulo se han aplicado cada una de estas competencias y las relaciones entre los diferentes capítulos planteados.

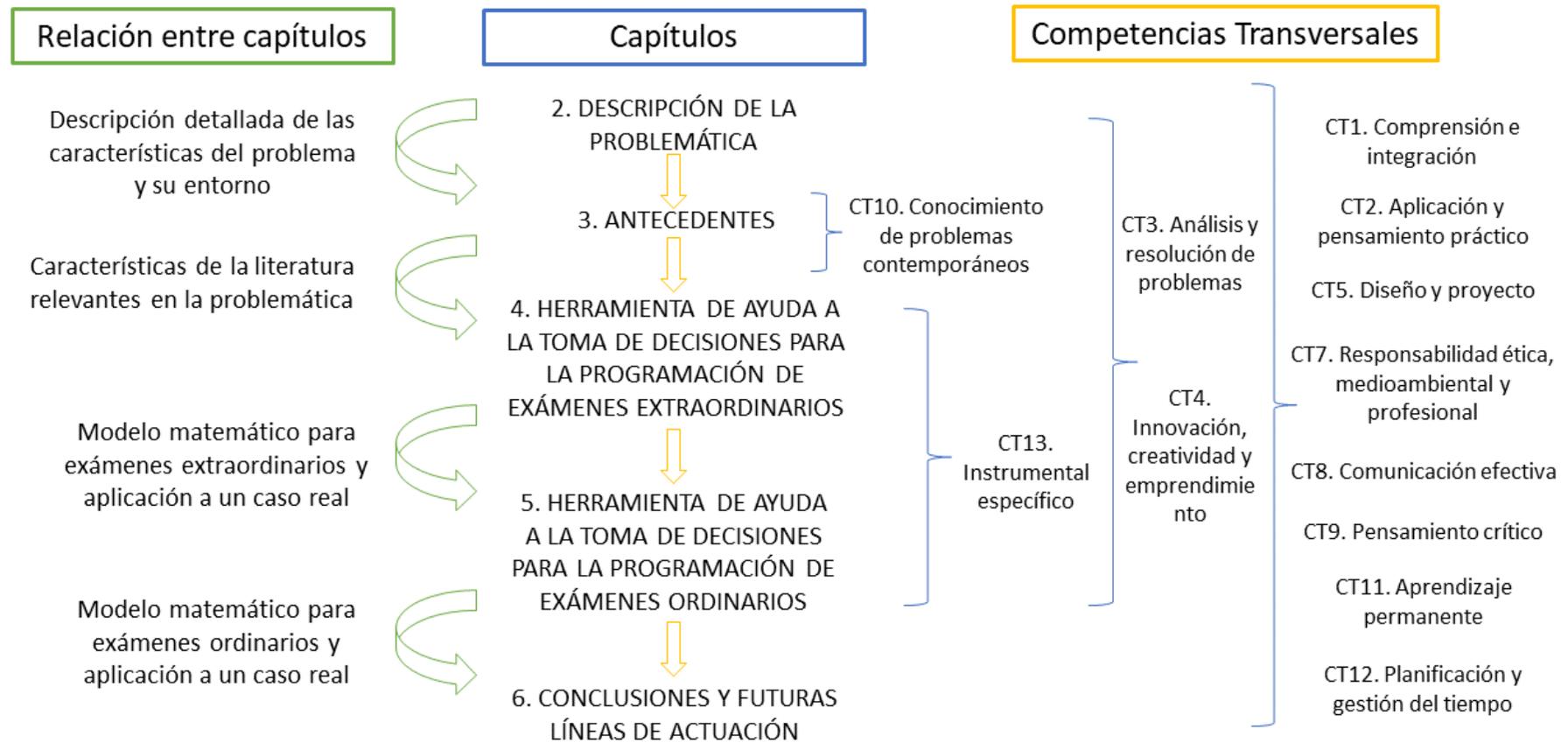


Figura 1. Competencias transversales trabajadas en los capítulos y relaciones entre ellos (Fuente: elaboración propia).

2. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

2.1. Descripción del contexto: la ETSII

La Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial (ETSII) es una de las 9 escuelas técnicas superiores pertenecientes a la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). La ETSII fue creada en el año 1968, suponiendo un gran apoyo tanto para la implantación de empresas industriales en la Comunidad Valenciana, como para el ámbito educativo, formando a miles de titulados que ejercen hoy en día la profesión ((UPV), 2022). Se trata de una institución perteneciente al servicio público, encargada tanto de la gestión administrativa como de la organización de las siguientes titulaciones ((UPV), 2022):

- Grado en Ingeniería Biomédica (GIB)
- Grado en Ingeniería de la Energía (GIE)
- Grado en Ingeniero de Organización Industrial (GIOI)
- Grado en Ingeniería Química (GIQ)
- Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales (GITI)
- Máster Universitario en Ingeniería Avanzada de Producción, Logística y Cadena de Suministro
- Máster Universitario en Ingeniería Biomédica
- Máster Universitario en Construcción e Instalaciones Industriales
- Máster en Dirección y Gestión de Proyectos
- Máster Universitario en Ingeniería Industrial
- Máster Universitario en Ingeniería Química
- Máster Universitario en Tecnología Energética para el Desarrollo Sostenible
- Máster Universitario en Seguridad Nuclear y Protección Radiológica

Cada título presenta una oferta diferente de plazas para estudiantes. Así, GITI es el grado con mayor número de plazas disponibles, con alrededor de 300 estudiantes en total. GIQ y GIOI cuentan con 80 plazas cada una, y finalmente, hay 75 plazas destinadas a los grados de GIE y GIB, respectivamente. Por lo tanto, se deben planificar los exámenes para aproximadamente 600 estudiantes por curso de grado, con un total para los 4 grados de 2400 estudiantes. A esto hay que sumar los estudiantes del Máster Ingeniero Industrial, el más numeroso con unos 300 estudiantes también por curso y el resto de los másteres, lo que hace que el número de estudiantes matriculados en la ETSII sea alrededor de 4000. Finalmente habría que considerar a los más de 700 profesores de 26 Departamentos impartiendo docencia en el Centro.

La ETSII se encuentra dentro del Campus de Vera de la UPV, ubicado en la Avda. Tarongers de Valencia. En este, la escuela cuenta con 46.000 metros cuadrados divididos en 14 edificios, como se muestra en la Figura 2. En ellos, hay disponibles un total de 42 aulas básicas de teoría, 12 aulas informáticas y 6 salas de presentaciones y exposiciones. Son alrededor de 4.000 estudiantes, divididos en los cinco grados y ocho másteres, los que disfrutan de estas instalaciones, junto con más de 700 profesores pertenecientes a diferentes departamentos de la universidad. En la ETSII hay un elevado interés por el desarrollo de actividades con un impacto positivo directo en la sociedad. Hay un continuo desarrollo de proyectos estratégicos dirigidos

responsable de la vigilancia de los exámenes de las diferentes asignaturas. Para ello es necesario la definición de las fechas de exámenes dentro del periodo establecido en el calendario de la escuela para los primeros y segundos parciales, los finales y por último los exámenes extraordinarios. Estos últimos presentan unas características especiales con respecto a los exámenes ordinarios que hacen necesario el desarrollo de herramientas diferentes.

De mi experiencia como estudiante en esta escuela, en ciertas situaciones se producen solapes de exámenes para algunos estudiantes, o éstos no cuentan con una separación mínima entre dos exámenes consecutivos. Además, también hay situaciones en las que se emplea un número elevado de aulas no siempre contiguas, o bien falta capacidad para albergar a la totalidad de estudiantes matriculados. La rápida e imprecisa planificación también lleva a que los profesores dispongan en ocasiones de un periodo de tiempo muy ajustado para la corrección de exámenes.

2.2.1. Exámenes extraordinarios

La programación de los exámenes extraordinarios debe realizarse considerando los plazos establecidos por el calendario académico de cada curso. Dependiendo de la normativa vigente y del calendario académico, el número de periodos de exámenes extraordinarios puede variar, siendo para el próximo curso de hasta cuatro periodos de exámenes con la nueva normativa. En el calendario académico para cada periodo de exámenes extraordinario viene definido:

- **Periodo de solicitud:** fechas en las que los estudiantes pueden solicitar las asignaturas a cuyos exámenes extraordinarios desean presentarse.
- **Fecha de resolución:** fecha tope en la que el centro informa a los estudiantes si su solicitud ha sido favorable o no en función de si cumplen condiciones.
- **Periodo de exámenes extraordinarios:** fecha inicio y fin dentro de la que se deberán programar los exámenes extraordinarios.
- **Fecha límite de entrega de actas:** fecha tope para que los profesores generen actas extraordinarias.

Previamente al inicio del periodo de solicitud, los estudiantes matriculados de todos los créditos necesarios para terminar sus estudios reciben un correo desde Secretaría de la ETSII informándoles del periodo de solicitud durante el que los estudiantes que cumplan condiciones podrán solicitarla y cómo hacerlo (un formulario). Se indica cuál será el periodo en el que se realizarán los exámenes extraordinarios, sin especificar la fecha concreta para cada asignatura, pues como se verá posteriormente, éstas se definen una vez recibidas todas las solicitudes. Los estudiantes a través de un formulario deberán solicitar la/s asignatura/s a cuyo examen extraordinario desean concurrir de entre las no superadas.

Una vez cerrado el plazo de solicitud, desde Secretaría de la ETSII se procede a comprobar qué **estudiantes** con solicitud **cumplen las condiciones** para concurrir al **acto extraordinario**:

1. Estar matriculado de todos los créditos para finalizar la carrera.
2. Tener pendientes de superar un máximo de 20 créditos en asignaturas de Grado y 10,5 en asignaturas de Máster.
3. Haberse presentado, en alguna ocasión, a los exámenes de las asignaturas solicitadas.

Hechas las anteriores comprobaciones antes de la fecha de resolución, se les informa de si su solicitud ha sido resuelta favorable o desfavorablemente.

De esta manera, una vez realizada la resolución, se dispone de un listado con las asignaturas solicitadas por cada estudiante del que se elabora otro listado que contiene los estudiantes que solicitan realizar el examen extraordinario de cada asignatura.

Con toda esta información ya se está en disposición de plantear las fechas para los exámenes extraordinarios. La principal limitación es el tiempo disponible para definir las fechas de éstos, puesto que hasta que los estudiantes no los solicitan no se conoce ni las asignaturas que van a tener que ser programadas ni el número de estudiantes a examinar en cada una de ellas. Por otro lado, el intervalo de tiempo en el que se deben establecer las fechas también es muy reducido. Esto resulta especialmente importante si se tiene en cuenta que un estudiante puede solicitar hasta 4 asignaturas para examen extraordinario y se debe garantizar la posibilidad de presentarse a todas ellas, evitando solapes entre las mismas. Finalmente, debido al limitado tiempo entre la fecha del examen y la generación de actas, es necesario programar, lo antes posible, los exámenes de asignaturas con más solicitudes de estudiantes, permitiendo así un mayor tiempo de corrección a los profesores. También debe considerarse que existen asignaturas que se imparten de forma transversal en diferentes títulos por lo que examinan a estudiantes de diferentes grados o másteres y que deberían tener el mismo día y hora de examen para garantizar un uso eficiente de los recursos (aulas y profesores).

Actualmente el proceso de definición de fechas de exámenes extraordinarios se realiza de manera heurística utilizando como soporte una herramienta de MS Excel, cuyos datos de entrada provienen de un pretratamiento de los datos obtenidos a través del formulario de solicitud y la resolución de Secretaría que se hace manualmente. Se programan primero los exámenes con más estudiantes y después los que tienen menos estudiantes, intentando minimizar la fecha de realización del último examen, teniendo en cuenta el tema de las asignaturas transversales. Se busca con todo lo anterior, facilitar la corrección por parte de los profesores, de manera que todas las asignaturas dispongan del mayor tiempo posible para corregir los exámenes, priorizando las más solicitadas. Desde el punto de vista de los estudiantes, se comprueba que ningún estudiante tenga dos exámenes el mismo día, para así favorecer su rendimiento académico y las probabilidades de superar todos los exámenes.

En caso de que no se cumplan algunas de las anteriores condiciones, se sigue un proceso iterativo que comienza modificando las fechas de exámenes iniciales pero que, en caso de no encontrar una solución lo suficientemente satisfactoria, puede llegar a relajar algunas de las restricciones blandas hasta lograr una solución que sea lo suficientemente satisfactoria para ser implementada. El procedimiento realizado consume un tiempo importante de gestión que se podría reducir con herramientas más avanzadas. Lo mismo sucede con la calidad de la solución obtenida, que se podría mejorar para obtener soluciones más satisfactorias para estudiantes, profesores y el entorno, motivo por el que el presente TFG propone plantear una herramienta de optimización.

Una vez establecidas las fechas de los exámenes extraordinarios, desde Secretaría de la ETSII se les hace llegar la programación de exámenes a los estudiantes afectados y desde Jefatura de Estudios, a los responsables de las asignaturas involucradas.

2.2.2. Exámenes ordinarios

El **problema de programación de los exámenes ordinarios (parciales y finales)** se trata de un problema complejo de asignación de exámenes de asignaturas a fechas y a aulas. En este caso, en el calendario académico de la ETSII para cada titulación, se establecen las fechas (día y horario de mañana/tarde) de los exámenes ordinarios dentro de un rango preestablecido de fechas para cada uno de los exámenes (parcial 1, parcial 2 y finales) y también las aulas asociadas a estos.

La complejidad se deriva porque es necesario considerar las asignaturas de todas las titulaciones de la ETSII simultáneamente ya que comparten recursos comunes limitados y, en este caso, bastante escasos como son las aulas de la ETSII y los profesores. Además, cada asignatura tiene un número de estudiantes matriculados que potencialmente se podrían presentar a los exámenes, así como un número de profesores limitado impartiendo docencia, disponibles para la vigilancia de los exámenes. Por otro lado, cada aula tiene una capacidad finita de número de estudiantes admisibles, por lo que será necesario asegurar que la capacidad total de todas las aulas reservadas para un examen ordinario de una asignatura es igual o superior a los estudiantes matriculados. Por otro lado, hay asignaturas que suelen recibir estudiantes del programa Erasmus, cuyo número no se conoce con certeza antes de la programación de los exámenes.

Además, es necesario tener en cuenta que un estudiante puede estar a caballo entre varios cursos, por lo que la solución obtenida deberá favorecer que un estudiante en la anterior circunstancia pueda presentarse al máximo número de exámenes posibles. Para ello, las fechas de los exámenes de cursos consecutivos, se alternan entre mañana y tarde. En la Figura 4 se puede observar la alternancia explicada entre los cuatrimestres de cursos consecutivos. Se actúa de la misma manera en el cuatrimestre B y en el resto de los cursos de cada titulación.

También se tiene en cuenta las situaciones en que asignaturas de diferentes titulaciones sean equivalentes, es decir, asignaturas transversales en las que se encuentran matriculados estudiantes de diferentes titulaciones y que se imparten simultáneamente a todos ellos. Los exámenes de dichas asignaturas deberán ser únicos para todos los títulos con objeto de evitar sobrecargar a los profesores.

Otro factor importante que se debe tener presente es la disponibilidad del profesorado para la vigilancia de los exámenes, la cantidad de aulas disponibles y su capacidad, e intentar asegurar la proximidad entre aulas dedicadas a un mismo examen, pues no suele haber capacidad suficiente en una única aula para albergar a todos los estudiantes matriculados.

Actualmente, el proceso consiste en replicar la secuencia de exámenes del curso pasado aplicando una rotación de un día, salvo para los idiomas que se suele reservar el primer día del periodo de exámenes y adaptándolo al nuevo calendario académico. Se introducen modificaciones puntuales si hay una asignatura nueva o baja de las existentes. Posteriormente, una vez definido el calendario de exámenes se pasa a la asignación de aulas teniendo en cuenta el número de matriculados y la capacidad de éstas, también de manera manual. La exportación/importación de un curso a otro se hace a través de la aplicación ALGAR HORARIOS.

Esto consume un tiempo de gestión muy importante porque cualquier pequeña modificación requiere de una gran inversión en tiempo. Por otro lado, no se conoce la bondad de la solución alcanzada y las ineficiencias en la asignación se trasladan de un curso a otro.

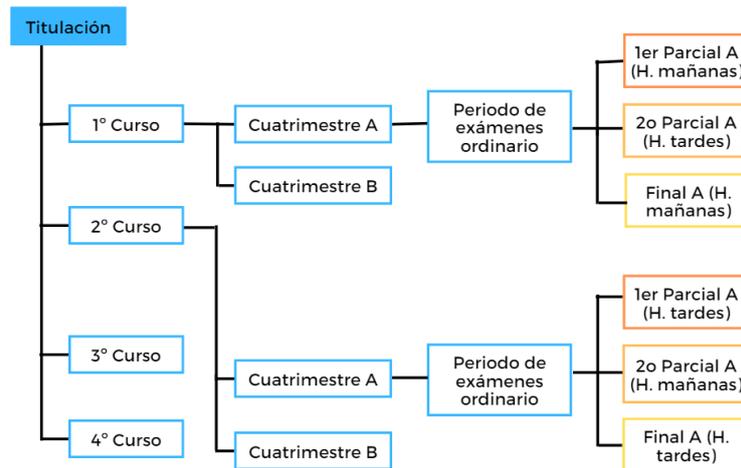


Figura 4. Estructura de examinación en los grados de la ETSII (Fuente: elaboración propia).

Por tanto, las **principales ineficiencias y oportunidades de mejora** detectadas en ambos procesos son las siguientes:

- Excesivo tiempo de gestión invertido en la búsqueda de una solución.
- Errores en el proceso de asignación.
- Ausencia de objetivos claros definidos en la búsqueda de soluciones.
- Dada la falta de objetivos por definir, aumentan las ineficiencias en el uso de las aulas y con ello el gasto energético y de personal vinculado a ellas.
- Inexistencia de parámetros de rendimiento para comparar diferentes soluciones con objeto de implementar la más satisfactoria desde el punto de vista de los diferentes colectivos: gestores, profesores y estudiantes.
- No se asegura el cumplimiento de diferentes restricciones a la hora de asignación de espacios (capacidad aulas, aulas en la misma planta...) y recursos (asignar un número de aulas menor o igual que el número de profesores de la asignatura).
- Al asignar fechas a exámenes no se tiene en cuenta la totalidad de estudiantes a examinar para favorecer un orden que maximice el tiempo de corrección de exámenes a los profesores.

2.3. Propuesta de solución

Es por todo lo explicado que, mediante este TFG, se propone el desarrollo de dos herramientas de optimización basadas en modelos de programación lineal entera-mixta que servirán de ayuda a la toma de decisiones para la planificación de calendarios de exámenes. Se propone la utilización de estas herramientas porque son las típicas para resolver problemas de asignación del tipo de problemas aquí tratado.

Para conseguirlo, se diseña un **primer modelo de Programación Lineal Entera Mixto (PLEM) enfocado únicamente al periodo de exámenes extraordinarios**. El diseño de este calendario conlleva una dificultad adicional, pues dispone de un periodo muy limitado para la realización de exámenes y para su definición: desde que finaliza el plazo de solicitud para los estudiantes hasta el inicio de los propios exámenes extraordinarios, transcurre muy poco tiempo.

Por tanto, se propone el diseño de un modelo matemático que toma en consideración los siguientes factores: el número de segmentos temporales disponibles para llevar a cabo exámenes, las asignaturas a ser programadas, el número de estudiantes que solicita el examen extraordinario de cada asignatura, así como las asignaturas solicitadas por cada alumno en concreto. Además, se incluye un parámetro que indica la distancia mínima que se debe dejar entre dos exámenes consecutivos, expresada en segmentos temporales (mañana o tarde), para intentar favorecer al máximo un periodo de descanso entre exámenes a aquellos estudiantes con un número elevado de exámenes a realizar.

Teniendo todos estos factores en cuenta, la solución que se pretende obtener tras la ejecución de este programa, es la siguiente: un calendario de exámenes que asocie cada asignatura a un periodo temporal, teniendo en cuenta los estudiantes asistentes en cada uno de ellos, y atendiendo a la función objetivo más adecuada para cada situación, además de, siempre que sea factible, garantizar la separación mínima establecida entre dos exámenes consecutivos para los estudiantes. A lo largo del capítulo 4 se detalla la formulación del modelo propuesto.

Por otro lado, se diseña un **segundo PLEM**, pero esta vez centrado en la **programación del calendario de exámenes ordinarios que dará como resultado la fecha, el horario (mañana o tarde) y las aulas en la que se realizará el examen de cada asignatura**. Este proceso es diferente al anterior, pues se realiza para todo el conjunto de titulaciones de la Escuela, en vez de únicamente para una titulación. Adicionalmente, tiene en cuenta la asignación de recursos, tanto de profesores necesarios para la vigilancia de los exámenes, como de las aulas en las que se va a llevar a cabo cada prueba, atendiendo a la capacidad requerida para albergar, en este caso a todos los estudiantes matriculados, haciendo uso de las menores instalaciones posibles; pues, al fin y al cabo, esto conlleva un gasto energético, de mantenimiento, y de personal que muchas veces no se tiene en cuenta pero supone un impacto real en el medio ambiente y también de carácter económico. También se tendrán en cuenta factores de proximidad de las aulas para favorecer la gestión en la vigilancia de éstos y la resolución de dudas durante el examen.

Como se describe en profundidad en el capítulo 5, para la definición del modelo matemático, se tienen en cuenta, entre otros, los siguientes aspectos: periodos temporales disponibles, asignaturas asociadas a los cursos de cada titulación, listado de estudiantes matriculados en cada asignatura, distribución existente de aulas según el edificio y planta en que se ubican, asignaturas de distintas titulaciones o cursos consideradas como equivalentes, cantidad de profesores disponibles para la vigilancia de exámenes, porcentaje de estudiantes repetidores, etc.

La solución óptima además de proporcionar las fechas, horario (mañana o tarde) y las aulas asignadas, considerará un tiempo mínimo entre exámenes (con el objetivo de bajar el nivel de estrés de los estudiantes), la capacidad de las aulas y su proximidad. Se pueden perseguir diferentes objetivos a la hora de encontrar una solución, desde programar primero los exámenes con mayor número de matriculados, para que los profesores dispongan de mayor tiempo para corregir, hasta la minimización del número de aulas empleadas, así como otros que se desarrollan con todo detalle en los siguientes capítulos.

2.4. Consideraciones finales: Impacto en la sostenibilidad

Se trata, por tanto, de desarrollar herramientas de soporte a la toma de decisiones en la programación de exámenes de diferente índole que repercutirán en las diferentes dimensiones de la sostenibilidad. Desde el punto de vista económico, la optimización de los recursos humanos y físicos de instalaciones conlleva un ahorro económico considerable en cuanto a coste de oportunidad: de esta manera, tanto los gestores como los profesores, podrán dedicar el tiempo ahorrado de diseñar una solución o de vigilancia de exámenes en otras tareas con mayor valor añadido. Por otro lado, existe una vertiente social al intentar programar los exámenes de manera que el estrés para estudiantes sea el menor posible (asegurando tiempos mínimos de descanso entre exámenes) y lo mismo para el profesor (programando primero los exámenes con más estudiantes). Finalmente, menor número de aulas significa menor número de energía consumida que, indirectamente, tiene su impacto en la vertiente medioambiental.

Una vez definidas las problemáticas a abordar en el siguiente capítulo se abordan los precedentes antes de llevar a cabo la descripción en profundidad de los modelos y herramientas desarrolladas.

3. ANTECEDENTES

3.1. Introducción

Dado que la propuesta del presente TFG consiste en el desarrollo de dos herramientas de ayuda a la programación de exámenes universitarios dando como resultado un calendario de exámenes, el presente capítulo tiene como objetivo la revisión de los estudios realizados en este campo de conocimiento, con el fin de mejorar la comprensión de la problemática y los posibles métodos matemáticos a emplear para su solución.

A lo largo del capítulo actual se va a realizar una explicación de la programación matemática y sus distintos campos de aplicación. A continuación, se revisarán modelos matemáticos publicados en revistas de referencia enfocados a la resolución de problemáticas similares a las anteriormente descritas vinculadas con la programación de horarios, más concretamente horarios de exámenes. Esta revisión de la literatura permitirá identificar si existen trabajos que aborden exactamente los problemas aquí planteados y en su defecto, justificar, la propuesta realizada.

3.2. Programación Matemática

El tipo de modelo seleccionado para el desarrollo de las herramientas propuestas en este TFG, como se ha mencionado anteriormente, es la programación lineal entera-mixta. Muchas veces, en contextos de organización, principalmente, surgen problemas de gran complejidad que requieren de un método cuantitativo para poder ser resueltos y optimizados. Al encontrarnos frente a una de estas situaciones, conviene aclarar qué son los métodos cuantitativos, antes de adentrarse en los distintos tipos existentes, y concretamente, en el método seleccionado para resolver la problemática expuesta más adelante.

Los métodos cuantitativos tienen como principal objetivo ofrecer herramientas para la ayuda a la toma de decisiones, eligiendo entre dos o más alternativas disponibles para alcanzar los objetivos establecidos. Para ello, es importante definir el entorno del sistema a estudiar, teniendo en cuenta los elementos que pueden afectar de alguna manera al problema objeto de análisis. Lo más importante es definir de manera precisa los objetivos de la solución buscada. Para todo ello se hace uso del método científico y de modelos matemáticos. Un modelo matemático se puede definir de la siguiente forma: “Un objeto M es un modelo de una realidad R para un observador O, si O puede obtener, estudiando M, las respuestas a las preguntas que se hace sobre R” (Suñé, B. Fonollosa, Fernández, & M. Sallán, 2016). En otras palabras, un modelo matemático permite una simplificación de la realidad siguiendo los pasos descritos a continuación (Vicéns Salort, Ortiz Bas, & Guarch Bertolín, 1998):

- **Paso 1: Definición del problema.** Identificar el problema a resolver y los requerimientos que éste contiene.
- **Paso 2: Modelización.** Clasificar el tipo de problema al que nos enfrentamos, pues existen muchas situaciones comunes ya tipificadas que facilitan el proceso a seguir, y así

proceder a la elaboración del modelo más adecuado. Un modelo matemático consta de los siguientes elementos (Suñé, B. Fonollosa, Fernández, & M. Sallán, 2016):

- **Variables:** podemos distinguir por un lado las variables de decisión, siendo aquellas que irán incluidas en la función objetivo representando el valor que se desea optimizar y tomar una decisión sobre él. Además, se emplean otras variables auxiliares, necesarias en situaciones de mayor complejidad para asistir y completar la definición de las variables de decisión, aportando información adicional. Son incógnitas del problema.
- **Función objetivo:** se trata de la magnitud o magnitudes a optimizar, según se defina uno o varios objetivos. Se crean ecuaciones lineales compuestas por las variables de decisión y parámetros o coeficientes asociados a ellas. Estas expresiones pueden tener un sentido de minimización o maximización del valor objetivo.
- **Restricciones:** representan las limitaciones definidas para el problema. Estas pueden servir para relacionar las variables entre ellas, representar limitaciones de recursos, incluir restricciones lógicas necesarias para el sentido del problema, etc. Son las responsables de delimitar una región en la cual se encuentran las posibles soluciones factibles.

A lo anterior, habría que añadir, los **índices** (elementos del sistema), los **conjuntos** (relaciones entre índices) y los **parámetros o datos** (características conocidas de los índices o combinación de éstos).

- **Paso 3: Resolución.** El modelo completo se puede considerar resuelto cuando se obtiene una solución factible que ofrece un conjunto de valores que cumplen todos los requisitos o restricciones y optimizan la función objetivo.

Existen varios tipos de soluciones. En primer lugar, se distingue entre una solución factible (satisface las restricciones) o no factible (no puede cumplir todas las restricciones definidas). A continuación, la solución se considera óptima cuando el valor obtenido coincide con el mejor valor posible a obtener. Por lo contrario, puede ser no óptima y también se puede considerar simplemente satisfactoria (esto se da cuando se obtiene un valor en un tiempo razonable, a pesar de no ser totalmente óptimo). Finalmente, en función del problema planteado pueden existir múltiples soluciones que cumplen con las condiciones planteadas o, por lo contrario, una única solución válida (Vicéns Salort, Ortiz Bas, & Guarch Bertolín, 1998).

- **Paso 4: Validación del modelo y análisis de sensibilidad.** A pesar de haber obtenido una solución, no se puede dar por concluido el proceso de los métodos cuantitativos. Es importante, para el entendimiento de la solución generada, comprobar que el modelo ofrece una representación acorde con la realidad del problema y evaluar cómo afectaría a la solución una modificación en cada uno de los datos de entrada.

Para terminar con el proceso, cabe destacar la importancia del software informático de apoyo seleccionado para llevar a cabo la resolución del modelo y poder explotarlo con diferentes conjuntos de datos de entrada, haciéndolo así reutilizable en diferentes escenarios. En la actualidad, existe un enorme abanico de recursos informáticos disponibles que permiten la

transcripción del modelo matemático y su posterior ejecución mediante *solvers*. Estos son capaces de ejecutar programas de gran escala en tiempos significativamente reducidos.

Finalmente, para el diseño de las herramientas de este estudio, como ya se ha mencionado anteriormente, se ha elegido la programación lineal entera-mixta. Sin embargo, existen otras opciones disponibles en función de la manera en que se relacionen las distintas variables en las expresiones del modelo. Se incluye una clasificación de las distintas clases de modelos, dentro de la programación lineal, en función del tipo de variables de decisión (Ramos, 2019):

- Programación Lineal Continua (PLC): todas las variables de decisión son continuas y tanto la función objetivo como las restricciones son lineales (Molina, 2008).
- Programación Lineal Entera (PLE): se requiere que todas las variables de decisión tomen valores enteros.
 - $\text{Opt } Z = c X$
 - $A X < b$
 - $x \in Z^+$
- Programación Lineal Entera Mixta (PLEM): no todas las variables deben ser enteras, sino que se pueden contemplar en un mismo programa variables enteras y continuas.
 - $\text{Opt } Z = c X + d Y$
 - $A X + B Y \leq b$
 - $X \in R^+$
 - $Y \in Z^+$
- Programación Binaria (PB): Todas las variables de decisión del problema son de carácter binario, pueden tomar valor uno o cero.
 - $\text{Opt } Z = c X$
 - $A X \leq b$
 - $X \in \{0,1\}$

Una de las principales aplicaciones de la programación matemática y en concreto de la PLEM son los problemas de reparto, donde se dispone de un conjunto de recursos limitados que deben ser asignados a un grupo de actividades concretas. El objetivo consiste en determinar la manera de asignarlos, de manera que la utilidad o el rendimiento total sean máximos (Suñé, B. Fonollosa, Fernández, & M. Sallán, 2016). Un problema de asignación de recursos limitados ampliamente conocido es el de definición de horarios y programación de exámenes, tal y como se detalla a continuación.

3.3. Revisión de modelos de programación matemática para la definición de calendario de exámenes.

3.3.1. Descripción de la metodología de revisión

Para llevar a cabo una revisión de los estudios ya realizados vinculados con el campo de conocimiento al que pertenece este TFG, los métodos cuantitativos y la programación de modelos matemáticos de horarios de exámenes, se sigue la metodología descrita en la Figura 5, adaptada de (Seuring & Müller, 2008).

En primer lugar, se define el alcance de la investigación limitando la búsqueda a la selección de artículos que presentan estudios sobre programación de horarios de exámenes en instituciones

educativas. A continuación, se hace una primera recolección del material objeto de ser utilizado y se seleccionan las diferentes categorías que van a ser empleadas para evaluar y analizar la información recogida, con el fin de poder sacar conclusiones acerca de las características que se tienen en cuenta en los diferentes estudios y sus diferencias con las propuestas realizadas en este proyecto.

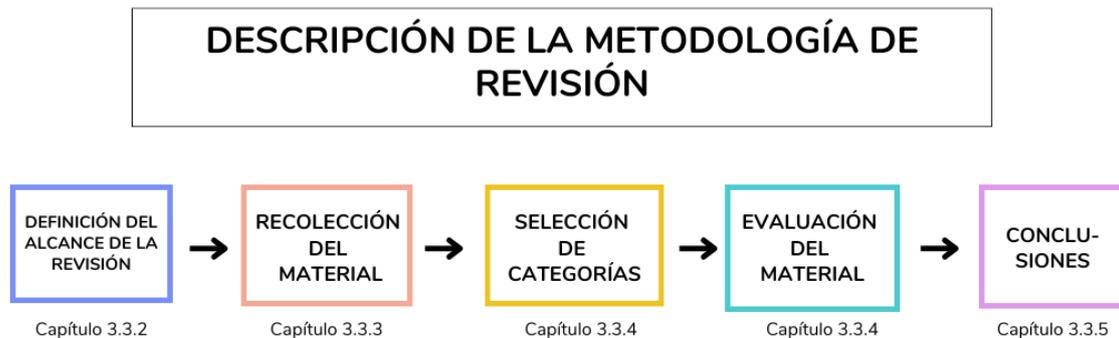


Figura 5: Descripción de la metodología de revisión de literatura empleada (Fuente: elaboración propia).

3.3.2. Definición del alcance de la revisión

Dentro de la problemática de los calendarios académicos existen muchas variantes según el recurso a planificar. Se diferencian tres categorías principales (Gashgari, Alhashimi, Aljawi, Alamoudi, & Obaid, 2018):

- Calendarios de exámenes de universidad: se planifican de manera que a los estudiantes no se les solapen dos exámenes distintos al mismo tiempo. Se suele emplear más de un aula por asignatura, en función del número de estudiantes que asistan.
- Calendarios de clases de universidad: los estudiantes pueden tener asignaturas de distintos cursos, por lo que se debe minimizar los solapes entre diferentes asignaturas para cada alumno. Además, las clases se deben llevar a cabo en una única localización y hora.
- Calendario de clases de colegio: un alumno cursa todas las asignaturas de un mismo curso y un profesor no puede impartir dos clases al mismo tiempo.

Tras diferenciar los tres tipos de problemas existentes, en este análisis literario nos vamos a centrar en la primera variante mencionada de calendarios de exámenes de universidad, pues es a la que pertenecen las propuestas realizadas en este proyecto. Con objeto de analizar si existen soluciones que modelen características de los problemas objeto de estudio, se realiza una revisión bibliográfica en torno al tema (modelos de programación matemática que traten la programación de exámenes).

3.3.3. Recolección del material

La búsqueda de material bibliográfico se ha realizado en tres de las bases de datos más relevantes: Scopus (<https://www.scopus.com>), Google Scholar (<https://scholar.google.es/>) y Science Direct (<https://www.sciencedirect.com/>).

En primer lugar, se realiza un listado de las palabras clave y los campos que se van a utilizar para hacer una primera búsqueda de artículos a valorar para la selección y análisis final. Cabe destacar que la búsqueda se ha realizado en inglés, puesto que la variedad encontrada es mucho mayor. La revisión de la literatura no pretende ser exhaustiva, ya que sería necesario invertir un tiempo equivalente al dedicado en global a todo el TFG. Las palabras clave empleadas son las siguientes:

- Schedule
- University
- Exams
- Exam timetabling
- Optimization

Además, para acotar un poco más la búsqueda se seleccionan los campos concretos en los que ubicar esta información. Se seleccionan principalmente el campo de título, resumen y palabras clave. También se filtra por tipo de documento, acotando la búsqueda a artículos de estudios reales llevados a cabo y de investigación.

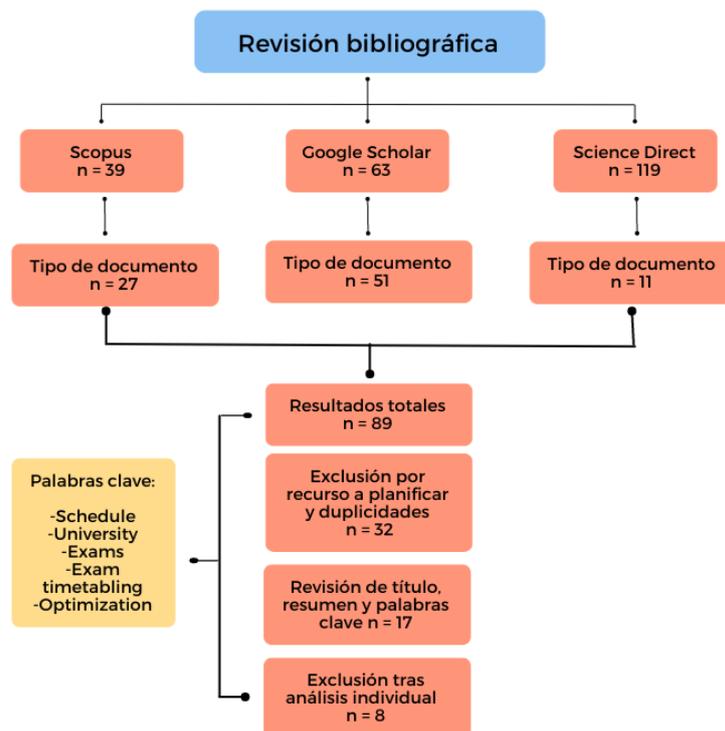


Figura 6. Revisión y selección de fuentes bibliográficas (Fuente: elaboración propia).

En la Figura 6 se puede observar con detalle el proceso llevado a cabo con el número de artículos obtenidos resultado de la búsqueda en cada una de las BBDD. Partiendo de la primera muestra obtenida, se empiezan a acotar los resultados con un filtrado de tipo de documento. A partir de este punto, se procede a excluir aquellas publicaciones en las que el recurso a planificar no sean exámenes, puesto que hay muchos artículos destinados a planificación de clases escolares. También se eliminan aquellos documentos que están duplicados, pues se encuentran en distintas fuentes de búsqueda. Finalmente, se hace una selección tras un análisis más

individualizado en la que me centro en el título de los artículos, su resumen y las palabras clave que contienen. Tras este proceso de búsqueda se finaliza con ocho artículos sobre los cuales se realiza un análisis más detallado a continuación.

Como se ha comentado anteriormente, los artículos seleccionados han sido publicados entre los años 2000 y 2021. En la Figura 7 se puede observar con mayor detalle la distribución de éstos con el tiempo, llamando la atención que la mayoría de los artículos han sido publicados en los últimos años y concretamente en el año 2019.



Figura 7. Años de publicación de los artículos analizados (Fuente: elaboración propia).

3.3.4. Selección de categorías y evaluación del material

Una vez seleccionado el conjunto de artículos a analizar al detalle, es importante determinar aquellos aspectos que se van a evaluar en cada uno, para poder obtener unas conclusiones razonables y poder comparar el contenido entre los diferentes estudios seleccionados. Para ello, se diferencian dos tablas: la primera se destina a analizar el propio modelo indicando los autores, el método de resolución empleado, el tipo de modelo y procedimiento que sigue éste. Por otro lado, en la segunda tabla se escogen unas dimensiones a evaluar que corresponden con las funciones objetivos y restricciones opcionales que incluyen las propuestas de este proyecto. De esta manera, se incluyen dos tablas iguales, una de ellas con las dimensiones mencionadas referentes al primer modelo propuesto en el TFG, y la segunda destinada a las dimensiones correspondientes al segundo modelo propuesto. En la Figura 8 se puede observar la taxonomía con las categorías objeto de ser evaluadas en cada uno de los modelos.

Se distinguen entre dos categorías comunes al análisis de ambos problemas como son las siguientes. La categoría asignaciones pretende identificar si las asignaturas programan los exámenes teniendo en cuenta la clase de recursos a asignar (aulas, periodos, profesores). El modelo desarrollado del problema: Programación lineal continua (PLC), Programación Lineal Entera (PLE), Programación Lineal Entera y Mixta (PLEM), Programación Lineal Binaria (PLB) y Programación No Lineal (PNL). El procedimiento empleado para resolver el problema consiste en 1 o 2 etapas, mientras que en relación al método de solución empleado se distingue entre: algoritmo optimizador, algoritmo heurístico, algoritmo metaheurístico y algoritmo hiperheurístico.

En cuanto a las categorías particulares evaluadas para cada problemática, hacen referencia a aspectos del modelado como son la función objetivo y las restricciones que son las que aparecen a continuación.

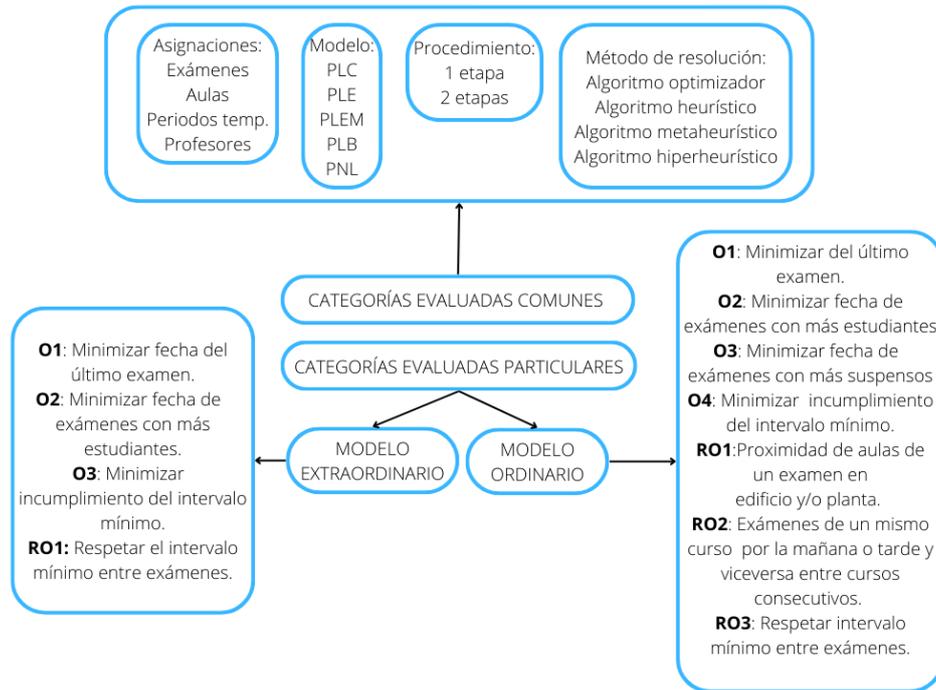


Figura 8. Taxonomía para el análisis de los artículos (Fuente: elaboración propia).

Antes de pasar a analizar de forma estructurado cada uno de los 8 artículos identificados, a continuación, se incluye un breve resumen de los estudios analizados con el fin de entender otras maneras de enfocar y resolver la misma problemática en distintos escenarios.

En el primer artículo, escrito por (Dimopoulou & Miliotis, 2001) se propone, a raíz de la planificación de cursos escolares, un programa de planificación de exámenes para la *University of Economics and Business* de Atenas. El modelo está basado en un método heurístico 'Branch and Bound' binario, que busca asignar periodos temporales limitados a exámenes. El modelo propone diferentes objetivos y restricciones que incluyen la capacidad máxima de las aulas, la distancia entre exámenes, diferencias entre asignaturas obligatorias y optativas y minimizar la longitud del periodo de exámenes. Plantean una solución inicial no factible basada en el horario de clases, que se va modificando para satisfacer dichos objetivos y terminar siendo de carácter factible. Se diferencian dos fases de actuación; la primera destinada a las primeras cuatro restricciones, y la segunda para las dos últimas. Se concluye que no se obtiene una solución optimizada pero se consigue disminuir el esfuerzo destinado a la creación de estos calendarios, a pesar de que no se incluyen medidores de calidad de la solución generada.

El foco de interés en el estudio de (Ahmad & Shaari, 2016) también busca una solución factible, pero el problema objetivo se centra en asignar periodos temporales y aulas a exámenes de la universidad. Las restricciones que se deben mantener son: el mismo estudiante no puede hacer dos exámenes diferentes al mismo tiempo, es preferible que ningún estudiante tenga dos exámenes al día y que tenga al menos un hueco vacío entre exámenes. Para ello, se propone el uso de un algoritmo llamado optimización por enjambre de partículas, conocido como *Particle Swarm Optimization* (PSO). Esta técnica es similar a los algoritmos genéticos. Está basada en el movimiento de las partículas y su velocidad por el espacio de búsqueda. El modelo incluye una única restricción dura: un estudiante no puede ser asignado dos exámenes en el mismo periodo

temporal. Para obtener una solución factible se debe cumplir este factor. Además, se incluyen dos restricciones blandas: intentar evitar que los estudiantes tengan dos exámenes por día y que tengan, al menos, un periodo libre entre exámenes.

La variante del problema considerada en el estudio de (Arbaoui, Boufflet, & Moukrim, 2016) también propone la asignación de exámenes universitarios a periodos temporales, distanciando lo máximo posible los exámenes entre ellos para cada estudiante. Una solución factible sería programar todos los exámenes de manera que ningún estudiante realice dos exámenes al mismo tiempo, aunque la calidad de la solución se penalizaría según las veces en que la restricción blanda de espaciamiento se vea violada. Los autores emplean un conjunto de datos de universidades de todo el mundo, y proponen dos modelos diferentes. En el primer modelo se busca una primera solución factible mediante una programación no lineal, basado en dos sets de variables íntegras. Es la restricción de espaciamiento la que causa la no linealidad. En esta variante buscan minimizar el total de periodos requeridos para llevar a cabo los exámenes. Seguidamente, se propone un modelo lineal mediante una búsqueda local que pretende mejorar la solución propuesta en primer lugar. Aquí, la función objetivo sirve para minimizar la suma de penalizaciones totales de cada examen. La metaheurística considerada se divide en dos fases: primero buscar una solución factible, seguido del procedimiento de búsqueda local para mejorar la calidad (optimizar) dicha solución.

En el trabajo propuesto por (Kumar Bania & Duarah, 2011), se presenta la aplicación del método de coloreado de grafos para facilitar la programación de un calendario de exámenes que incluya la asignación de los exámenes de cada asignatura a las aulas en las que tendrán lugar, el conjunto de profesores para su vigilancia, y los estudiantes que están matriculados en cada uno. Para ello, toman ayuda de una matriz de cursos generada a partir de datos obtenidos de una institución educativa. A partir de definir el dominio del problema, se calculan diferentes tipos de restricciones (duras y blandas), intentando hacer hincapié en maximizar el grado de satisfacción de estas restricciones. Uno de los objetivos principales es minimizar la duración total del periodo de exámenes. A partir de los datos de entrada, se ha conseguido diseñar un modelo que satisface las restricciones duras establecidas y algunas de las blandas más importantes.

El objetivo de (Abou Kasm, Mohandes, Diabat, & El Khatib, 2019) es facilitar la programación de exámenes para el Instituto Masdar (MI). Además de la conocida restricción de los conflictos para los estudiantes, el caso del horario del MI incluye la incorporación de las capacidades limitadas de las sedes, las preferencias de los instructores y el número de exámenes programados para un estudiante dentro de una ventana predefinida. Introducen una formulación de programación entera (PLE) que captura todas las restricciones planteadas. La formulación propuesta puede resolver problemas pequeños utilizando un software comercial. Sin embargo, el rendimiento de esta formulación se deteriora a medida que aumenta el tamaño del problema. Por lo tanto, el documento propone una heurística para resolver problemas de mayor tamaño ágilmente. El algoritmo empleado es el coloreado de grafos. Se resuelven cuatro casos reales con datos del MI para ilustrar la viabilidad y competitividad de la heurística propuesta. Por último, se presenta un estudio computacional para comparar la heurística propuesta con la formulación de PLE. Los resultados muestran que la heurística propuesta es capaz de obtener soluciones casi óptimas en un tiempo computacional menor.

(Kusumawardani, Muklason, & Azthanty Supoyo, 2019) también proponen un estudio que involucra la hiper heurística. En este caso, se busca la optimización de calendarios de exámenes a partir de conjuntos de datos de la Universidad de Toronto. Los resultados deben asegurar que ningún alumno asista a más de un examen en la misma franja horaria, el número de estudiantes

que asistan al examen de un aula no podrá superar el aforo total de ésta y que no haya dos exámenes que tengan lugar en la misma clase y franja horaria. Para ello, hacen uso de dos algoritmos distintos. En primer lugar, emplean el algoritmo de Greedy para generar una primera solución de carácter factible. En este primer algoritmo se asignan los exámenes a periodos temporales y, seguidamente, a las distintas aulas en función de su capacidad. Partiendo de esta primera solución, se aplica un segundo algoritmo llamado Recocido simulado (Simulated Annealing, SA). Este ofrece una optimización del calendario generado en primer lugar.

El objetivo del siguiente estudio (Muklason, Bagus, & Marom, 2019) corresponde con los estudios presentados previamente; asignar a los exámenes un periodo temporal y ubicación concreta. Se pretende favorecer en la medida de lo posible al éxito de los estudiantes al examinarse y asegurar que ningún alumno tiene solapes entre asignaturas. Para ello, se emplea la hiper heurística en dos pasos. Esta investigación utiliza la técnica heurística del mayor grado, para ordenar los exámenes en función del número de conflictos con otros exámenes. El algoritmo de coloreado de grafos se utiliza para encontrar una solución inicial factible. Los exámenes se asignan a las franjas horarias y a las salas secuencialmente en función del rango de conflictos. Para asignar los exámenes a las aulas, se utiliza el algoritmo de la mochila para garantizar que el número de estudiantes matriculados en un examen no supere la capacidad de las aulas. La implementación del algoritmo de gran diluvio tiene como objetivo realizar la optimización de la solución inicial que se ha obtenido a partir del método de coloreado de grafos. Podemos concluir que, en general, el algoritmo propuesto es muy eficaz para resolver un problema de horarios universitarios en el mundo real.

Para concluir con los estudios analizados, (Güray Güler, Geçici, Köroglu, & Becit, 2021) estudian el problema del horario de los exámenes (ETP) y el problema de la asignación de supervisores (SAP) de una escuela de formación profesional en Estambul. Las asignaturas deben programarse en función de la disponibilidad del profesorado y las aulas y en días lectivos, además de que dos o más asignaturas de un alumno no deben ser programadas al mismo tiempo y el examen de cada asignatura debe celebrarse una sola vez. Se proponen dos modelos de programación entera mixta (PLEM), uno para el ETP y otro para el SAP. La solución óptima para el ETP de la escuela no es alcanzable con un *solver* comercial. Por lo tanto, se aplica un método de descomposición en dos fases: el tiempo en el que se realizan los exámenes se determina en la primera fase, mientras que el lugar de los exámenes se determina en la segunda fase. Esto hace que se pueda resolver el ETP con un *solver* de código abierto en menos de dos minutos. Una vez que se han programado los exámenes, el siguiente paso es asignar supervisores a los exámenes, a través del PLEM diseñado para la división SAP. Los modelos matemáticos y el método de solución están integrados en un sistema de apoyo a la decisión (DSS) basado en el diseño web. Utilizando este DSS, un usuario medio puede preparar un horario completo en menos de dos minutos.

A continuación, se muestra la Tabla 1. En la primera columna se indican los recursos que son asignados en cada estudio. Estos pueden ser: exámenes de asignaturas a periodos temporales concretos, aulas en las que estos tendrán lugar y los profesores de vigilancia que se asignan a cada aula. Otro aspecto diferenciador según el caso es el procedimiento de resolución, pues se puede realizar en una o dos etapas. Esto depende de la magnitud del problema y del tiempo de ejecución asociado, pues si es muy elevado es recomendable fraccionar la resolución en dos etapas separadas. Por último, como ya se ha distinguido anteriormente, el modelo puede ser de diferente índole (PLC, PLE, PLEM, PLB o PNL) y el método de resolución empleado puede ser un algoritmo optimizador, una heurística, metaheurística e hiper-heurísticas. En primer lugar, los

algoritmos optimizadores son técnicas de resolución que, siguiendo unos pasos predefinidos, garantizan la mejor solución posible. Por otro lado, los métodos heurísticos no garantizan una solución óptima, sino una solución relativamente buena mediante el uso de reglas empíricas. A partir de estos, las metaheurísticas son algoritmos heurísticos pero con un cierto nivel superior, pues van más allá de la heurística mejorando su rendimiento. En cuanto a las hiper-heurísticas, estas consisten en la combinación o adaptación de varias heurísticas más simples para automatizar la resolución eficiente de problemas.

En la Tabla 1 se puede observar la clasificación realizada de los distintos estudios analizados:

Referencia	Asignaciones				Procedimiento		Modelo					Método de resolución			
	Exámenes	Aulas	Per. Tem	Prof	1 eta	2 eta	P L C	P L E	P L E M	P L B	P N L	O p t	Heu	Met-Heu	Hiper-Heu
(Dimopoulou & Miliotis, 2001)	X	X	X			X				X		X			
(Ahmad & Shaari, 2016)	X	X	X			X		X						X	
(Arbaoui, Boufflet, & Moukrim, 2016)	X	X	X			X		X			X	X		X	
(Kumar Bania & Duarah, 2011)	X	X	X	X	X			X				X			
(Abou Kasm, Mohandes, Diabat, & El Khatib, 2019)	X	X	X	X	X			X					X		
(Kusumawardani, Muklason, & Azthanty Supoyo, 2019)	X	X	X			X		X							X
(Muklason, Bagus, & Marom, 2019)	X	X	X			X			X						X
(Güray Güler, Geçici, Köroglu, & Becit, 2021)	X	X	X	X		X			X			X			
Propuesta TFG	X	X	X	X	X				X			X			
Porcentajes (sin propuesta TFG)	100	100	100	37,5	25	75	0	62,5	25	12,5	12,5	50	12,5	25	25

Tabla 1: Clasificación inicial de los estudios analizados (Fuente: elaboración propia).

En la Tabla 1 se puede observar que en todos los estudios contemplan la asignación exámenes a aulas y periodos temporales y tan sólo el 37,5% incluye la asignación de profesores. En cuanto a los modelos, el 75% se resuelven en dos etapas diferenciadas, ya que esto disminuye significativamente el tiempo de ejecución de los modelos y simplifica mucho el proceso. Sin embargo, en la propuesta de este TFG ambos modelos propuestos se desarrollan en una única etapa. Por lo que respecta al tipo de modelo, la variante que más predomina es la programación lineal entera, suponiendo el 62,5% de los artículos. Sin embargo, en cuanto a los métodos de resolución, la heurística es el método menos presente y los algoritmos optimizadores el más

utilizado. Se puede concluir que ninguno de los estudios ofrece una propuesta igual a la que se incluye en este proyecto.

A continuación, con objeto de establecer qué características de los dos problemas que pretende resolver el presente TFG se han cubierto por los anteriores trabajos, se procede a analizar con mayor detalle ciertas características de los problemas abordados, con objeto de determinar cuáles de ellas se han modelado previamente o, por el contrario, son originales.

Como se puede observar en la figura 8, para comparar con el modelo de exámenes extraordinarios evaluaremos las funciones objetivo (O_i) planteadas en él, así como las restricciones opcionales (RO_i) que incluye:

- O1: Minimizar la fecha de finalización del último examen.
- O2: Minimizar la fecha de realización de los exámenes con mayor número de estudiantes.
- O3: Minimizar el incumplimiento del intervalo mínimo entre exámenes (en caso de que no se pueda respetar RO1).
- RO1: Respetar el intervalo mínimo entre exámenes para todos los estudiantes.

De forma análoga, se añaden dimensiones para poder ser comparadas con el segundo modelo de exámenes ordinarios:

- O1: Minimizar la fecha de finalización del último examen.
- O2: Minimizar la fecha de realización de los exámenes con mayor número de estudiantes
- O3: Minimizar la fecha de realización de los exámenes con mayor porcentaje de estudiantes suspensos
- O4: Minimizar el incumplimiento del intervalo mínimo entre exámenes de dos asignaturas de un mismo curso y titulación.
- RO1: Buscar la proximidad de aulas de un mismo examen en el mismo edificio, o incluso mismo edificio y planta.
- RO2: Todos los exámenes de un mismo curso se deben realizar por la mañana o tarde y de manera alterna entre cursos consecutivos para fomentar la compatibilidad entre exámenes de cursos consecutivos para los estudiantes.
- RO3: Se busca respetar el intervalo mínimo entre exámenes para todos los estudiantes.

En las tablas Tabla 2 y Tabla 3 se pueden observar las dimensiones mencionadas de cada modelo y su presencia, o ausencia, en cada uno de los estudios analizados, además de los objetivos planteados ante cada problema en cuestión. Seguidamente y para finalizar con este apartado, se realiza un breve resumen del contenido de cada uno de los trabajos revisados y la manera de abordarlos.

Referencias	Dimensiones modelo exámenes extraordinarios			
	O1	O2	O3	RO1
(Dimopoulou & Miliotis, 2001)	X			X
(Ahmad & Shaari, 2016)			X	
(Arbaoui, Boufflet, & Moukrim, 2016)	X		X	X
(Kumar Bania & Duarah, 2011)	X		X	X

(Abou Kasm, Mohandes, Diabat, & El Khatib, 2019)		X	X	X
(Kusumawardani, Muklason, & Azthanty Supoyo, 2019)	X		X	
(Muklason, Bagus, & Marom, 2019)		X	X	X
(Güray Güler, Geçici, Köroglu, & Becit, 2021)			X	
Propuesta de este TFG (Modelo Exámenes Extraordinarios)	X	X	X	X
% de artículos con X (sin propuesta TFG)	50	25	87,5	62,5

Tabla 2. Comparación de los estudios con el modelo de exámenes extraordinarios propuesto (Fuente: elaboración propia).

Visualizando los resultados obtenidos en cada estudio y los porcentajes globales en comparación con la propuesta realizada, se puede observar que ningún modelo plantea todas las características modeladas en este TFG en cuanto al modelo de exámenes extraordinarios. El objetivo más presente en los distintos estudios es minimizar el incumplimiento de la distancia mínima entre exámenes. De manera contraria, la característica más innovadora y por ello menos tratada en los estudios es la de programar los exámenes en función del número de estudiantes que realizan el examen.

Referencias	Dimensiones modelo exámenes ordinarios						
	O1	O2	O3	O4	RO1	RO2	RO3
(Dimopoulou & Miliotis, 2001)				X			X
(Ahmad & Shaari, 2016)				X		X	
(Arbaoui, Boufflet, & Moukrim, 2016)				X			X
(Kumar Bania & Duarah, 2011)	X			X			X
(Abou Kasm, Mohandes, Diabat, & El Khatib, 2019)		X		X			
(Kusumawardani, Muklason, & Azthanty Supoyo, 2019)	X			X		X	X
(Muklason, Bagus, & Marom, 2019)	X	X		X		X	X
(Güray Güler, Geçici, Köroglu, & Becit, 2021)	X			X	X	X	
Propuesta de este TFG (Modelo exámenes ordinarios)	X	X	X	X	X	X	X
% de artículos con X (sin propuesta TFG)	50	25	0	100	12,5	50	62,5

Tabla 3. Comparación de los estudios con el modelo de exámenes ordinarios propuesto (Fuente: elaboración propia).

Por otro lado, en la Tabla 3 se puede observar el porcentaje de artículos en los que se tiene en cuenta cada una de las dimensiones valoradas. Aquella con mayor presencia en los estudios realizados es la dimensión O4 (minimizar el número de veces que se incumple el intervalo

mínimo entre exámenes de dos asignaturas). Por el contrario, una dimensión que no se valora en ninguno de los estudios analizados es la O3 (programar primero las asignaturas con más porcentaje de suspensos). En cuanto a las restricciones opcionales, la más presente es la RO3 (respetar el intervalo mínimo entre exámenes).

Finalmente, se puede observar que ninguno de los estudios contempla todas las dimensiones que se incluyen en nuestro modelo para exámenes extraordinarios ni las del ordinario. Además, como se ha visto con el análisis de la Tabla 1 tampoco hay otro estudio que combine el método de resolución exacto en un modelo PLEM y con todos los recursos evaluados en esta propuesta.

3.3.5. Conclusiones.

Una vez analizada la problemática de la programación de calendarios de exámenes en universidades, se comprende la complejidad que esto conlleva. Uno de los motivos por el que la definición de estos calendarios es tan compleja reside en la cantidad de partes involucradas de las que se pueden ver afectados sus intereses. En primer lugar, el Equipo Rectoral de la universidad define un conjunto de estándares mínimos a cumplir, las distintas Escuelas pueden solicitar un orden específico en el que se desarrollen los exámenes, y finalmente, el conjunto de estudiantes y profesores se ve directamente afectado.

Son diversos los estudios que buscan optimizar este problema. Sin embargo, tras evaluar las dimensiones de análisis en cada uno, se puede afirmar que ninguno de los modelos analizados recoge todas las características de los problemas abordados en este trabajo. También se observa que ninguno de los dos modelos que se van a llevar a cabo han sido planteados en su totalidad.

La bibliografía consultada servirá de ayuda para la definición de las restricciones básicas que incluye todo calendario académico. El segundo modelo propuesto para la programación de los exámenes ordinarios tiene más aspectos en común con el estudio de (Muklason, Bagus, & Marom, 2019). En ambos se tiene en cuenta favorecer a los estudiantes y profesores, por lo que se busca mantener la distancia entre exámenes para cada alumno, además de fomentar la separación de exámenes de cursos consecutivos. Además, también buscan minimizar el número de aulas utilizadas en los exámenes ajustándose todo lo posible a la máxima capacidad de las aulas. A pesar de estas similitudes, las principales diferencias residen en que no contemplan la asignación de profesores, el método de resolución es la hiper-heurística y se resuelve en dos etapas. Además, en este modelo no se contempla ordenar los exámenes en función del número de suspensos por asignatura ni se busca la proximidad de las aulas destinadas a exámenes de la misma asignatura.

Para concluir, se puede recalcar que las herramientas propuestas en este trabajo incluyen dimensiones innovadoras, que no se han incluido en ninguno de los trabajos revisados. De esta manera, se pretende elaborar dos herramientas muy completas y capaces de lidiar con todas las dimensiones planteadas, entre otras.

4. HERRAMIENTA DE AYUDA A LA TOMA DE DECISIONES PARA LA PROGRAMACIÓN DE EXÁMENES EXTRAORDINARIOS

4.1. Introducción

En el presente capítulo se describe la herramienta de optimización basada en un modelo de programación lineal entera-mixta como soporte a la programación de exámenes extraordinarios. En primer lugar, se describe de manera concisa el problema objeto de estudio. Seguidamente, se plantea el modelo de optimización para resolver el citado problema a través de la especificación de la parte de definición (índices, conjuntos, parámetros y variables de decisión) y la parte de modelado (funciones objetivo y restricciones). Finalmente, se expone la arquitectura empleada para la implementación de la herramienta propuesta, así como el proceso de validación de ésta.

4.2. Descripción del problema

Los exámenes extraordinarios están pensados para facilitar que los estudiantes a los que les quedan pocas asignaturas por superar puedan terminar sus estudios sin necesidad de invertir un curso completo adicional. Actualmente la normativa diferencia entre estudiantes de Grado y Máster, de manera que las condiciones para solicitar un examen extraordinario son diferentes:

Grado: estudiantes matriculados de todos los créditos y con 20 ECTS o menos pendientes de superar en asignaturas para acabar la titulación (sin contar TFG y prácticas en empresa).

Máster: estudiantes matriculados de todos los créditos y con 10.5 ECTS o menos pendientes de superar en asignaturas para acabar la titulación (sin contar TFM y prácticas en empresa).

Además, en ambos casos, para solicitar la extraordinaria de una determinada asignatura deben haberse presentado con anterioridad a alguna convocatoria ordinaria de la misma asignatura.

A lo largo del curso, existen varios periodos de solicitud de exámenes extraordinarios ligados a convocatorias diferentes, en cada uno de los cuales los estudiantes solicitan las asignaturas a las que desean presentarse en dicha convocatoria asociada. Una vez Secretaría de la ETSII resuelve qué estudiantes cumplen condiciones, se obtiene un listado definitivo de estudiantes y las asignaturas a las que desean presentarse. En función de las asignaturas seleccionadas por cada alumno de una misma titulación, la Escuela debe definir las fechas de exámenes para cada una de las asignaturas dentro de un rango de fechas predefinido. Se debe asegurar que cada estudiante podrá presentarse a todas las asignaturas solicitadas sin que ningún examen se le solape y, en caso de que fuera posible, dejando un intervalo de tiempo de descanso entre exámenes para un mismo estudiante. Por otro lado, el número de estudiantes de cada examen extraordinario es muy dispar entre asignaturas, motivo por el que es deseable que se programen primero los exámenes de las asignaturas más numerosas, para que los profesores dispongan de mayor tiempo para corregir. Actualmente, todo este proceso se realiza manualmente con un consumo de tiempo superior al deseado, dado el escaso tiempo disponible para programar las fechas de examen.

Se propone el desarrollo de una herramienta de programación lineal entera-mixta (PLEM) que de soporte al proceso de asignar fechas a los exámenes extraordinarios para cada titulación, de manera que se optimicen una serie de objetivos y se cumplan diferentes restricciones, adaptables a las necesidades de cada caso.

4.3. Modelo de PLEM para la programación de exámenes extraordinarios

En las siguientes tablas (Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6) se puede consultar la parte de definición del modelo: índices, parámetros y variables de decisión.

4.3.1. Nomenclatura

A continuación, se incluyen tres tablas diferenciadas con un listado y una breve descripción de los tres tipos de nomenclatura del modelo matemático: índices, parámetros y variables.

Índices:

p, p'	Índices que hacen referencia al segmento temporal (periodo) dentro del horizonte al que se podrán asignar fechas de exámenes. Cada día se supondrá que dispone de dos segmentos (mañana y tarde).
a, a'	Índices que hacen referencia a las asignaturas.
s	Índice que hace referencia a los estudiantes que solicitan el examen extraordinario de cada una de las anteriores asignaturas.

Tabla 4. Descripción de los índices del modelo matemático extraordinario. (Fuente: elaboración propia)

Parámetros:

ne	Número de segmentos temporales disponibles dentro del rango establecido entre los que asignar fechas para el periodo de exámenes extraordinarios (p.e. si sólo existiera un periodo de una semana, contando que en un día se pueden realizar mañana y tarde, habría $5 \cdot 2 = 10$ segmentos temporales).
ns_a	Número de estudiantes que solicitan el examen extraordinario de la asignatura a .
r_{sa}	Parámetro binario con un valor de 1 si el estudiante s solicita el examen extraordinario de la asignatura a y de 0, en caso contrario.
$dmin$	Mínima separación requerida entre dos exámenes consecutivos de un estudiante (expresada en número de segmentos temporales).

Tabla 5. Descripción de los parámetros del modelo matemático extraordinario. (Fuente: elaboración propia)

Variables de decisión:

Y_{ap}	Variable binaria con un valor de 1 si el examen de la asignatura a se programa en el segmento temporal p y de 0, en caso contrario.
$Y_{S_{sap}}$	Variable binaria con un valor de 1 si el estudiante s realiza el examen de la asignatura a en el segmento temporal p y de 0, en caso contrario.
$Pmax$	Variable entera que indica el segmento temporal en el que se realiza el último examen extraordinario o una cota máxima, dependiendo de la FO optimizada.
$Y_{S_{saa'}}$	Variable binaria con un valor de 1 si para el estudiante s se incumple con la mínima distancia requerida entre el examen de la asignatura a y a' , y de 0, en caso contrario.

$T_{saa'}^+$	Variable entera que indica para el estudiante s el número de segmentos temporales entre los exámenes a los que se presenta de la asignatura a y la asignatura a' si el examen de la asignatura a' se hace antes que el examen de la asignatura a .
$T_{saa'}^-$	Variable entera que indica para el estudiante s el número de segmentos temporales entre los exámenes a los que se presenta de la asignatura a y la asignatura a' , si el examen de la asignatura a se hace antes que el examen de la asignatura a' .
$YT_{saa'}^+$	Variable binaria con valor de 1 en caso de que el examen de la asignatura a' tenga lugar antes que el de a , y, de 0, en caso contrario.
$YT_{saa'}^-$	Variable binaria con valor de 1 en caso de que el examen de la asignatura a tenga lugar antes que el de a' , y, de 0, en caso contrario.
$FO1$	Variable entera que almacena el valor obtenido para la primera función objetivo.
$FO2$	Variable entera que almacena el valor obtenido para la segunda función objetivo.
$FO3$	Variable entera que almacena el valor obtenido para la tercera función objetivo.

Tabla 6. Descripción de las variables de decisión del modelo matemático extraordinario. (Fuente: elaboración propia)

4.3.2. Funciones Objetivo

Dependiendo de las prioridades del decisor/a, es posible identificar diferentes funciones objetivo que modelan preferencias diferentes a la hora de definir las fechas de los exámenes en caso de que sea posible o no satisfacer simultáneamente las restricciones establecidas.

A continuación, se describen las tres funciones objetivo planteadas. Llegados a este punto es importante resaltar que la FO1 y FO2 intentan maximizar la satisfacción desde el punto de vista del profesorado asumiendo que es posible respetar el intervalo mínimo de tiempo entre dos exámenes consecutivos de un mismo estudiante para todo el alumnado. Por el contrario, la FO3 sólo tiene sentido plantearla cuando la anterior restricción hace que la solución sea no factible, motivo por el que, en ese caso, se intenta minimizar las veces que esto ocurre, maximizando de esta manera la satisfacción del estudiantado.

1. FO1: Minimizar la fecha de finalización del último examen. Mediante la función objetivo (4. 1) se pretende que los profesores dispongan del máximo tiempo posible para poder corregir los exámenes disminuyendo el estrés al que éstos se encuentran sometidos.

$$Min[z1] = Pmax \quad (4. 1)$$

2. FO2: Minimizar las fechas de exámenes del global de los estudiantes. Para ello, mediante la minimización de la función objetivo (4. 2) se intentarán realizar en primer lugar los exámenes con mayor número de estudiantes con objeto de que los profesores dispongan de más tiempo para corregir las asignaturas con mayor número de estudiantes. Sin embargo, al minimizar la suma total de todas las asignaturas, siempre que se respete el intervalo mínimo entre exámenes, también tenderá a programar todos los exámenes lo antes posible, independientemente del número de estudiantes.

$$Min[z2] = \sum_{a,p} ns_a * Y_{ap} * p \quad (4.2)$$

3. FO3: La función objetivo (4.3) pretende minimizar el número de veces que no es posible respetar el intervalo mínimo entre exámenes para un estudiante. Mediante este objetivo se busca la máxima satisfacción desde el punto de vista del estudiantado. A pesar de que, en casos concretos, será muy complicado (o incluso no factible) asegurar un intervalo mínimo entre exámenes para todo el conjunto de estudiantes. Siempre se intentará favorecer al mayor número posible de éstos. El motivo de dividir entre 2 se debe a evitar realizar un recuento doble, p.e. si no se cumpliera el intervalo mínimo para el alumno 1 entre los exámenes 1 y 2, la variable $YSA_{saa'}$ tendrá valor 1 para los índices [1,1,2] pero también para [1,2,1]. Dividiendo entre dos se contabiliza este caso como una única situación en la que se viola el intervalo mínimo entre exámenes, de manera que la FO3 nos proporcionaría el número de veces reales que esto sucede.

$$Min[z3] = \sum_{s,a,a' \neq a} \frac{YSA_{saa'}}{2} \quad (4.3)$$

4.3.3. Restricciones

El modelo cuenta con un total de 19 ecuaciones e inecuaciones a través de las que se modelan 7 restricciones diferentes.

1. La restricción (4.4) obliga a que para cada examen de cada asignatura, se defina una y sólo una fecha p dentro de un rango previamente establecido, es decir, $p \leq ne$. El objetivo es evitar que se asigne más de una fecha de examen p al examen de una asignatura a y además que ésta pertenezca al intervalo considerado. Se podrá definir una fecha de examen para una asignatura a , haciendo uso del horario de mañana o tarde (periodos p).

$$\sum_{p=1}^{p=ne} Y_{ap} = 1 \quad \forall a \quad (4.4)$$

2. La restricción (4.5) permite calcular la fecha de finalización más tardía de todos los exámenes ($Pmax$) cuando esta fecha se minimiza FO1 o una cota superior de la misma cuando no se optimiza esta FO1 (4.6). El producto, en la ecuación (4.5), de la variable Y_{ap} por el periodo en que se realiza dicho examen a , debe ser inferior a la variable $Pmax$, para todas y cada una de las asignaturas y periodos temporales; al mismo tiempo $Pmax$ no puede ser mayor que la variable ne .

$$Y_{ap} * p \leq P_{max} \quad \forall a, p \quad (4.5)$$

$$P_{max} \leq ne \quad (4.6)$$

3. La fecha de realización del examen extraordinario por parte de cada alumno s en cada asignatura a y en cada periodo p , debe coincidir con la fecha del examen asignado a dicha asignatura siempre y cuando el alumno haya solicitado dicho examen ($r_{sa} = 1$), como se observa en la siguiente ecuación (4. 7):

$$Y_{S_{sap}} = r_{sa} * Y_{ap} \quad \forall s, a, p \quad (4.7)$$

4. Restricciones para controlar el mínimo intervalo entre exámenes para un mismo estudiante s . Se contemplan dos alternativas en función de si se desea respetar el intervalo $dmin$, o bien no se desea o la solución anterior da no factible. Será necesario activar la opción a o b.

- a. Se cumple distancia mínima: Con la restricción (4. 8) se asegura que ningún estudiante tiene dos exámenes consecutivos con una separación inferior a $dmin$, es decir, se asegura de que se cumpla el intervalo mínimo en todos los casos y para todos los estudiantes.

$$\sum_{p' \geq p}^{p' + dmin - 1} \sum_a Y_{S_{sap'}} \leq 1 \quad \forall s, p \leq ne - dmin + 1 \quad (4.8)$$

- b. No se cumple distancia mínima: En este caso, será necesario llevar a cabo el cálculo del tiempo entre exámenes consecutivos en el caso de que sí se permita que no se respete el mínimo intervalo, pues en ocasiones es imposible garantizar dicho intervalo para todos los estudiantes.

A través de la ecuación (4. 9) se garantiza que cuando la diferencia entre $T_{saa'}^+$ y $T_{saa'}^-$ es negativa (porque se hace primero el examen de la asignatura a y luego el del a'), ese tiempo entre exámenes se almacene en la variable $T_{saa'}^-$. Mientras que, si se hace primero el del a' y luego el de a , el tiempo entre exámenes será positivo y por tanto se almacenará en $T_{saa'}^+$.

$$\sum_p p * r_{sa} * r_{sa'} * Y_{S_{sap}} - \sum_{p'} p' * r_{sa} * r_{sa'} * Y_{S_{sa'p'}} = T_{saa'}^+ - T_{saa'}^- \quad \forall s, a, a' \neq a \quad (4.9)$$

Mediante la ecuación (4. 10), la variable binaria $YSA_{saa'}$ adquiere el valor de 1 cuando los exámenes a y a' tienen una distancia temporal menor al tiempo mínimo entre exámenes fijado, $dmin$; y de 0, en caso contrario.

$$dmin * r_{sa} * r_{sa'} - T_{saa'}^+ - T_{saa'}^- \leq YSA_{saa'} * ne \quad \forall s, a, a' \neq a \quad (4.10)$$

Con las siguientes restricciones (4. 11), (4. 12), (4. 13), (4. 14), (4. 15) y (4. 16) se fuerza a que solo una de las variables $T_{saa'}^+$ y $T_{saa'}^-$ pueda ser positiva, pues no es posible que ambas sean positivas, puesto que se estaría indicando, por un lado, que el examen a es antes que el examen a' , y por otro que a' tiene lugar antes que a , lo cual es una incongruencia.

$$T_{saa'}^+ \leq ne * r_{sa} * r_{sa'} * YT_{saa'}^+ \quad \forall s, a, a' \neq a \quad (4.11)$$

$$T_{saa'}^- \leq ne * r_{sa} * r_{sa'} * YT_{saa'}^- \quad \forall s, a, a' \neq a \quad (4.12)$$

$$YT_{saa'}^+ \leq T_{saa'}^+ \quad \forall s, a, a' \neq a \quad (4.13)$$

$$YT_{saa'}^- \leq T_{saa'}^- \quad \forall s, a, a' \neq a \quad (4.14)$$

$$YT_{saa'}^+ + YT_{saa'}^- \leq r_{sa} * r_{sa'} \quad \forall s, a, a' \neq a \quad (4.15)$$

$$YT_{saa'}^+ + YT_{saa'}^- = 0 \quad \forall s, a, a' = a \quad (4.16)$$

5. La variable $YSA_{saa'}$ solo puede adquirir valor de 1 cuando el estudiante se va a presentar a ambos exámenes, pues en el caso de que un estudiante sólo se presente al examen a , o a' , siempre se cumplirá con la distancia mínima requerida entre ambos. Esto se consigue mediante las restricciones ((4. 17) y ((4. 18):

$$YSA_{saa'} \leq r_{sa} * r_{sa'} \quad \forall s, a, a' = a \quad (4.17)$$

$$YSA_{saa'} = 0 \quad \forall s, a, a' = a \quad (4.18)$$

6. A través de la restricción (4. 19) se fuerza a que un alumno no tenga dos exámenes en el mismo periodo temporal. Si para cada estudiante y periodo, el sumatorio indicado a continuación superara el valor de 1, significaría que existe un solape de dos exámenes distintos para un alumno s en un periodo p .

$$\sum_a YS_{sap} \leq 1 \quad \forall s, p \quad (4.19)$$

7. Para finalizar, se incluyen tres restricciones auxiliares (4. 20), (4. 21) y (4. 22) con el fin de mostrar el valor obtenido en las tres funciones objetivos, en vez de únicamente aquella que está siendo optimizada.

$$FO1 = Pmáx \quad (4. 20)$$

$$FO2 = \sum_{a,p} nS_a * Y_{ap} * p \quad (4. 21)$$

$$FO3 = \sum_{s,a,a' \neq a} \frac{YSA_{saa'}}{2} \quad (4. 22)$$

Para terminar, se incluye la naturaleza de las variables de decisión:

$Y_{ap}, YS_{sap}, YSA_{saa'}, YT^+_{saa'}, YT^-_{saa'}$ Binarias

$Pmax, T^+_{saa'}, T^-_{saa'}, FO1, FO2, FO3$ Enteras

4.4. Arquitectura de la herramienta de optimización para la programación de exámenes extraordinarios

Una vez formulado el modelo matemático para resolver el problema descrito, es necesario implementarlo en un lenguaje comprensible por el ordenador para, posteriormente, obtener la solución óptima a través de un *solver* comercial. En el caso objeto de estudio la arquitectura de la herramienta propuesta se compone de los siguientes elementos técnicos (Figura 9):

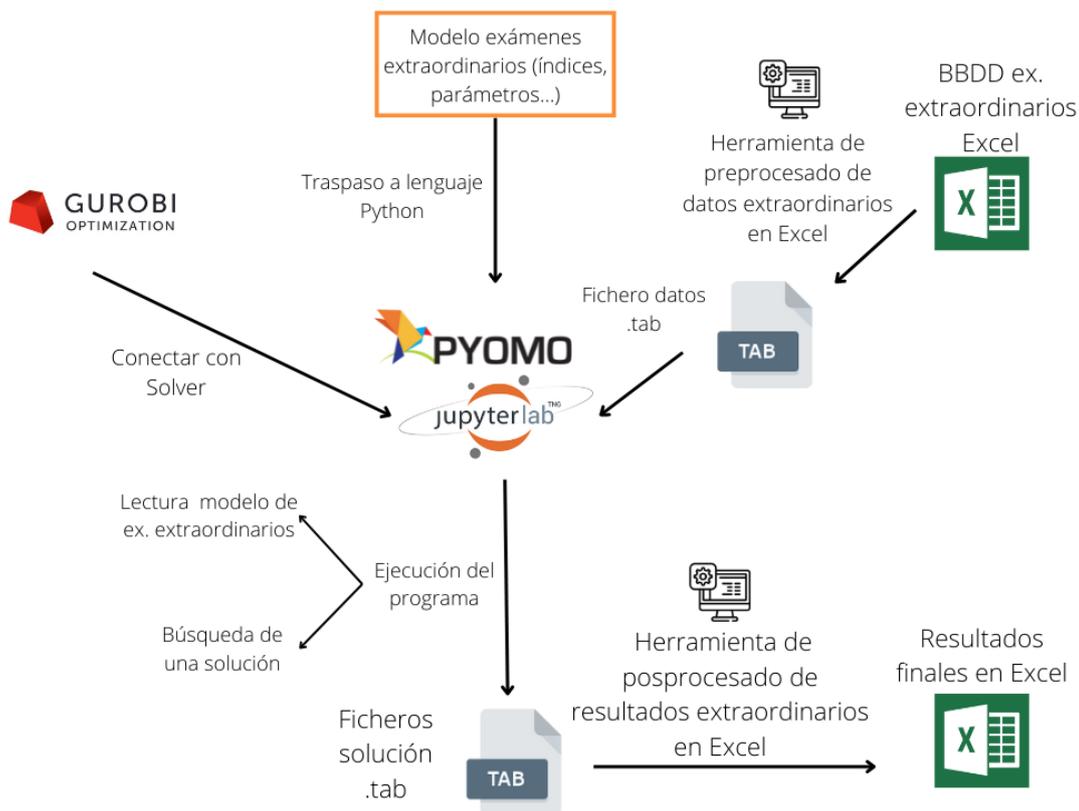


Figura 9. Arquitectura técnica de la herramienta de optimización para la programación de exámenes extraordinarios. (Fuente: elaboración propia).

1. Paquete de optimización desarrollado en Python: **Pyomo 6.4.1 (Python Optimization Modeling Objects)** por ser un lenguaje de programación de alto nivel libre e intuitivo con una amplia disponibilidad de funciones y bibliotecas (Hart, Watson, & Woodruff, 2022).
2. Interfaz de programación: **JupyterLab 3.4.2**. La razón principal para elegir esta interfaz reside en su sencillez. Es un programa web muy visual que facilita mucho la programación para usuarios no experimentados. Cuenta con una amplia biblioteca de documentación online (<https://jupyter.org>) para aprender a trabajar con él. Se basa en una computación flexible, interactiva y exploratoria (Pérez, 2022).
3. Solver elegido para resolver el modelo: **Gurobi 9.5.1**. La selección de este solver (3) se debe a que (Rothberg, Bixby, & Gu, 2022): resuelve problemas de programación lineal entera mixta de alta complejidad, ofrece una licencia gratuita para estudiantes y es

compatible con una amplia gama de interfaces y lenguajes de programación, y más concretamente con las ya mencionadas que se han empleado en este modelo, JupyterLab y Python.

4. Programa para generar los ficheros de datos (.tab) de entrada y los de resultados: **Microsoft Excel 2007 - 2016**. Éste no requiere conocimientos muy específicos y complejos, pues su uso es más común y es totalmente compatible con la interfaz de programación Jupyter, tal que permite exportar datos a otros formatos comunes.

A parte de la generación de ficheros de datos, también se emplea Excel como herramienta de preprocesado y posprocesado de datos. El objetivo consiste en anonimizar los datos procedentes de la ETSII, pues hay información que no se puede incluir por motivos de confidencialidad, como puede ser los nombres de los estudiantes. A la hora del posprocesado de datos, se crea una herramienta que, tras introducir los datos del escenario concreto ejecutado en el modelo, automatiza la creación de tablas donde visualizar los resultados obtenidos. Por un lado se crea una tabla que incluye un listado de las asignaturas programadas y la fecha y periodo en que tendrá lugar su examen. Paralelamente, se crea otra tabla destinada a los estudiantes, donde se visualiza qué examen realiza cada alumno en cada uno de los periodos disponibles.

En la Figura 9 se muestra la arquitectura que integra y relaciona los anteriores componentes. Una vez formulado el modelo de programación lineal entera mixta se procede a transformarlo en un modelo comprensible por el ordenador a través del lenguaje de programación Python mediante la interfaz JupyterLab.

Por otro lado, los datos de entrada al modelo se encuentran almacenados en Hojas de MS Excel, por lo que deben ser tratadas convenientemente para que se puedan leer por el modelo programado en Python. Para ello, ha sido necesario programar una herramienta de preprocesado de los datos en Visual Basic. Como resultado se obtienen los ficheros de datos en formato .tab, los cuales ya pueden utilizarse en JupyterLab junto con las librerías de Pyomo. Seguidamente, se debe conectar el Solver Gurobi en la plataforma para así poder proceder a la ejecución y resolución del modelo. Este proceso se divide en dos partes: lectura del modelo y posterior búsqueda de una solución óptima. Finalmente, se obtiene como solución al problema un conjunto de ficheros formato .tab con los resultados. Estos se exportan a Excel a través de una herramienta de posprocesado también programada en Visual Basic para ser tratados y poder analizar los resultados obtenidos en tablas que permiten visualizar los calendarios generados.

A la hora de modelar, es importante distinguir entre un modelo concreto o un modelo abstracto. En este caso, se trata de un modelo abstracto, basado en parámetros desconocidos, pues no se especifica su valor. En la práctica, se busca crear modelos que sean aptos para ejecutarse en casos distintos. Para ello, bastaría con modificar los ficheros de datos de entrada. De esta manera, el diseño de un programa abstracto permite su posterior aplicación en escenarios distintos. Además, si se deseara aplicar pequeñas modificaciones (activar/desactivar restricciones, cambiar de función objetivo activada...) simplemente se efectúan los cambios en el propio modelo y se vuelve a ejecutar.

4.5. Aplicación a un caso real: análisis de resultados.

Tras la explicación de la estructura y arquitectura técnica de la herramienta empleada para la implementación de un modelo de optimización ejecutable, se procede a la validación de este mediante un caso con datos reales. Cabe mencionar que, previamente a la ejecución de la herramienta con este caso real, se han realizado validaciones parciales con conjuntos de datos más reducidos y escenarios extremos. Una vez validadas las soluciones obtenidas se procede a resolver un caso real de la ETSII (Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial), que se corresponde con las solicitudes de la segunda convocatoria del curso 21-22 de los exámenes extraordinarios de la escuela.

A continuación, se realiza una explicación más detallada del conjunto de datos anonimizados para este TFG, así como del análisis realizado a los resultados obtenidos.

4.5.1. Descripción de los datos de entrada

Los datos empleados proceden de una convocatoria de exámenes extraordinaria de las titulaciones de Grado impartidas en la ETSII de los últimos años. Es por lo que el conjunto empleado es muy similar a los casos en los que se podrá hacer uso de la herramienta en un futuro próximo. El conjunto de datos empleado es el siguiente:

- Se dispone de un total de 10 periodos temporales divididos en mañanas y tardes, lo equivalente a cinco días lectivos, en este caso desde el 11-15 julio.
- Se desean programar los exámenes de un total de 43 asignaturas para las que se ha solicitado exámenes extraordinarios pertenecientes a los 5 grados diferentes de la ETSII.
- El total de estudiantes que han solicitado examinarse de alguna asignatura asciende a 90.
- Se definen 2 periodos como distancia mínima entre dos exámenes para un alumno, es decir, si realiza un examen el día 11 de julio por la mañana, no se le deberá asignar el siguiente examen hasta la mañana del día 12 de Julio.
- El número total de estudiantes matriculados en cada asignatura (a) que solicita el examen extraordinario de la misma viene indicado por el parámetro $ns(a)$ (Figura 10).
- La media de estudiantes que solicitan el examen por asignatura es de 4. De esta manera, se puede sintetizar en que el 72% de las asignaturas tienen de 1 a 4 estudiantes que las solicitan, y el 28% restante son asignaturas con mayor volumen de solicitantes. La asignatura con mayor número de solicitudes cuenta con un total de 28 estudiantes.

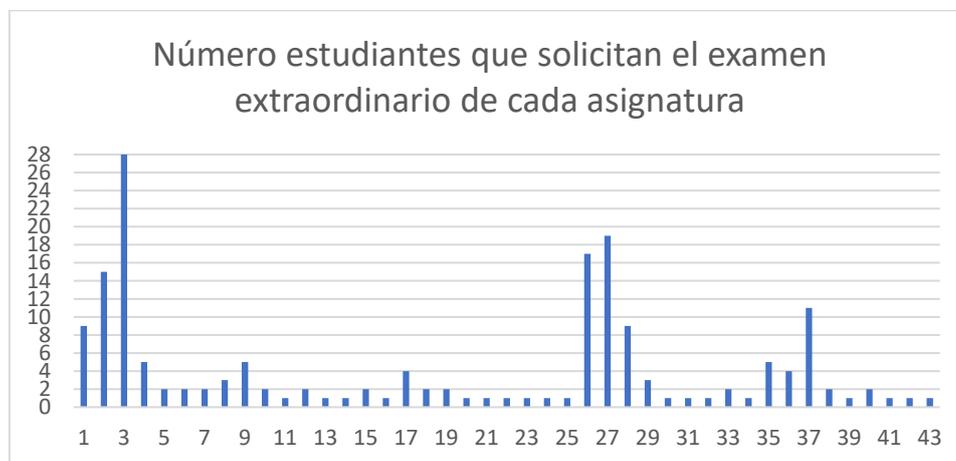


Figura 10. Número de estudiantes que solicitan el examen de cada asignatura (Fuente: elaboración propia)

Posteriormente se procede al pretratamiento de los datos de entrada con la herramienta en Excel diseñada a tal efecto, la cual proporciona los datos en el formato requerido por la implementación del modelo en Python. Tras todo ello, se puede proceder a la ejecución del programa, seleccionando la función objeto y restricciones pertinentes, lo que permitirá la obtención de resultados. Con objeto de verificar la validez del modelo planteado ante diferentes situaciones, se definen una serie de escenarios bajo los que se analizan las diferentes soluciones obtenidas.

4.5.2. Definición de escenarios

Se definen 6 escenarios que permitirán ejecutar el modelo matemático en sus diferentes versiones y así analizar los resultados obtenidos en cada uno de ellos, comparándolos entre sí y recalcando las similitudes, diferencias y detalles a considerar. A continuación, en la Figura 11 se puede ver esquematizado los distintos casos planteados indicando la función objetivo y la restricción que incluye o no cada uno de ellos. Los 6 escenarios se agrupan en dos bloques: el primero de ellos ejecuta el modelo con las asignaturas de todos los títulos y el segundo sólo con las asignaturas de un título. Realmente, la programación de exámenes extraordinarios se podría realizar de manera independiente para cada título, salvo en el caso de que se hubiesen producido solicitudes para asignaturas transversales a varios títulos donde se encuentran matriculados estudiantes de diferentes grados o másteres. Por otro lado, ejecutar varias veces el modelo con la carga de datos independiente también resulta más ineficiente, motivo por el que puede ser interesante comparar los resultados obtenidos de resolver el modelo conjuntamente para todos los títulos o hacerlo de manera independiente. Es por ello por lo que, en el caso que nos ocupa, el primer bloque integrado por los tres primeros escenarios se plantea con la ejecución del modelo contemplando todas las asignaturas mientras que el segundo bloque plantea tres escenarios análogos, pero sólo para el título más representativo y numeroso, GITI. Se pretende analizar si los resultados se ven alterados y en qué caso se favorece o perjudica más a los estudiantes de cada grado por separado. Se ha elegido GITI pero se podría realizar la misma comparación de manera análoga con el resto de las titulaciones. Por motivos de limitación de espacio para el TFG no se resuelven independiente el resto de títulos.

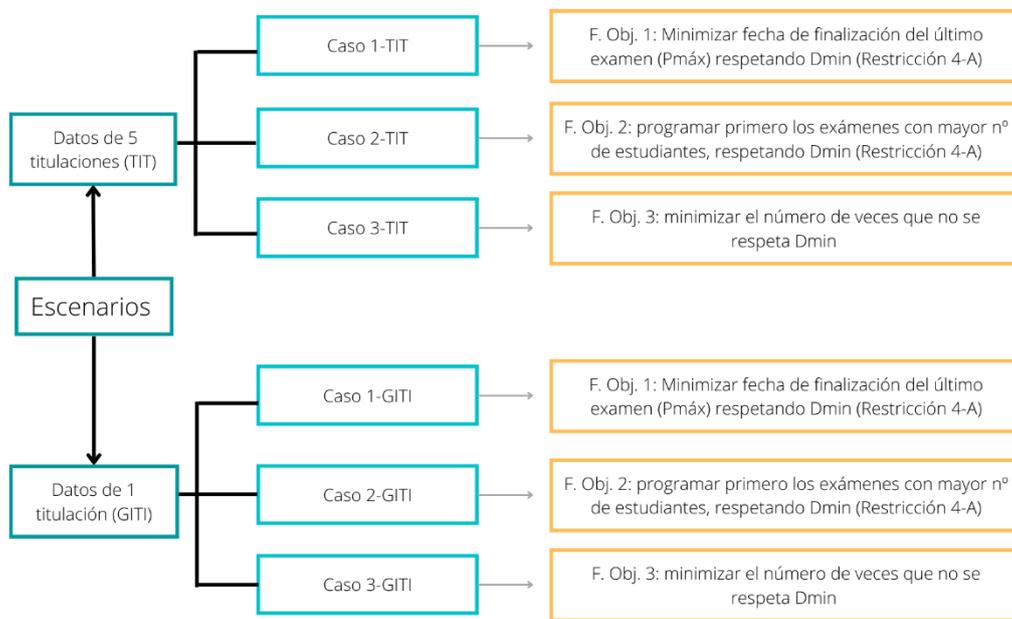


Figura 11. Definición de Escenarios (Fuente: elaboración propia).

Se plantean 3 primeros casos que usan como datos de partida aquellos descritos en el apartado anterior (4.5.1. Descripción de los datos de entrada). Se plantean para las cinco titulaciones tres casos en los que en cada uno se evalúa una de las tres funciones objetivos definidas. Además, como se especifica en la figura, para los casos 1-TIT y 2-TIT se debe respetar la distancia entre dos exámenes consecutivos para todos los estudiantes, y en el caso 3-TIT no es obligatorio, pero la función objetivo consiste en minimizar el número de veces que esto se incumple. Este último caso propuesto tiene sentido cuando se obtiene una solución no factible en uno de los dos primeros casos.

A continuación, se plantean los mismos tres casos, pero esta vez se emplean los datos de entrada de una única titulación, siendo extraídos de la partida de datos descrita. Se escogen aquellos datos pertenecientes a la titulación con código 154, equivalente al Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales (GITI). En esta segunda partida de datos, se reduce a 16 el total de asignaturas y a 43 los estudiantes matriculados en alguna de ellas. El intervalo temporal obviamente sigue siendo el mismo, pero ahora pasan a ser el 82% de las asignaturas las que tienen entre 1-5 estudiantes existiendo tan sólo tres asignaturas con un número superior.

4.5.3. Análisis de resultados

Una vez descrito el conjunto de datos de entrada al caso real, se procede a la ejecución de la herramienta de optimización para poder analizar los resultados obtenidos.

CASO 1-TIT: Minimizar la fecha de finalización del último examen.

En este caso se busca minimizar $P_{máx}$ (último periodo en el que tiene lugar un examen), garantizando el cumplimiento de la distancia mínima entre exámenes (d_{min}), que en este caso

tiene un valor de 2 periodos. Esto corresponde a la optimización de la primera función objetivo (4. 1) incluyendo también en el modelo a la restricción 4-A (4. 8).

En la Tabla 7 se puede observar la solución al modelo o calendario de exámenes, donde para cada título y asignatura se especifica el número de estudiantes y el periodo temporal en el que se realizará (p) el cual se ha traducido a una fecha y hora concreta en función de si p era de mañana o tarde. Co. Por otro lado, en el Anexo; Tabla 1, se muestra la solución obtenida a modo de calendario por estudiante, donde se incluye en cada uno de los periodos definidos el código de la asignatura que tienen examen. Esto permite visualizar rápidamente como se mantiene la distancia mínima de dos periodos entre dos exámenes consecutivos de cada alumno.

Por último, el valor de la variable a optimizar en la primera función objetivo, $P_{máx}$, es de 9. Esto indica que en el décimo y último periodo no se ha programado ningún examen, por lo que los profesores podrán empezar a corregir antes y tener mayor margen hasta la fecha de entrega de actas. Sin embargo, puede ocurrir que exámenes con un número importante de estudiantes (como por ejemplo, 12961-Tecnología Nuclear con 17 estudiantes) se realicen posteriormente a otros con menos estudiantes (12955-Máquinas hidráulicas con 1 estudiante), aspecto poco deseable, motivo por el que se plantea la siguiente función objetivo.

Titulo	a	Nombre asignatura	Fecha	p	ns(a)
154	11426	Estructuras	M 12/07 - 8:00	3	9
154	11425	Tecnología de la Construcción	X 13 /07 - 8:00	5	15
154	11428	Tecnología eléctrica	L 11 /07 - 8:00	1	28
154	11427	Tecnología energética	J 14 /07 - 8:00	7	5
154	11408	Sistemas electrónicos	J 14 /07 - 8:00	7	2
154	11416	Sistemas de Producción y Fabricación	V 15 /07 - 8:00	9	2
154	11429	Máquinas eléctricas	V 15 /07 - 8:00	9	2
154	11431	Tecnología electrónica	J 14 /07 - 8:00	7	3
154	11424	Ingeniería Gráfica	V 15 /07 - 8:00	9	5
154	11432	Tecnología informática industrial	M 12 /07 - 8:00	3	2
154	11435	Matemáticas III	L 11 /07 - 8:00	1	1
154	11423	Tecnología de máquinas	V 15 /07 - 8:00	9	2
154	11407	Sistemas automáticos	L 11 /07 - 8:00	1	1
154	11418	Tecnología del medio ambiente	L 11 /07 - 8:00	1	1
154	11421	Máquinas hidráulicas	V 15 /07 - 8:00	9	2
154	11419	Proyectos	J 14 /07 - 8:00	7	1
155	11490	Métodos cuantitativos de Org. Industrial	L 11 /07 - 8:00	1	4
155	11494	Planificación de Producción e Inventario	J 14 /07 - 8:00	7	2
155	11478	Sistemas electrónicos	V 15 /07 - 8:00	9	2
155	11499	Análisis contable y Financiero Org. industrial	L 11 /07 - 8:00	1	1
155	11501	Control Estadístico de la Calidad	V 15 /07 - 8:00	9	1
155	11527	Tecnología de la Construcción	L 11 /07 - 8:00	1	1
155	11534	Tecnología Energética	V 15 /07 - 8:00	9	1
155	11485	Termodinámica	J 14 /07 - 8:00	7	1
155	11495	Análisis de costes y selección de inversiones industriales	V 15 /07 - 8:00	9	1
174	12961	Tecnología Nuclear	V 15 /07 - 8:00	9	17
174	12954	Sistemas y Tecnología eléctricos	L 11 /07 - 8:00	1	19

		Energía eólica y Generación Eléctrica con			
174	12963	Energías Renovables	X 13 /07 - 8:00	5	9
174	12959	Centrales Térmicas. Cogeneración	J 14 /07 - 8:00	7	3
174	12952	Frío y Climatización	J 14 /07 - 8:00	7	1
174	12955	Máquinas Eléctricas	X 13 /07 - 8:00	5	1
174	12949	Física III	V 15 /07 - 8:00	9	1
174	12941	Termodinámica Técnica	M 12/07 - 15:00	4	2
175	13059	Instrumentación biomédica	J 14/07 - 15:00	8	1
		Análisis y determinación estructural en			
187	13988	Química Orgánica	V 15 07 - 8:00	9	5
187	12298	Máquinas de fluidos	M 12/07 - 8:00	3	4
187	12272	Control e instrumentación de pcsos químicos II	L 11/07 - 8:00	1	11
187	12288	Procesos industriales de Ingeniería Química	X 13/07 - 8:00	5	2
187	12289	Análisis y simulación de procesos	M 12/07 - 8:00	3	1
187	12273	Ampliación de Ciencia de Materiales	J 14/07 - 8:00	7	2
187	12275	Ciencia de materiales	X 13/07 - 8:00	5	1
187	12285	Operaciones de separación	M 12/07 - 8:00	3	1
187	12276	Termodinámica	J 14/07 - 8:00	7	1

Tabla 7. Asignación de fechas a asignaturas para el caso 1-TIT (Fuente: elaboración propia).

CASO 2-TIT: Programar primero los exámenes con mayor número de estudiantes respetando la distancia mínima entre exámenes.

Este objetivo corresponde con la segunda función objetivo (4. 2), busca una ordenación decreciente de las fechas de los exámenes en función del total de estudiantes solicitantes del examen de cada asignatura. Se mantiene, igual que en el caso anterior, la obligatoriedad de mantener la distancia mínima entre exámenes consecutivos para todos los estudiantes.

En la Figura 10 se puede observar que la asignatura con mayor número de estudiantes que han solicitado el examen extraordinario es la 3 (código 11428), por lo que es efectivamente la que se debe programar en el primer periodo. Siguiendo este mismo esquema, la distribución de exámenes generada es la siguiente, desarrollada en la Tabla 8. Tal y como se comentó anteriormente, al minimizar la función objetivo 2 se minimiza la suma total de la fecha de todas las asignaturas por el número de estudiantes, siempre que se respete el intervalo mínimo entre exámenes. Con esta función objetivo se tenderá a programar todos los exámenes lo antes posible, independientemente del número de estudiantes. Esto se puede observar en el caso de 11435 Matemáticas III de la 154 que con tan sólo un estudiante, se realiza el primer intervalo temporal. Por este motivo, indirectamente la función objetivo 2 tiende a minimizar también la fecha de finalización del último examen que, en este caso, al igual que en el caso anterior es justamente 9. Sin embargo, el valor de la variable P_{\max} es 10 que actúa como cota, pues en ningún momento es minimizada.

Tit	Cdg	Nombre asignatura	Segmento temporal	p	Ns(a)
154	11426	Estructuras	X 13 /07 - 8:00	5	9
154	11425	Tecnología de la Construcción	M 12 /07 - 8:00	3	15
154	11428	Tecnología eléctrica	L 11 /07 - 8:00	1	28
154	11427	Tecnología energética	V 15 /07 - 8:00	9	5
154	11408	Sistemas electrónicos	M 12 /07 - 8:00	3	2
154	11416	Sistemas de Producción y Fabricación	M 12 /07 - 8:00	3	2

154	11429	Máquinas eléctricas	X 13 /07 - 8:00	5	2
154	11431	Tecnología electrónica	M 12 /07 - 8:00	3	3
154	11424	Ingeniería Gráfica	J 14 /07 - 8:00	7	5
154	11432	Tecnología informática industrial	X 13 /07 - 8:00	5	2
154	11435	Matemáticas III	L 11 /07 - 8:00	1	1
154	11423	Tecnología de máquinas	M 12 /07 - 8:00	3	2
154	11407	Sistemas automáticos	L 11 /07 - 8:00	1	1
154	11418	Tecnología del medio ambiente	L 11 /07 - 8:00	1	1
154	11421	Máquinas hidráulicas	J 14 /07 - 8:00	7	2
154	11419	Proyectos	L 11 /07 - 8:00	1	1
155	11490	Métodos cuantitativos de Organización Industrial	L 11 /07 - 8:00	1	4
155	11494	Planificación de Producción e Inventario	X 13 /07 - 8:00	5	2
155	11478	Sistemas electrónicos	M 12 /07 - 8:00	3	2
155	11499	Análisis contable y financiero para la Org. industrial	L 11 /07 - 8:00	1	1
155	11501	Control Estadístico de la Calidad	M 12 /07 - 8:00	3	1
155	11527	Tecnología de la Construcción	L 11 /07 - 8:00	1	1
155	11534	Tecnología Energética	X 13 /07 - 8:00	5	1
155	11485	Termodinámica	M 12 /07 - 8:00	3	1
		Análisis de costes y selección de inversiones			
155	11495	industriales	M 12 /07 - 8:00	3	1
174	12961	Tecnología Nuclear	M 12 /07 - 8:00	3	17
174	12954	Sistemas y Tecnología eléctricos	L 11 /07 - 8:00	1	19
		Energía eólica y Generación Eléctrica con Energías			
174	12963	Renovables	X 13 /07 - 8:00	5	9
174	12959	Centrales Térmicas. Cogeneración	J 14 /07 - 8:00	7	3
174	12952	Frío y Climatización	X 13 /07 - 8:00	5	1
174	12955	Máquinas Eléctricas	J 14 /07 - 8:00	7	1
174	12949	Física III	M 12 /07 - 8:00	3	1
174	12941	Termodinámica Técnica	X 13 /07 - 8:00	5	2
175	13059	Instrumentación biomédica	L 11 /07 - 8:00	1	1
187	13988	Análisis y determinación estructural en Q. Orgánica	M 12 /07 - 8:00	3	5
187	12298	Máquinas de fluidos	X 13 /07 - 8:00	5	4
187	12272	Control e instrumentación de procesos químicos II	L 11 /07 - 8:00	1	11
187	12288	Procesos industriales de Ingeniería Química	M 12 /07 - 8:00	3	2
187	12289	Análisis y simulación de procesos	M 12 /07 - 8:00	3	1
187	12273	Ampliación de Ciencia de Materiales	M 12 /07 - 8:00	3	2
187	12275	Ciencia de materiales	J 14 /07 - 8:00	7	1
187	12285	Operaciones de separación	X 13 /07 - 8:00	5	1
187	12276	Termodinámica	L 11 /07 - 8:00	1	1

Tabla 8. Asignación de fechas a asignaturas para el caso 2-TIT (Fuente: elaboración propia).

Se obtiene un valor de 535 en la función objetivo y se cumple con la distancia mínima entre exámenes para todos los estudiantes, como se indica con mayor claridad en el Anexo; Tabla 2.

CASO 3-TIT: Minimizar el número de ocasiones en que se incumple el intervalo mínimo entre exámenes para los estudiantes.

Se analiza la función objetivo (4. 3), la cual, a pesar de permitirse el incumplimiento del intervalo mínimo entre exámenes, se persigue minimizar las veces en que éste es incumplido. Este

escenario tiene sentido cuando, al ejecutar alguno de los dos primeros casos (1-TIT o 2-TIT) se obtiene una solución infactible porque no se puede garantizar el intervalo *dmin* entre exámenes en algún caso. Es por esta razón que en este caso se permite la violación del intervalo mediante la activación de la restricción 4-B (4. 9). Dado el conjunto de datos y la factibilidad de los casos anteriores, ahora se consigue minimizar la función objetivo hasta el valor de 0, pues se puede garantizar dicha distancia de dos periodos para todos los estudiantes. En la Tabla 9 se indica la fecha de realización del examen de cada asignatura.

Tit	Cód.	Nombre asignatura	Segmento temporal	p	Ns (a)
154	11426	Estructuras	V 15 /07 - 15:00	10	9
154	11425	Tecnología de la Construcción	J 14 /07 - 8:00	7	15
154	11428	Tecnología eléctrica	X 13 /07 - 8:00	5	28
154	11427	Tecnología energética	L 11 /07 - 8:00	1	5
154	11408	Sistemas electrónicos	L 11 /07 - 8:00	1	2
154	11416	Sistemas de Producción y Fabricación	V 15 /07 - 15:00	10	2
154	11429	Máquinas eléctricas	L 11 /07 - 8:00	1	2
154	11431	Tecnología electrónica	J 14 /07 - 15:00	8	3
154	11424	Ingeniería Gráfica	M 12 /07 - 8:00	3	5
154	11432	Tecnología informática industrial	L 11 /07 - 8:00	1	2
154	11435	Matemáticas III	M 12 /07 - 15:00	4	1
154	11423	Tecnología de máquinas	V 15 /07 - 8:00	9	2
154	11407	Sistemas automáticos	M 12 /07 - 8:00	3	1
154	11418	Tecnología del medio ambiente	X 13 /07 - 8:00	5	1
154	11421	Máquinas hidráulicas	M 12 /07 - 8:00	3	2
154	11419	Proyectos	L 11 /07 - 8:00	1	1
		Métodos cuantitativos de Organización			
155	11490	Industrial	J 14 /07 - 15:00	8	4
155	11494	Planificación de Producción e Inventario	M 12 /07 - 15:00	4	2
155	11478	Sistemas electrónicos	L 11 /07 - 8:00	1	2
		Análisis contable y financiero para la			
155	11499	Organización industrial	L 11 /07 - 8:00	1	1
155	11501	Control Estadístico de la Calidad	M 12 /07 - 15:00	4	1
155	11527	Tecnología de la Construcción	V 15 /07 - 8:00	9	1
155	11534	Tecnología Energética	J 14 /07 - 8:00	7	1
155	11485	Termodinámica	L 11 /07 - 15:00	2	1
		Análisis de costes y selección de inversiones			
155	11495	industriales	L 11 /07 - 8:00	1	1
174	12961	Tecnología Nuclear	M 12 /07 - 8:00	3	17
174	12954	Sistemas y Tecnología eléctricos	V 15 /07 - 15:00	10	19
		Energía eólica y Generación Eléctrica con			
174	12963	Energías Renovables	L 11 /07 - 8:00	1	9
174	12959	Centrales Térmicas. Cogeneración	X 13 /07 - 15:00	6	3
174	12952	Frío y Climatización	J 14 /07 - 8:00	7	1
174	12955	Máquinas Eléctricas	L 11 /07 - 8:00	1	1
174	12949	Física III	M 12 /07 - 15:00	4	1
174	12941	Termodinámica Técnica	L 11 /07 - 8:00	1	2
175	13059	Instrumentación biomédica	L 11 /07 - 8:00	1	1

		Análisis y determinación estructural en			
187	13988	Química Orgánica	L 11 /07 - 8:00	1	5
187	12298	Máquinas de fluidos	V 15 /07 - 15:00	10	4
		Control e instrumentación de procesos			
187	12272	químicos II	M 12 /07 - 15:00	4	11
187	12288	Procesos industriales de Ingeniería Química	L 11 /07 - 8:00	1	2
187	12289	Análisis y simulación de procesos	L 11 /07 - 8:00	1	1
187	12273	Ampliación de Ciencia de Materiales	X 13 /07 - 15:00	6	2
187	12275	Ciencia de materiales	J 14 /07 - 15:00	8	1
187	12285	Operaciones de separación	L 11 /07 - 8:00	1	1
187	12276	Termodinámica	L 11 /07 - 8:00	1	1

Tabla 9. Asignación de fechas a asignaturas para el caso 3-TIT (Fuente: elaboración propia).

De igual manera que antes, se adjunta en los anexos la tabla que especifica el calendario de exámenes de cada estudiante. En el Anexo; Tabla 3, se puede observar que, en este caso, no se ve la programación de todos los exámenes agrupada en los primeros periodos temporales, ya que no se minimiza P_{\max} y no se expresa este deseo de que se realicen cuanto antes como también sería el caso de la Función Objetivo 2.

Tras haber ejecutado los tres primeros casos con los datos de todas las titulaciones de grado de la ETSII y haber obtenido resultados óptimos en todos ellos, procedemos a su ejecución con los datos de una única titulación: GITI (código 154). Con los datos actuales es posible, ya que no se ha solicitado el examen extraordinario de ninguna asignatura transversal a varios títulos y además no se comparten recursos comunes. Se trata de analizar las diferentes soluciones obtenidas para validar también el modelo, ya que pudiera ocurrir que cuando se optimizan todas las titulaciones simultáneamente, aunque la función objetivo resultante fuera mejor para el conjunto, una titulación se viera perjudicada en mayor medida. Para ello, se ha escogido la titulación con mayor número de solicitudes: GITI.

El objetivo consiste en identificar las diferencias entre la solución obtenida para GITI en los casos 1-TIT, 2-TIT y 3-TIT ya presentados, en comparación con los casos 1-GITI, 2-GITI y 3-GITI que se exponen a continuación.

CASO 1-GITI: Minimizar la fecha de finalización del último examen.

De igual manera que en el caso 1-TIT, se evalúa la primera función objetivo. Las fechas obtenidas para cada una de las asignaturas de dicha titulación se observan en la siguiente Tabla 10.

Se puede observar que, en comparación con las fechas obtenidas para las asignaturas pertenecientes a la titulación de GITI (154), se modifica la fecha de aquellas resaltadas en un formato negrita y cursiva. Sin embargo, el valor obtenido en la función objetivo es el mismo, se termina en el periodo 9. Además en Anexo; Tabla 4 se muestra cómo se respeta la distancia entre exámenes para todos los estudiantes.

Titulación	Código asignatura	Nombre asignatura	Segmento temporal	p	Número estudiantes
154	11426	Estructuras	M 12 /07 - 8:00	3	9
154	11425	Tecnología de la Construcción	V 15 /07 - 8:00	9	15
154	11428	Tecnología eléctrica	L 11 /07 - 8:00	1	28
154	11427	Tecnología energética	J 14 /07 - 8:00	7	5

154	11408	Sistemas electrónicos	V 15 /07 - 8:00	9	2
		Sistemas de Producción y			
		Fabricación	V 15 /07 - 8:00	9	2
154	11429	Máquinas eléctricas	X 13 /07 - 8:00	5	2
154	11431	Tecnología electrónica	M 12 /07 - 8:00	3	3
154	11424	Ingeniería Gráfica	X 13 /07 - 8:00	5	5
154	11432	Tecnología informática industrial	J 14 /07 - 8:00	7	2
154	11435	Matemáticas III	L 11 /07 - 8:00	1	1
154	11423	Tecnología de máquinas	X 13 /07 - 8:00	5	2
154	11407	Sistemas automáticos	L 11 /07 - 8:00	1	1
154	11418	Tecnología del medio ambiente	L 11 /07 - 8:00	1	1
154	11421	Máquinas hidráulicas	X 13 /07 - 8:00	5	2
154	11419	Proyectos	L 11 /07 - 8:00	1	1

Tabla 10. Asignación de fechas a asignaturas para el caso 1-GITI (Fuente: elaboración propia).

Se puede concluir que los resultados no mejoran significativamente por el hecho de ser tratados de manera independiente.

CASO 2-GITI: Programar primero los exámenes con mayor número de estudiantes respetando la distancia mínima entre exámenes.

Evaluamos la segunda función objetivo, buscando que se programen primero aquellos exámenes con más estudiantes que realizan el examen, para prolongar el margen de corrección de exámenes de los profesores. A cada asignatura se le asigna la siguiente fecha de examen (Tabla 11):

Tit	Cód.	Nombre asignatura	Segmento temporal	p	Ns(a)
154	11426	Estructuras	X 13 /07 - 8:00	5	9
154	11425	Tecnología de la Construcción	M 12 /07 - 8:00	3	15
154	11428	Tecnología eléctrica	L 11 /07 - 8:00	1	28
154	11427	Tecnología energética	V 15 /07 - 8:00	9	5
154	11408	Sistemas electrónicos	M 12 /07 - 8:00	3	2
154	11416	Sistemas de Producción y Fabricación	M 12 /07 - 8:00	3	2
154	11429	Máquinas eléctricas	X 13 /07 - 8:00	5	2
154	11431	Tecnología electrónica	M 12 /07 - 8:00	3	3
154	11424	Ingeniería Gráfica	J 14 /07 - 8:00	7	5
154	11432	Tecnología informática industrial	X 13 /07 - 8:00	5	2
154	11435	Matemáticas III	L 11 /07 - 8:00	1	1
154	11423	Tecnología de máquinas	M 12 /07 - 8:00	3	2
154	11407	Sistemas automáticos	L 11 /07 - 8:00	1	1
154	11418	Tecnología del medio ambiente	L 11 /07 - 8:00	1	1
154	11421	Máquinas hidráulicas	J 14 /07 - 8:00	7	2
154	11419	Proyectos	L 11 /07 - 8:00	1	1

Tabla 11. Asignación de fechas a asignaturas para el caso 2-GITI (Fuente: elaboración propia).

El calendario de exámenes para cada estudiante se encuentra en Anexo; Tabla 5.

En este segundo caso, comparando las Tabla 8 y Tabla 11, se puede observar que se obtiene exactamente la misma distribución de los exámenes de la titulación 154. El valor de la función objetivo en este caso es de 263, un valor significativamente inferior pues únicamente se programa el 40% de las asignaturas del caso 2-TIT.

CASO 3-GITI: Minimizar el número de ocasiones en que se viola el intervalo mínimo entre exámenes para los estudiantes.

En el último caso a analizar, se permite la violación del intervalo mínimo entre exámenes, siempre sujeto a la función objetivo de minimizar el número de veces en que esto ocurra. Tras la ejecución del programa, se obtiene un valor satisfactorio, pues se consigue un valor de 0 en este objetivo. La asignación de fechas para cada asignatura de GITI se incluye en la Tabla 12:

Tit	Cód.	Nombre asignatura	Segmento temporal	p	Ns (a)
154	11426	Estructuras	X 13 /07 - 15:00	6	9
154	11425	Tecnología de la Construcción	L 11 /07 - 8:00	1	15
154	11428	Tecnología eléctrica	M 12 /07 - 8:00	3	28
154	11427	Tecnología energética	V 15 /07 - 15:00	10	5
154	11408	Sistemas electrónicos	L 11 /07 - 8:00	1	2
154	11416	Sistemas de Producción y Fabricación	L 11 /07 - 8:00	1	2
154	11429	Máquinas eléctricas	L 11 /07 - 8:00	1	2
154	11431	Tecnología electrónica	V 15 /07 - 15:00	10	3
154	11424	Ingeniería Gráfica	J 14 /07 - 15:00	8	5
154	11432	Tecnología informática industrial	J 14 /07 - 15:00	8	2
154	11435	Matemáticas III	M 12 /07 - 15:00	4	1
154	11423	Tecnología de máquinas	V 15 /07 - 15:00	10	2
154	11407	Sistemas automáticos	L 11 /07 - 8:00	1	1
154	11418	Tecnología del medio ambiente	X 13 /07 - 8:00	5	1
154	11421	Máquinas hidráulicas	J 14 /07 - 15:00	8	2
154	11419	Proyectos	L 11 /07 - 8:00	1	1

Tabla 12. Asignación de fechas a asignaturas para el caso 3-GITI (Fuente: elaboración propia).

A continuación, en Anexo; Tabla 6 se muestra cómo se respeta la distancia de dos periodos entre todos los exámenes de cada estudiante (s).

Se puede recalcar que, comparando los casos 3-TIT y 3-GITI tan solo coinciden las fechas programadas de 5 asignaturas de un total de 16 pertenecientes a GITI, aunque en ambos casos se mantiene el mismo valor de 0 en la función objetivo.

Podemos concluir que el impacto en cada titulación de manera individual, cuando son todas tratadas como un conjunto único, no es significativo. A pesar de obtener en dos de los tres casos un calendario de exámenes diferente, en todos ellos se mantiene el mismo valor de cada función objetivo evaluada. Además, se consigue siempre que se respete la distancia mínima entre los exámenes de cada alumno y dejar el máximo margen posible para que los profesores puedan corregir los exámenes antes de la entrega de actas.

Como conclusión, se puede decir que la resolución conjunta de todos los títulos simultáneamente simplifica el tratamiento de los datos de entrada y la ejecución del modelo (sólo una vez) mientras que aumenta el tamaño del problema y su tiempo de resolución, como se verá posteriormente. Los resultados para el caso tratado son muy similares se ejecute de manera conjunta o independientemente, pero sería necesario llevar a cabo más experimentos para poder concluir algo al respecto.

Sin embargo, esto no siempre tiene porque ser así, y habría que realizar más experimentos para poder concluir si el empeoramiento en alguno de los títulos justifica el realizar varias ejecuciones de la herramienta para tratarlos de manera independiente.

4.5.4. Eficiencia computacional

El objetivo de este apartado consiste analizar el comportamiento de la herramienta desarrollada ante cada uno de los casos planteados. A continuación, en la Tabla 12 se compara el tamaño del programa en cada caso y se evalúa la eficiencia de la herramienta elaborada.

	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 1-GITI	CASO 2-GITI	CASO 3-GITI
Tiempo resolución (s)	10,56793	21,70419	20,3241	1,450628	1,24142	1,68499
F. Objetivo activada	1	2	3	1	2	3
Valor F.Objetivo	9	535	0	9	263	0
Variables binarias	538360	538360	538360	38208	38208	38208
Variables enteras	871184	871184	871184	59204	59204	59204
Nº restricciones	1039348	1039348	1363618	70496	70496	89807

Tabla 13. Comparativa de la eficiencia de la herramienta en cada caso planteado (Fuente: elaboración propia).

Dados los valores de la tabla, la principal diferencia a recalcar es el tiempo de resolución entre los casos 1,2,3 y los casos de GITI. Sin embargo, el motivo de esto se debe a la magnitud de los datos de partida, pues los primeros casos engloban todas las titulaciones.

Dados los datos proporcionados por la Escuela, se generan casi 90.000 variables enteras cuando se tratan las 5 titulaciones a la vez, y no llega a 60.000 al emplear únicamente los datos de GITI. En cuanto a las variables binarias, se puede observar que se obtiene un tamaño inferior para cada caso en comparación con las enteras. El total de restricciones generadas siempre es igual para los dos primeros casos y de mayor valor para el tercero. Esto se debe a que, en este último caso, permitir la violación del intervalo mínimo entre exámenes requiere un mayor número de ecuaciones.

4.6. Consideraciones finales

En este capítulo se ha descrito la herramienta diseñada para la optimización de programación de calendarios de exámenes extraordinarios, atendiendo a distintos objetivos y factores limitantes. Se ha presentado también la arquitectura técnica empleada para su implementación y ejecución.

Una vez implementada, se ha procedido a la resolución de un caso real utilizando las solicitudes presentadas en una convocatoria extraordinaria de la ETSII. Con objeto de validar la herramienta de optimización desarrollada se han definido diversos escenarios cuya principal diferencia radica en la función objetivo a optimizar.

Por otro lado, para analizar los resultados proporcionados por la herramienta a la hora de utilizarla, se resuelve por un lado todas las solicitudes de todos los Grados de la ETSII simultáneamente o de forma independiente por título, en este caso, sólo para GITI.

Se puede decir que la resolución conjunta de todas las solicitudes simultáneamente sin diferenciar los títulos facilita el tratamiento de los datos y la ejecución del modelo, mientras que aumenta el tiempo de resolución de cada escenario, pero cabe resaltar que requiere un número inferior de ejecuciones totales. En cuanto a los resultados obtenidos, en el caso planteado no

existen diferencias significativas, si bien está claro que al ejecutar cada titulación por separado se obtendrían los valores óptimos para cada una de ellas. La cuestión es si estos valores serían muy diferentes de la solución obtenida integrando todas ellas en un sólo modelo. En este caso, se debería llevar a cabo un procedimiento experimental más extenso para poder extraer conclusiones definitivas.

Lo que sí se puede adelantar es que el tratamiento conjunto de todos los títulos permitiría la programación de exámenes de asignaturas transversales (misma asignatura con diferentes códigos en cada titulación) o asignaturas iguales que se imparten en diferentes títulos pero que programan el mismo examen para todos los estudiantes con sólo la inclusión de alguna restricción adicional

Una vez completado todo el proceso, podemos afirmar que se ha desarrollado una herramienta capaz de generar soluciones óptimas al problema planteado. Mediante el análisis de los resultados obtenidos en los distintos escenarios se puede ver la adaptabilidad del programa a cada situación particular, atendiendo a los objetivos y restricciones seleccionadas.

Por otro lado, también se han evaluado las características vinculadas al propio software de programación, es decir, la eficiencia computacional. Se puede considerar que se ha obtenido una herramienta que ofrece la optimización de la problemática con gran rapidez. Este factor es muy beneficioso, pues como se menciona en la descripción de la problemática, uno de los mayores inconvenientes al que se enfrenta el profesorado es la falta de tiempo para el diseño del calendario de exámenes. Mediante el uso de esta herramienta este factor podría dejar de ser un inconveniente, ya que agiliza significativamente el proceso de planificación.

Finalmente, cabe destacar que el tiempo medio de ejecución del programa es de 17,5 segundos, al emplear los datos de las cinco titulaciones. A ese valor es importante añadir los tiempos necesarios para el pre y post procesado de los datos, para que estén en el formato adecuado. El tiempo de pretratamiento es de 30 minutos mientras que el de post tratamiento es de 2 minutos, lo que supone un tiempo medio total de 32,29 minutos. Esto supone una importante reducción del tiempo necesario para la definición de los calendarios, en comparación con el proceso actual, que se invierte un total de 8 horas por convocatoria, además de que con el modelo se obtiene la solución óptima con respecto al objetivo planteado.

5. HERRAMIENTA DE AYUDA A LA TOMA DE DECISIONES PARA LA PROGRAMACIÓN DE EXÁMENES ORDINARIOS

5.1. Introducción

A lo largo del capítulo 5 se desarrolla la segunda herramienta propuesta en el TFG, que pretende servir de soporte a la toma de decisiones para la programación de los exámenes ordinarios en base a otro modelo de programación lineal entera-mixta. En primer lugar, se presenta la problemática objeto de resolver (5.2. Descripción del problema) y la estructura del modelo matemático (5.3. Modelo de PLEM para la programación de exámenes ordinarios) detallando la nomenclatura, funciones objetivos y restricciones que componen el modelo. En el apartado (5.4. Arquitectura de la herramienta de optimización para la programación de exámenes ordinarios) se explican los distintos programas empleados para el desarrollo y ejecución del código y, a continuación, se pone en práctica mediante la aplicación a un caso con datos reales (5.5. Aplicación a un caso real: análisis de resultados.). Para concluir, se detallan (5.6. Consideraciones finales) las conclusiones obtenidas tras finalizar el proceso de aplicación y análisis en un entorno real.

5.2. Descripción del problema

Actualmente, la creación de los calendarios de exámenes ordinarios de la ETSII se considera un problema complejo de asignación de exámenes de asignaturas a fechas y a aulas. Como se ha indicado en el apartado 2.2.2. Exámenes ordinarios, hoy en día se diseñan de manera manual tomando como base los horarios del año anterior y realizando modificaciones puntuales. Una vez finalizado el calendario se exporta mediante la aplicación ALGAR, que posteriormente alimentará otras aplicaciones de la ETSII que permiten su visualización gráfica. Uno de los principales inconvenientes de este método reside en que no incluye ninguna opción de medición de objetivos o detección de ineficiencias, por lo que éstas se arrastran de un curso al siguiente.

Actualmente el proceso seguido para definir los calendarios de exámenes e intentar minimizar los solapes entre exámenes para los alumnos es el siguiente: cada titulación de grado cuenta con un total de cuatro cursos, cada uno dividido en dos cuatrimestres: A y B. En cada asignatura de cada cuatrimestre se llevan a cabo tres exámenes: parcial 1, parcial 2 y final. La distribución de horarios de exámenes dentro de un mismo curso se realiza dentro de un periodo preestablecido por la escuela, en el que se deben planificar todos los exámenes. La estructura seguida dentro de los periodos definidos es la siguiente: empezando, por ejemplo, por el primer curso, los estudiantes tendrán los primeros exámenes parciales del cuatrimestre A en horario de mañanas, y posteriormente realizarán la siguiente tanda, correspondiente con los segundos parciales, en el horario opuesto, de tardes. Para los últimos exámenes finales del cuatrimestre se vuelve a escoger el horario opuesto al anterior, de mañanas. El segundo cuatrimestre seguirá la misma estructura. Por otro lado, el curso consecutivo a este, de la misma titulación, sigue el mismo esquema, pero comenzando por el horario contrario, en este caso, de tardes. El objetivo que esta distribución persigue es minimizar el solape de exámenes de distintas asignaturas para aquellos alumnos que se encuentran a caballo entre dos o más cursos.

Adicionalmente a la definición de horarios de mañana o tarde, se debe especificar la fecha concreta en la que se realizará el examen y también las aulas. En este caso, es necesario asegurarse que la capacidad total máxima de las aulas asignadas a un espacio debe ser mayor o igual que el número de estudiantes matriculados en cada asignatura. Siempre se intenta asignar, para un mismo examen, aulas ubicadas en el mismo edificio y planta, para facilitar la vigilancia de exámenes por parte de los profesores y evitar equivocaciones de los estudiantes, así como simplificar la resolución de dudas durante el examen. También es importante asegurarse que hay, como mínimo, tantos profesores de vigilancia como aulas asignadas a un examen. Aunque este último aspecto, suele organizarse desde la propia asignatura, la Unidad Docente o el Departamento que la imparte. Por último, es muy importante siempre intentar minimizar el número total de aulas empleadas en los exámenes. La reducción en el número de aulas empleadas supone una reducción en el gasto energético de la universidad, además de disminuir las ineficiencias en el uso de los recursos humanos, concretamente del profesorado y del equipo de mantenimiento y limpieza de la escuela.

En este capítulo se pretende resolver el problema expuesto mediante el desarrollo de un modelo matemático de PLEM. En cada periodo de exámenes ordinario se debe asignar una fecha y horario a todos los exámenes, con el objetivo de no generar solapes para los estudiantes, e intentar, en la medida de lo posible, que estos tengan una distancia mínima entre exámenes consecutivos. Adicionalmente, a cada examen programado se le deben asignar las aulas necesarias y con ello los profesores de vigilancia. Se proponen distintos objetivos a optimizar, de acuerdo con unas restricciones establecidas que se adaptan a las necesidades de cada caso.

5.3. Modelo de PLEM para la programación de exámenes ordinarios

5.3.1. Nomenclatura

La nomenclatura empleada para la formulación del modelo matemático está formada por tres componentes: índices (Tabla 14), conjuntos de índices (Tabla 15), parámetros (Tabla 16) y variables (Tabla 17). A continuación, se incluye una tabla detallada para cada uno de los cuatro grupos mencionados. Es importante resaltar que, en este caso, puesto que se comparten recursos comunes, el modelo tiene que contemplar todas las asignaturas de todos los títulos que se vayan a programar en un horizonte dado.

Índices:

t, t'	Índice que hace referencia a la titulación
c, c'	Índice que hace referencia a los cursos
s, s'	Índice que hace referencia a las asignaturas
d, d'	Índice que hace referencia a los días
h, h'	Índice que hace referencia al horario (mañana o tarde)
e	Índice que hace referencia a los edificios
f	Índice que hace referencia al piso
a	Índice que hace referencia al aula

Tabla 14. Índices del modelo matemático ordinario (Fuente: elaboración propia).

Conjuntos:

EF_e	Conjunto de pisos disponibles en el edificio e
EFA_{ef}	Conjunto de aulas disponibles en el edificio e y piso f
TC_t	Conjunto de cursos considerados en la titulación t
TCS_{tc}	Conjunto de asignaturas pertenecientes a la titulación t y curso c
TCH_{tc}	Conjunto de horarios en los que se puede realizar exámenes en la titulación t y curso c
TCC_{tc}	Conjunto de cursos pertenecientes a una misma titulación cuyos exámenes deben ser compatibles y cumplir las restricciones que afectan a la distancia entre exámenes de una misma titulación
$TCSS_{tcs}$	Conjunto de asignaturas pertenecientes a la titulación t y el curso c que deben asegurar compatibilidad con la asignatura s
G_s	Conjunto de asignaturas cuyo examen debe realizarse el mismo día y en el mismo horario que el examen de la asignatura s, enfocado a las asignaturas transversales entre titulaciones

Tabla 15: Conjuntos de índices del modelo matemático ordinario (Fuente: elaboración propia).

Parámetros:

$dlab_d$	Parámetro binario con valor uno cuando el día d es laborable y cero cuando es festivo
din_{tc}	Día de inicio del periodo de exámenes en la titulación t y curso c
$dfin_{tc}$	Día de fin del periodo de exámenes en la titulación t y curso c
$dmin_{tc}$	Tiempo mínimo entre dos exámenes del mismo curso y titulación.
na_s	Número de estudiantes matriculados en la asignatura s.
$namin_{tc}$	Número mínimo de estudiantes matriculados en asignaturas de la titulación t y curso c.
$namax_{tc}$	Número máximo de estudiantes matriculados en asignaturas de la titulación t y curso c.
nas_s	Número de estudiantes repetidores en la asignatura s.
np_s	Número de profesores que imparten docencia en la asignatura s.
$npemax_s$	Número máximo de profesores disponibles para cuidar el examen de la asignatura s.
cap_{efa}	Capacidad del aula a ubicada en el piso f del edificio e.

Tabla 16. Parámetros del modelo matemático ordinario (Fuente: elaboración propia).

VARIABLES DE DECISIÓN:

$Y_{tcsdhefa}$	Variable binaria con valor uno cuando el examen de la asignatura s perteneciente a la titulación t y al curso c se programa en el día d y el horario h en el edificio e, piso f y aula a, y cero en caso contrario.
YH_{tcsdh}	Variable binaria con valor uno cuando el examen de la asignatura s perteneciente a la titulación t y al curso c se programa en el día d y el horario h, y cero en caso contrario.
YS_{sdh}	Variable binaria con valor uno cuando el examen de la asignatura s se programa en el día d y el horario h, y cero en caso contrario.
YE_{se}	Variable binaria con valor uno cuando el examen de la asignatura s se realiza en el edificio e, y cero en caso contrario.

YEF_{sef}	Variable binaria con valor uno cuando el examen de la asignatura s se realiza en el piso f del edificio e , y cero en caso contrario.
$YEFA_{sdhefa}$	Variable binaria con valor uno cuando el examen de la asignatura s se programa el día d con horario h en el edificio e , piso f y aula a , y cero en caso contrario.
$YSS_{tcSS'}$	Variable binaria con valor uno cuando la programación de los exámenes de las asignaturas s y s' del curso c de la titulación t no respeta el tiempo mínimo entre exámenes, y cero en caso contrario.
$T_{tcSS'}^+$	Tiempo entre los exámenes de las asignaturas s y s' del curso c de la titulación t cuando el examen de la asignatura s se programa con posterioridad al examen de la asignatura s'
$T_{tcSS'}^-$	Tiempo entre los exámenes de las asignaturas s y s' del curso c de la titulación t cuando el examen de la asignatura s se programa con anterioridad al examen de la asignatura s'
$YT_{tcSS'}^+$	Variable binaria con valor uno cuando la variable entera $T_{tcSS'}^+$ adquiere valor positivo, y cero en caso contrario.
$YT_{tcSS'}^-$	Variable binaria con valor uno cuando la variable entera $T_{tcSS'}^-$ adquiere valor positivo, y cero en caso contrario.
NPE_s	Número de profesores extra necesarios para cuidar el examen de la asignatura s .

Tabla 17. Variables de decisión del modelo matemático ordinario (Fuente: elaboración propia).

5.3.2. Funciones Objetivo

Este modelo ofrece mayor variedad de funciones objetivos que el modelo propuesto en el capítulo 4. HERRAMIENTA DE AYUDA A LA TOMA DE DECISIONES PARA LA PROGRAMACIÓN DE EXÁMENES EXTRAORDINARIOS. A continuación, se incluyen las ecuaciones que las representan junto a una breve descripción de cada una:

1. FO1: Minimizar el número de aulas utilizadas para cada examen. Esto fomenta un ahorro energético, de mantenimiento y de personal docente necesario para la vigilancia del mismo. Se consigue con la ecuación siguiente (5. 1):

$$Min[z1] = \sum_s \sum_d \sum_h \sum_e \sum_{f \in EF_e} \sum_{a \in EFA_{ef}} YEFA_{sdhefa} \quad (5. 1)$$

2. FO2: Minimizar las fechas de exámenes del global de asignaturas teniendo en cuenta los estudiantes matriculados. Se persigue programar primero las asignaturas con mayor número de estudiantes matriculados. Permite otorgar mayor margen de corrección a los profesores que tengan un volumen superior de exámenes que corregir (5. 2).

$$Min[z2] = \sum_t \sum_{c \in TC_t} \sum_{s \in TCS_{tc}} \sum_d \sum_{h \in TCH_{tc}} \left(\frac{na_s - namin_{tc}}{namax_{tc} - namin_{tc} + 1} \right) * YH_{tcsdh} * d$$

(5. 2)

3. FO3: Minimizar las fechas de exámenes de las asignaturas con mayor número de suspensos. Se persigue programar primero las asignaturas con más porcentaje de suspensos. Esto se debe a que los estudiantes tienden a prepararse más los primeros exámenes, puesto que, conforme pasan los días, el cansancio aumenta y el rendimiento académico disminuye (5. 3).

$$Min[z3] = \sum_t \sum_{c \in TC_t} \sum_{s \in TCS_{tc}} \sum_d \sum_h \frac{nas_s}{na_s + 1} * YH_{tcsdh} * d$$

(5. 3)

4. FO4: Se busca minimizar el número de veces que se incumple el tiempo mínimo entre exámenes de una misma titulación y curso. Se divide entre dos porque se contabiliza dos veces debido a las combinaciones entre asignaturas (5. 4). Obviamente, esta función objetivo sólo tiene sentido cuando el modelo es infactible para cualquiera de las funciones objetivos anteriores, debido a esa restricción.

$$Min[z4] = \sum_t \sum_{c \in TC_t} \sum_{s \in TCS_{tc}} \sum_{s' \in TCSS_{tcs}} \frac{YS_{tcss'}}{2}$$

(5. 4)

5.3.3. Restricciones

Las funciones objetivo van sujetas a las siguientes restricciones, que están agrupadas en bloques según los valores que busquen definir:

RESTRICCIONES RELACIONADAS CON LOS DÍAS Y HORARIOS DE REALIZACIÓN DE EXÁMENES.

Cada asignatura se realiza en un solo día y en un solo horario (5. 5). Además, esto implícitamente obliga a que la asignatura se tenga que hacer en el horario indicado para su titulación y curso:

$$\sum_d \sum_{h \in TCH_{tc}} YH_{tcsdh} = 1 \quad \forall t, c \in TC_t, s \in TCS_{tc}$$

(5. 5)

Relación entre la variable YH y YS para asegurar que tengan el mismo horario los exámenes de una asignatura (5. 6).

$$YH_{tcsdh} = YS_{sdh} \quad \forall t, c \in TC_t, s \in TCS_{tc}, d, h \in TCH_{tc}$$

(5. 6)

Se debe asegurar que cada asignatura solo esté programada en un día y horario (independientemente de la titulación y curso) (5. 7):

$$\sum_d \sum_h Y_{S_{sdh}} = 1 \quad \forall s \quad (5. 7)$$

El día en que se programa el examen de una asignatura se debe encontrar en el rango de fechas permitidas para esa titulación y curso (5. 8):

$$din_{tc} \leq \sum_{dh} Y_{H_{sdh}} * d \leq dfin_{tc} \quad \forall t, c, s \quad (5. 8)$$

El día en el que se programa el examen debe ser laborable (5. 9):

$$Y_{H_{tcsdh}} \leq dlab_d \quad \forall t, c \in TC_t, s \in TCS_{tc}, d, h \in TCH_{tc} \quad (5. 9)$$

RESTRICCIONES RELACIONADAS CON EL INTERVALO MÍNIMO ENTRE EXÁMENES DE LA MISMA TITULACIÓN Y CURSO:

Cálculo de tiempo entre exámenes de dos asignaturas s y s' no equivalentes y pertenecientes al mismo curso y titulación (5. 10):

$$\sum_d \sum_{h \in TCH_{tc}} Y_{S_{sdh}} * d - \sum_{d'} \sum_{h' \in TCH_{tc}} Y_{S_{s'd'h'}} * d' = T_{tcss'}^+ - T_{tcss'}^- \quad \forall t, c \in TC_t, s \in TCS_{tc}, s' \in TCSS_{tcs} \quad (5. 10)$$

Cálculo de la variable que indica la violación del tiempo mínimo entre exámenes cuando NO corresponden a la misma asignatura ($s \neq s'$) del mismo curso y titulación mediante la siguiente ecuación (5. 11):

$$dmin_{tc} - T_{tcss'}^+ - T_{tcss'}^- \leq YSS_{tcss'} * (dfin_{tc} - din_{tc}) \quad \forall t, c \in TC_t, s \in TCS_{tc}, s' \in TCSS_{tcs} \quad (5. 11)$$

Solo $T_{tcss'}^+$ o $T_{tcss'}^-$ pueden adquirir valor positivo, pero nunca ambas (5. 12). Además, solo pueden tener valor positivo cuando tanto la asignatura s como la asignatura s' pertenecen a la misma titulación y curso:

$$YT_{tcss'}^+ + YT_{tcss'}^- \leq 1 \quad \forall t, c \in TC_t, s \in TCS_{tc}, s' \in TCSS_{tcs} \quad (5. 12)$$

Relación entre las variables enteras $T_{tcss'}^+$ y $T_{tcss'}^-$ y las variables binarias $YT_{tcss'}^+$ y $YT_{tcss'}^-$ que indican si las enteras han tomado algún valor positivo (5. 13)(5. 14)(5. 15)(5. 16):

$$T_{tcss'}^+ \leq YT_{tcss'}^+ * (dfin_{tc} - din_{tc}) \quad \forall t, c \in TC_t, s \in TCS_{tc}, s' \in TCSS_{tcs} \quad (5. 13)$$

$$YT_{tcss'}^+ \leq T_{tcss'}^+ \quad \forall t, c \in TC_t, s \in TCS_{tc}, s' \in TCSS_{tcs} \quad (5. 14)$$

$$T_{tcSS'}^- \leq YT_{tcSS'}^- * (dfin_{tc} - din_{tc}) \quad \forall t, c \in TC_t, s \in TCS_{tc}, s' \in TCSS_{tcs} \quad (5. 15)$$

$$YT_{tcSS'}^- \leq T_{tcSS'}^- \quad \forall t, c \in TC_t, s \in TCS_{tc}, s' \in TCSS_{tcs} \quad (5. 16)$$

ASIGNATURAS EQUIVALENTES QUE DEBEN COMPARTIR EL MISMO EXAMEN:

Los exámenes de dos o más asignaturas de diferentes titulaciones y/o curso con el mismo examen deben estar programadas en el mismo día y hora (5. 17):

$$YS_{sdh} = YS_{s'dh} \quad \forall s, s' \in G_s, d, h \quad (5. 17)$$

ASIGNACIÓN DE AULAS A FECHAS DE EXÁMENES DE CADA ASIGNATURA:

No se puede hacer más de un examen en la misma aula durante el mismo día y la misma hora (5. 18), para todas las aulas pertenecientes a cada planta y edificio:

$$\sum_s YEFA_{sdhefa} \leq 1 \quad \forall d, h, e, f \in EF_e, a \in EFA_{ef} \quad (5. 18)$$

Solo se puede asignar un aula a una asignatura en el día y hora en la que se realiza el examen (relación entre las variables $YEFA_{sdhefa}$ y YS_{sdh}) (5. 19):

$$YEFA_{sdhefa} \leq YS_{sdh} \quad \forall s, d, h, e, f \in EF_e, a \in EFA_{ef} \quad (5. 19)$$

La capacidad de las aulas empleadas debe ser mayor que el número de alumnos matriculados en la asignatura asignada a esas aulas (5. 20).

$$\sum_d \sum_h \sum_e \sum_{f \in EF_e} \sum_{a \in EFA_{ef}} YEFA_{sdhefa} * cap_{efa} \geq na_s \quad \forall s \quad (5. 20)$$

Hay que asegurar que no se asigna ningún aula a una asignatura que no tiene alumnos matriculados mediante la siguiente ecuación (5. 21):

$$\sum_e \sum_{f \in EF_e} \sum_{a \in EFA_{ef}} YEFA_{sdhefa} \geq YS_{sdh} \quad \forall s, d, h \quad (5. 21)$$

PROFESORES NECESARIOS PARA LA VIGILANCIA DE EXÁMENES:

El número de aulas utilizadas para una misma asignatura debe ser inferior al número de profesores disponibles para dicha asignatura (5. 22):

$$\sum_d \sum_h \sum_e \sum_{f \in EF_e} \sum_{a \in EFA_{ef}} Y E F A_{sdhefa} \leq np_s + N P E_s \quad \forall s \quad (5. 22)$$

El número de profesores extra empleados para cuidar examen no puede exceder el número de profesores extra disponibles para la asignatura (5. 23).

$$N P E_s \leq np_{max_s} \quad \forall s \quad (5. 23)$$

REGULACIÓN DE LOS CURSOS FICTICIOS DESTINADOS A LAS ASIGNATURAS OPTATIVAS:

Se crean cursos ficticios destinados a las asignaturas optativas de los últimos cursos de grado y máster.

No se pueden hacer dos asignaturas del mismo curso “real” en un mismo horario y día (5. 24):

$$\sum_{s \in TCS_{tc}} Y S_{sdh} + \sum_{s' \in TCS_{tc}} Y S_{s'dh} \leq 1 \quad \forall t, c \in TC_t, c' \in TCC_{tc}, d, h \quad (5. 24)$$

Para esto se crea un parámetro binario que indica los cursos que son equivalentes, ya que hay creados cursos ficticios. Por ejemplo, el curso 2 corresponde con segundo, mientras que el curso 5 son las optativas de segundo. Así, el parámetro binario tendrá valor uno para los cursos 2 y 5 ya que ambos pertenecen al mismo curso “real”.

RESTRICCIÓN PARA MOSTRAR LA VARIABLE RESULTADO:

La ecuación (5. 25) da valor a la variable $Y_{tcsdhefa}$ que contiene todos los índices del modelo para poder englobar el resultado obtenido en una sola variable:

$$Y_{tcsdhefa} = Y E F A_{sdhefa} \quad \forall t, c \in TC_t, s \in TCS_{tc}, d, h \in TCH_{tc}, e, f \in EF_e, a \in EFA_{ef} \quad (5. 25)$$

CONJUNTO DE RESTRICCIONES DE CARACTER OPCIONAL:

Si se pretende cumplir con el tiempo mínimo entre dos exámenes, entonces se deberá activar la siguiente restricción (5. 26):

$$\sum_t \sum_{c \in TC_t} \sum_{s \in TCS_{tc}} \sum_{s' \in TCS_{tcs}} Y S S_{tcss'} = 0 \quad (5. 26)$$

Si todos los exámenes de una asignatura deben ser asignados en aulas del mismo edificio, entonces se activarán las restricciones (5. 27) asegurando que el aula pertenece al edificio y la

planta correspondiente y la (5. 28), que asegura que sólo se programen exámenes en un único edificio para cada asignatura:

$$YEF A_{sdhefa} \leq YE_{se} \quad \forall s, d, h, e, f \in EF_e, a \in EFA_{ef} \quad (5. 27)$$

$$\sum_e YE_{se} = 1 \quad \forall s \quad (5. 28)$$

Si se desea una planificación más restrictiva, en la que las aulas para los exámenes de cada asignatura se deban asignar en el mismo edificio y PLANTA, entonces se activarán las siguientes restricciones (5. 29) y (5. 30), que funcionan de igual manera que en la restricción anterior, pero empleando las variables que incluyen el índice referido a las distintas plantas:

$$YEF A_{sdhefa} \leq YEF_{sef} \quad \forall s, d, h, e, f, a \quad (5. 29)$$

Por último, igual que se plantea en la restricción (5. 28), para cada asignatura sólo se deben haber programado exámenes en un único edificio y planta (5. 30):

$$\sum_{ef} YEF_{sef} = 1 \quad \forall s \quad (5. 30)$$

Para terminar, se incluye la naturaleza de las variables de decisión:

$Y_{tcsdhefa}, YH_{tcsdh}, YS_{sdh}, YE_{se}, YEF_{sef}, YEF A_{sdhefa}, YSS_{tcss'}, YT_{tcss'}^+, YT_{tcss'}^-$ Binarias
 $T_{tcss'}^+, T_{tcss'}^-, NPE_s$ Enteras

5.4. Arquitectura de la herramienta de optimización para la programación de exámenes ordinarios

La arquitectura empleada para el desarrollo de esta herramienta es análoga a la explicada en el punto 4.4. Arquitectura de la herramienta de optimización para la programación de exámenes extraordinarios, puesto que ambos programas están basados en PLEM y la manera de implementarlos es similar.

Los programas empleados son exactamente los mismos:

1. Paquete de optimización desarrollado en Python: **Pyomo 6.4.1 (Python Optimization Modeling Objects)**.
2. Interfaz de programación: **JupyterLab 3.4.2**.
3. Solver elegido para resolver el modelo: **Gurobi 9.5.1**.
4. Programa para generar los ficheros de datos (.tab) de entrada y los de resultados: **Microsoft Excel 2007 - 2016**.

En este nuevo modelo de exámenes ordinarios, los datos de entrada son bastante diferentes al caso anterior, pues la magnitud de estos es muy grande. Una vez elaborado el modelo con la nomenclatura correspondiente, las funciones objetivas y las restricciones, se procede a la transcripción al lenguaje Python en Jupyter Lab. Por otro lado, se preparan los ficheros de datos mediante una herramienta diseñada en Excel para su previo tratamiento, pues, por motivos de confidencialidad, estos deben ser anonimizados. Una vez generados todos los ficheros en formato .tab, se referencian en el modelo desde la interfaz de programación para permitir el acceso a ellos. Es importante recalcar que se hace uso de las librerías de Pyomo para el modelado. En este momento, ya se puede conectar el *solver* Gurobi y proceder a la ejecución del programa. Las primeras veces desde la creación de este es necesario ir corrigiendo los pequeños fallos de compilación que van saltando en el programa hasta que estén todos resueltos y se proceda entonces a la correcta lectura del modelo y a la búsqueda de una solución óptima.

Finalmente, una vez se obtiene una solución factible, se generan los ficheros .tab que incluyen todos los resultados obtenidos y son exportados a Excel donde se analizan los resultados obtenidos para confirmar su validez y poder transformarlos a un modo de lectura más visual para el usuario. En este punto se automatiza mediante Visual Basic la creación de tablas que facilitan la lectura de los resultados obtenidos. En este caso, se automatiza la creación de una tabla que incluye, para cada asignatura, la fecha y horario de realización del examen, así como el aula en que tendrá lugar y la capacidad de ésta. A partir de dicha tabla, se generan mediante tablas dinámicas otras dos tablas que resumen las fechas de realización de los exámenes y las aulas, para poder visualizar la separación que se mantiene entre ellos y la ausencia de solapes entre exámenes, ya sea si se han programado en el mismo periodo temporal o en la misma ubicación. A continuación se puede observar en la Figura 12 la arquitectura empleada para el desarrollo del modelo y su ejecución.

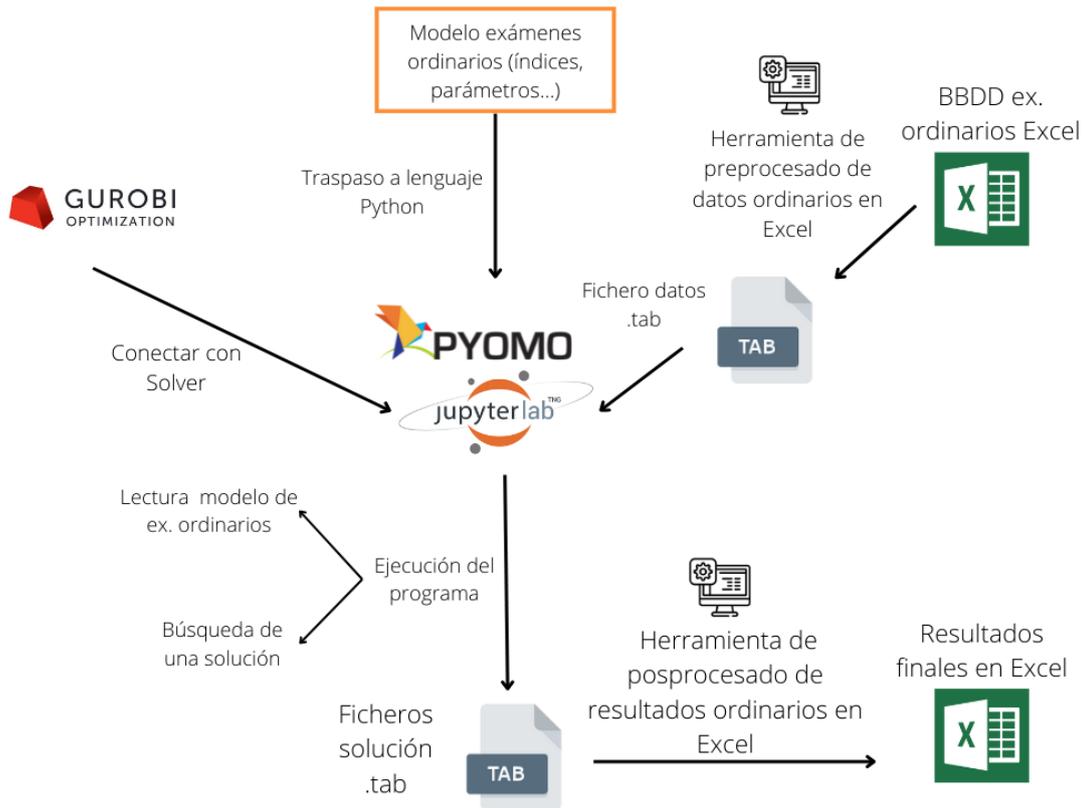


Figura 12. Arquitectura técnica de la herramienta de optimización para la programación de exámenes ordinarios. (Fuente: elaboración propia).

5.5. Aplicación a un caso real: análisis de resultados.

Tras la descripción de la nomenclatura del programa ejecutable y la arquitectura empleada para su desarrollo, se procede a la puesta en práctica mediante el uso de un conjunto de datos reales, provenientes de la ETSII (Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial). Previamente a las ejecuciones con los datos reales se pone a prueba el modelo con un conjunto de datos de menor tamaño para detectar y solucionar los posibles errores de programación con mayor facilidad.

En el siguiente apartado se realiza una descripción con mayor detalle del conjunto de datos empleado para la aplicación a un caso real.

5.5.1. Descripción de los datos de entrada

Los datos seleccionados para ejecutar el modelo provienen del curso 21 – 22 de la ETSII. A continuación, se detallan:

- El periodo contemplado para la programación de los exámenes es del 20 de octubre al 2 de noviembre que se corresponde con los primeros parciales, y a la hora de contemplar estas fechas en el modelo se numeran del 1 al 14. Además, en cada uno de los días hay dos horarios disponibles para programar exámenes, de mañanas (8:00h) y de tardes (15:00h). Dentro de este intervalo temporal, se detalla mediante el parámetro *dlab* si el día es laborable o no, pudiéndose únicamente programar exámenes en días laborables.
- Se programan los exámenes de las asignaturas de aquellas titulaciones cuyo periodo de exámenes coincida con el arriba mencionado: en concreto se trata de 8 titulaciones (GITI, GIOI, GIQ, GIE, GIB, GIB-C, MUII (2º curso), MUIQ (2º curso)).
- Por lo que respecta a la asignación de aulas, esto se considera un recurso compartido para todas las titulaciones de la ETSII. Se dispone de 6 edificios disponibles, de los que cada uno contiene de 1 a 4 plantas y en cada planta se ubican hasta un máximo de 8 aulas. Se define un parámetro que indica si una planta pertenece a un edificio concreto y otro que indica la pertenencia de las aulas a cada planta y edificio. Además, se define también la capacidad máxima de personas que puede albergar cada aula.
- Para cada asignatura se define el número de alumnos matriculados, así como el número de alumnos repetidores y los profesores de vigilancia disponibles que coincide con los profesores con POD asignado en esa asignatura.
- Para todas las titulaciones se plantea como máximo un total de 12 cursos y entre todos ellos suman la totalidad de 219 asignaturas distintas. La definición de curso en este punto no es completamente equivalente en todos los casos al significado de curso al que estamos acostumbrados. Esto es necesario por el hecho de existir intensificaciones o asignaturas optativas que no cursan todos los estudiantes. Así por motivos de programación es necesario otorgarles otro significado, para poder garantizar la separación necesaria entre exámenes de distintos cursos y que sea coherente con las asignaturas que son transversales. En la Tabla 18 se puede observar para cada titulación la correspondencia entre los 12 cursos empleados en el programa con los cursos reales de éstas.

A continuación, se explica la distribución realizada en la titulación de GITI como ejemplo para ofrecer un mejor entendimiento. Este grado contiene 4 cursos principales. Como se observa en la tabla, los cursos c=1, c=2 y c=3 corresponden con los tres primeros cursos obligatorios del grado. En cuanto al 4º curso, este se divide en dos vías de especialización: 4º vía organización y 4º vía tecnologías. Cada uno de ellos corresponde con un curso de programación diferente de cara al modelo. La vía de organización es el curso c=4 mientras que la de tecnologías es c=9. De manera adicional, las asignaturas optativas de los cursos 3º y 4º se deben programar de manera paralela al curso obligatorio. Las optativas de 3º son el curso c=7 y las de 4º son c=8. De esta manera, se garantiza que las asignaturas transversales pueden cumplir la distancia necesaria con los cursos a los que pertenecen de cada titulación y así permitir la programación alterna entre mañanas y tardes en cursos consecutivos.

Curso (c)	154 - GITI	155 - GIOI	174 - GIE	187 - GIQ	175 - GIB	137 - GIB MUIB	2235 - MUIQ	2241 - MUII GITI
1	1º	1º	1º	1º	1º	1º		2º Utilización energía
2	2º	2º	2º	2º	2º		2º op.1 bloque 1 y op.1 bloque 2	2º Generación energía
3	3º	3º	3º	3º	3º		2º op.1 bloque 1 y op.2 bloque 2	2º Construcciones
4	4º	4º via organización	4º	4º	4º		2º op.1 bloque 1 y op.3 bloque 2	2º Producto
5							2º op.2 bloque 1 y op.1 bloque 2	2º Control automática y robótica
6	optativas 2º		optativas 2º				2º op.2 bloque 1 y op.2 bloque 2	2º Organización
7		optativas 3º		optativas 3º			2º op.2 bloque 1 y op.3 bloque 2	2º Materiales
8	optativas 4º	optativas 4º	optativas 4º	optativas 4º	optativas 4º		2º op.3 bloque 1 y op.1 bloque 2	2º Mecánica
9		4º via tecnologías					2º op.3 bloque 1 y op.2 bloque 2	2º Eléctrica
10							2º op.3 bloque 1 y op.3 bloque 2	2º Electrónica
11								2º Medio ambiente
12								2º optativas

Tabla 18. Correspondencia entre cursos de cada titulación con los cursos para la programación (Fuente: elaboración propia).

Una vez se tienen todos los datos necesarios para la implementación del modelo matemático, se puede proceder al pretratamiento de estos mediante la herramienta Excel. Esto transforma los datos a otro formato admisible en la plataforma de programación. Cuando estos estén preparados, se elige la función objetivo que se desea optimizar y se activan o desactivan las distintas restricciones opcionales que se vean necesarias, lo cual aumentará o disminuirá la complejidad y tiempo de resolución del modelo. A continuación, se exponen los distintos escenarios a plantear con este conjunto de datos para verificar la validez del modelo ante distintas situaciones y poder analizar los resultados obtenidos

5.5.2. Definición de escenarios

A la hora de ejecutar el modelo con los datos obtenidos de la ETSII, se plantean diferentes escenarios que son ejecutados para las 4 funciones objetivos. Para cada una de ellas, se proponen 6 escenarios diferentes que son ejecutados en orden decreciente de restrictividad, que esta varía según el número de restricciones opcionales que sean activadas. A la hora de analizar los resultados se evalúan los del escenario más restrictivo que proporcione una solución factible, ya que en muchas ocasiones no serán viables algunos de los escenarios.

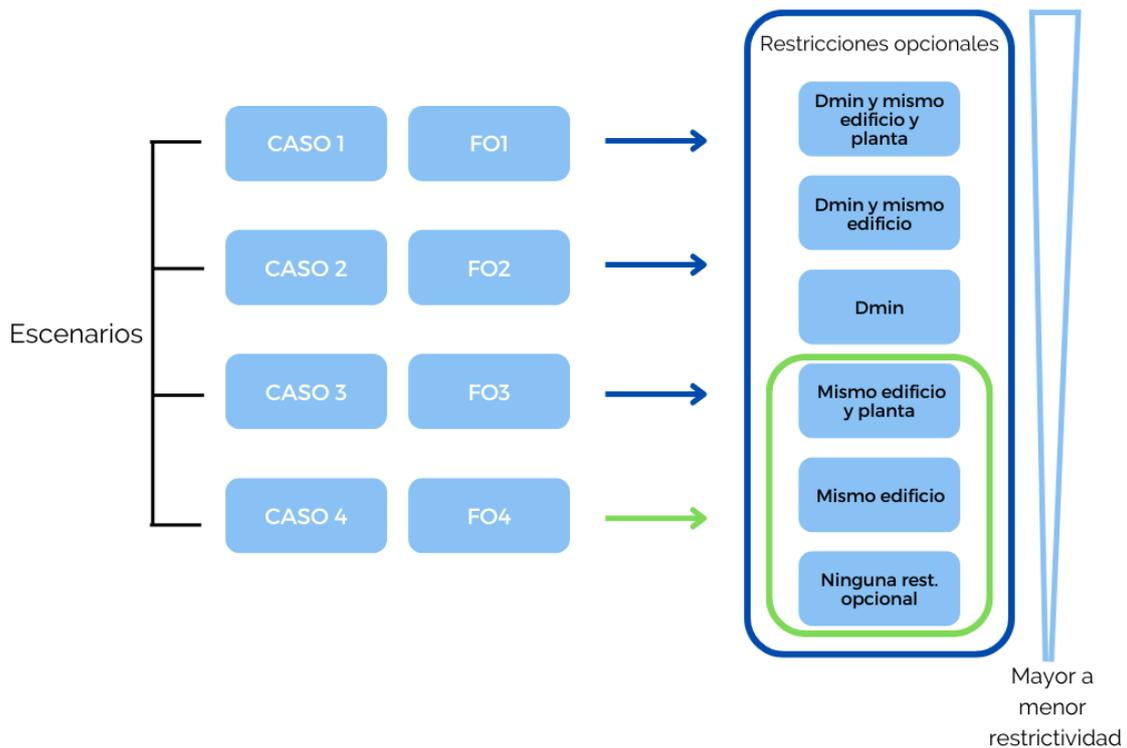


Figura 13. Escenarios de ejecución del segundo modelo (Fuente: elaboración propia).

En la Figura 13 se pueden observar los posibles escenarios que se pueden dar teniendo en cuenta la combinación función objetivo seleccionada y las restricciones opcionales activadas. El procedimiento de análisis y resolución del modelo consiste en ejecutar los 4 casos, para cada una de las cuatro funciones objetivos resolviendo primero con las restricciones activadas superiores y sólo en caso de obtener solución infactible, ir relajando en el orden establecido de mayor a menor restrictividad que aparece en la figura (de arriba a abajo). De esta manera, para ejecutar el caso 1 se empieza activando la primera combinación de restricciones opcionales. Si el resultado obtenido es factible, se da por finalizado el caso 1. Por lo contrario, si resulta ser infactible se ejecuta la siguiente combinación más restrictiva, y así sucesivamente hasta alcanzar una solución factible. Cabe resaltar que en el caso 4 (FO4), únicamente aplicarían las 3 últimas restricciones, marcado en color verde en la figura anterior y también empezando de arriba a abajo. Esto se debe a que esta función objetivo únicamente se aplica cuando no es posible respetar la distancia mínima entre exámenes para todos los estudiantes, y en ese caso se busca minimizar el número de veces que ésta se incumple. Es por ello por lo que resulta incoherente activar una restricción que obliga a respetar *Dmin*.

5.5.3. Análisis de resultados

Previamente a analizar los resultados obtenidos para cada función objetivo, se incluye una tabla resumen que indica el carácter de la solución obtenida en cada una de las combinaciones de restricciones y funciones objetivos. Comenzando por la primera combinación y la más restrictiva, se puede obtener en las distintas combinaciones un resultado de carácter: factible, no factible,

no aplica o no ejecutado. En el momento un conjunto de restricciones opcionales da factible, ya no se sigue ejecutando el resto.

Restricciones opcionales	Dmin + edificio & planta	Dmin + edificio	Dmin	Edificio & planta	Edificio	Ninguna restricción
CASO 1	No factible	FACTIBLE	No ejecutado	No ejecutado	No ejecutado	No ejecutado
CASO 2	No factible	FACTIBLE	No ejecutado	No ejecutado	No ejecutado	No ejecutado
CASO 3	No factible	FACTIBLE	No ejecutado	No ejecutado	No ejecutado	No ejecutado
CASO 4	No aplica	No aplica	No aplica	No factible	FACTIBLE	No ejecutado

Tabla 19. Resumen de las soluciones obtenidas en todos los escenarios planteados en el modelo de exámenes ordinarios (Fuente: elaboración propia).

Tal y como indica la Tabla 19, se pueden observar todas las combinaciones obtenidas entre la función objetivo activada y el grupo de restricciones opcionales seleccionado. Estos grupos están ordenados de manera que los escenarios a evaluar para cada función objetivo sean lo más restrictivos posible, para poner a prueba el modelo con las máximas limitaciones posibles. Cabe destacar que la primera opción más restrictiva genera un resultado de carácter no factible para todas las combinaciones, debido a la cantidad de asignaturas a planificar y la limitación de los recursos compartidos. De esta manera, empezando por la 1ª función objetivo, se puede observar que el primer escenario factible es aquel que contiene la restricción de respetar la distancia mínima entre exámenes y que, para cada asignatura, todas las aulas seleccionadas se ubiquen en el mismo edificio. De igual manera ocurre con los casos 2 y 3. Por último en el caso 4, como ya se ha mencionado anteriormente, no tiene sentido aplicar las combinaciones que incluyen la restricción de respetar la distancia mínima, por lo que no aplican las combinaciones 1, 2 y 3. Así, se comienza a ejecutar directamente por la 4ª combinación. Finalmente, resulta factible la segunda opción más restrictiva, que en este caso se refiere únicamente a ubicar todas las aulas de un examen en el mismo edificio.

A continuación, se analiza con mayor detalle los resultados obtenidos en los escenarios valorados como factibles. Debido al tamaño de las tablas que contienen los resultados, pueden ser observadas en los anexos con mayor detenimiento.

CASO 1: Minimizar el número de aulas empleadas para cada examen, siendo todas pertenecientes al mismo edificio y respetando la distancia mínima entre exámenes.

En este primer caso se activa la 1ª función objetivo y las restricciones opcionales mencionadas, así como todo el conjunto de restricciones obligatorias y necesarias. Tras finalizar la ejecución, se plasman los resultados obtenidos en diversas tablas que permiten analizar los resultados, detectar si existe algún solape de horarios o ubicación, y confirmar que se mantiene la distancia entre exámenes.

En este caso, el valor resultante de la función objetivo es de 346 aulas utilizadas. Esto significa que, para realizar los exámenes de 219 asignaturas se necesitan utilizar como mínimo 346 aulas, una media de 1,58 aulas por asignatura. Al emplear el menor número de aulas posibles ajustando la capacidad de éstas a los estudiantes matriculados de cada asignatura, se disminuye el número de profesores de vigilancia necesarios por asignatura, así como una reducción en los

gastos de electricidad, limpieza y posible material necesario, favoreciendo así el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible.

En los anexos, concretamente en las tablas Anexo 3, Tabla 1 y Anexo 3, Tabla 2 se puede observar los calendarios de exámenes obtenidos, En la tabla Anexo 3, Tabla 1 se incluye las fechas y horario de los exámenes de cada curso dentro de cada titulación. Esto permite visualizar el cumplimiento de la distancia mínima entre cursos consecutivos. Por otro lado, en la tabla Anexo 3, Tabla 2 se observan los exámenes que tienen lugar en cada aula, en una fecha y horario determinado. El objetivo es visualizar que no existen solapes, pues no se encuentran nunca dos exámenes distintos programados en la misma aula y periodo temporal.

CASO 2: Minimizar las fechas de exámenes del global de asignaturas, programando primero las asignaturas con mayor número de estudiantes. Se debe respetar la distancia mínima entre exámenes y ubicar todas las aulas de cada examen en el mismo edificio.

Por lo que respecta a la 2ª función objetivo, como se ha explicado anteriormente tiene como misión ordenar los exámenes en función del número de estudiantes que haya matriculados. De esta forma, se busca favorecer principalmente al profesorado, pues obtendrán mayor margen de corrección hasta la fecha de entrega de actas. Visualizando los resultados, se puede observar que la asignatura con mayor número de alumnos matriculados, 346, corresponde con '11402 – Física I' de la titulación GITI. De esta manera, se puede observar en el Anexo 3, Tabla 3 que es programada en el primer intervalo posible, es decir, el día 20/10 en el horario de mañanas.

Adicionalmente, se mantiene la restricción de que todas las aulas destinadas a dicho examen se ubiquen en el mismo edificio, y se puede ver en el Anexo 3, Tabla 4 que todas las aulas destinadas a dicha asignatura pertenecen al edificio con código 0, es decir, el edificio 5N. Como se menciona en el título del caso 2, la 2ª función objetivo, además de programar primero los exámenes con más estudiantes matriculados, tiende a programar todos los exámenes lo antes posible para minimizar la función al máximo. De esta manera, incluso las asignaturas con menor número de alumnos matriculados se intentarán programar cuanto antes. Esto se ve claramente con la asignatura '34555 – Recruitment skills' de la titulación MUII que, sin tener alumnos matriculados, se programa por la mañana el día 20/10.

CASO 3: Minimizar las fechas de exámenes de las asignaturas con mayor número de suspensos. Se debe respetar la distancia mínima entre exámenes y ubicar todas las aulas de cada examen en el mismo edificio.

Los resultados obtenidos para el caso 3 buscan la programación de exámenes en función del número de estudiantes suspensos por asignatura. Esto favorece principalmente al conjunto de alumnos/as, ya que se pretende que aquellos estudiantes con un mayor volumen de asignaturas comiencen lo antes posible a realizar los exámenes. Además, se entiende que cuanto mayor es el porcentaje de alumnos suspensos por asignatura, mayor es la complejidad de esta o la carga de trabajo que requiere. Por ello, siempre resulta favorable realizar cuanto antes dicho examen ya que los estudiantes tienden a preparar con mayor esfuerzo los primeros exámenes que los últimos. La función objetivo resultante tiene un valor de 25,68.

Se obtiene que la asignatura con mayor porcentaje de suspensos es '11400 - Matemáticas I' de la titulación GITI. En la tabla Anexo 3, Tabla 5 se puede observar que es programada en el primer

periodo posible, correspondiente con el día 20/10 en el horario de mañanas, 8:00h. En la tabla Anexo 3, Tabla 6 se puede verificar que se ubican todas las aulas de un examen en el mismo edificio. Si nos fijamos de nuevo en la asignatura con código 11400 se puede ver que las aulas asignadas son las siguientes: 032, 041, 021, 033, 024 y 012. Todas ellas pertenecen al edificio con código 0, correspondiente con el aulario, edificio 5N.

CASO 4: Minimizar el número de veces que se incumple el tiempo mínimo entre exámenes de una misma titulación y curso. Se debe ubicar todas las aulas de cada examen en el mismo edificio.

Para finalizar, se analiza el último caso correspondiente con la 4ª función objetivo. Aplicar esta función objetivo únicamente tiene sentido cuando, para las anteriores funciones objetivo con la restricción que obliga a respetar la distancia mínima, se obtiene una solución infactible debida a que no se garantiza la distancia mínima entre exámenes para algún estudiante. Puesto que con estos datos de entrada no ocurre dicha situación, se obtiene un valor de 0 en la función objetivo, ya que siempre se respeta el valor d_{min} . El cumplimiento de esta distancia se puede observar en la tabla Anexo 3, Tabla 7. También se anexa la tabla Anexo 3, Tabla 8 con el calendario de exámenes en función de las aulas, en la cual se puede observar el cumplimiento de la restricción que obliga a ubicar todas las aulas destinadas al examen de una asignatura en el mismo edificio. Por ejemplo, si nos fijamos en la asignatura '12268 - Expresión Gráfica' de la titulación GIQ, se requieren 4 aulas para albergar a todos los estudiantes y todas ellas pertenecen al edificio con código 4, equivalente al edificio 5C.

5.5.4. Eficiencia computacional

A continuación, se pretende analizar la eficiencia computacional obtenida tras la ejecución de cada uno de los escenarios a evaluar en este segundo modelo matemático. En la Tabla 20 se muestra un resumen de dichos resultados evaluando los aspectos más relevantes.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Tiempo resolución (s)	8.190,335	5.353,3	2.800,682	536,685
F. Objetivo activada	1	2	3	4
Valor F.Objetivo	346	249,82	25,68	0
Binarias	584146	584146	584146	584146
Enteras	586837	586837	586837	586837
Nº restricciones	859523	859523	859523	859522

Tabla 20: Resultados de la eficiencia computacional de los escenarios del modelo ordinario (Fuente: elaboración propia).

Si nos fijamos en el tiempo de resolución obtenido, se observa que en el caso 4 es significativamente inferior en comparación con el resto, lo cual tiene sentido, pues el escenario a evaluar es menos restrictivo y por ello ejecuta con mayor velocidad. Por el contrario, el caso 1 conlleva el mayor tiempo de resolución. Por tanto, observamos como el tiempo de resolución depende de la FO seleccionada. En este punto es interesante comentar que la formulación inicial de la FO2 consideraba como término que tenía en cuenta el número de alumnos matriculados solamente el na_s . Sin embargo, el modelo no resolvía y hubo que buscar formulaciones alternativas, sustituyendo el anterior término por el cociente $\left(\frac{na_s - n_{amin_{tc}}}{n_{amax_{tc}} - n_{amin_{tc}} + 1}\right)$, lo que supuso una reducción sustancial del tiempo de ejecución.

Por lo que respecta a las dimensiones del modelo en cada escenario, se puede observar que se obtiene el mismo número de variables en todos los casos, tanto binarias como enteras. También se obtiene un número de restricciones igual en los casos 1, 2 y 3 puesto que se analiza el mismo escenario en ambos, mientras que en el caso 4 el valor obtenido es de una unidad inferior ya que no incluye la restricción de la distancia mínima. Como se indica en la tabla y se ha visto anteriormente, en cada una de las soluciones se evalúa una función objetivo diferente, por lo que no se pueden comparar los valores obtenidos entre ellas. En el primer caso, se obtiene que el valor de aulas empleadas se minimiza hasta un total de 346 aulas. A continuación, en el caso 2 se obtiene un valor resultante de la función objetivo de 249,82. En el caso 3 se ordenan las fechas de exámenes en función del número de estudiantes repetidores en cada asignatura, resultando el valor mínimo de 25,68. Por último, se obtiene un valor de 0 en el caso 4, donde se minimiza el número de veces que se incumple la distancia mínima entre exámenes. Esto quiere decir que se consigue respetar la distancia mínima para todos los estudiantes.

5.6. Consideraciones finales

A lo largo de este capítulo se ha presentado la herramienta de ayuda a la toma de decisiones para la programación de exámenes ordinarios. Desde la descripción de la problemática con el método empleado en la actualidad, pasando por la descripción de la herramienta creada y su puesta en práctica en un caso real con datos de la ETSII del curso 21-22.

Para determinar el correcto funcionamiento de la herramienta, se proponen diferentes escenarios para evaluar las posibles combinaciones entre la función objetivo elegida y el conjunto de restricciones activadas. Esto permite aplicar la herramienta a las posibles situaciones que puedan ser requeridas, desde la más restrictiva posible a la menos restrictiva.

Se puede destacar que, para todas las funciones objetivo, se obtiene un resultado infactible al ejecutar el primer escenario propuesto de mayor restrictividad (exámenes de una asignatura en el mismo edificio y planta). Dada la partida de datos de entrada, debido a la gran cantidad de exámenes que planificar y los recursos físicos y temporales limitados que hay disponibles, es muy complicado generar una distribución que cumpla con esta restricción a la vez que con el resto de las limitaciones.

Además, mediante la aplicación de esta herramienta, se pretende contribuir de una forma activa con algunos de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) propuestos por la ((ONU), 2022). Concretamente, mediante la reducción de aulas empleadas se favorece el objetivo 12 de los ODS: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles. En este se promueve un consumo energético responsable, lo cual incluye el gasto de luz en las aulas, aire acondicionado, gasto de luz de equipos informáticos, materiales químicos de limpieza, etc. Se puede obtener más información acerca de este objetivo y sus metas en <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>. Otros objetivos estrechamente vinculados con esta práctica son el Objetivo 4 (Garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos) y el Objetivo 9 (Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación). Mediante la implementación de esta herramienta se busca promover la igualdad entre todos los estudiantes, obtener un ahorro energético, económico, de mantenimiento y de personal. Se busca realizar un buen uso de los recursos disponibles, promover la eficiencia y fomentar la conciencia y práctica sostenible.

Por otro lado, también se analiza la eficiencia computacional del programa. En este caso, los tiempos de ejecución son bastante superiores a los obtenidos en la herramienta de exámenes extraordinarios. Sin embargo, no es comparable debido a la gran complejidad de este modelo de exámenes ordinarios. Aun así, los resultados obtenidos ya suponen una gran mejora en comparación con el método manual que se emplea actualmente en la universidad.

Viendo la eficiencia computacional, se puede observar que el tiempo medio de ejecución del modelo es de 4.220,25 segundos, es decir, 70,33 minutos. Esto depende también de la función objetivo que se desee optimizar, pues se puede observar que unas conllevan más tiempo que otras en ejecutar. Añadiendo los tiempos correspondientes de preprocesado de datos (30 minutos) y posprocesado (2 minutos), se determina un tiempo total de 102,33 minutos necesarios para ejecutar la herramienta, lo cual supone un considerable ahorro de tiempo frente a las 14 horas necesarias de trabajo para cada convocatoria ordinaria con el método actual.

Finalmente, se observa que cuando no se cumple una determinada restricción, como por ejemplo, que las aulas estén en la misma planta de un edificio, únicamente eliminar esa restricción puede llevar a que no se considere en absoluto, aspecto nada deseable. Por tanto, se ve la necesidad de intentar incorporar otra función objetivo que penalice el número de veces que no se respeta dicha restricción, pudiendo llevar al caso de un modelo multi-objetivo.

Se puede concluir que se ha diseñado una herramienta eficiente, capaz de generar soluciones óptimas que atienden a distintas situaciones en función de las necesidades y requerimientos de cada caso particular. Además, se disminuye la carga de trabajo necesaria frente al método actual y se fomenta una conducta de desarrollo de carácter sostenible.

6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE ACTUACIÓN

A lo largo del presente TFG se proponen dos herramientas de ayuda a la toma de decisiones para la definición de calendarios de exámenes. Ambas están basadas en modelos de programación lineal entera mixta. El primer modelo está destinado a la programación de exámenes extraordinarios asignando periodos temporales, mientras que el segundo se centra en los exámenes ordinarios, determinando los periodos temporales en los que se realizan, así como las aulas necesarias para cada examen y el profesorado de vigilancia de éstas, atendiendo a limitaciones específicas de disponibilidad de recursos (separación mínima entre exámenes, número de profesores disponibles, capacidad de las aulas, horarios de mañana y tarde según el curso, etc). Todos estos aspectos son los responsables de la originalidad de las propuestas y la motivación de desarrollar este TFG.

Para ello, se realiza una explicación detallada de la problemática en cuestión, conocida como ETP (*Educational Timetabling Problem*). También se describe el entorno en el que se encuentra la problemática y en el cual serán puestas en práctica las herramientas, siendo este la ETSII, Escuela Superior de Ingeniería Industrial de la UPV.

Tras describir la problemática en cuestión y el entorno en el que se van a aplicar las herramientas, queda justificada la realización de los modelos y se procede a realizar una revisión de los trabajos publicados en los últimos años a cerca de la problemática objeto. Al comparar los aspectos y dimensiones que son evaluadas en cada uno de los estudios, se puede comprobar que no hay ninguno que incluya todos los factores que se tienen en cuenta en las propuestas desarrolladas en este TFG. Cabe destacar que hay una función objetivo que incluye el segundo modelo propuesto que no se ha considerado en ninguno de los estudios revisados. La inclusión de todas las particularidades mencionadas eleva significativamente la complejidad al desarrollar las herramientas.

Posteriormente, en el capítulo 4 se detalla el primer modelo matemático propuesto, destinado a los exámenes extraordinarios. Este permite enfocarse según diferentes objetivos, para adaptarse a las necesidades de cada situación. El modelo busca que, en la medida de lo posible, se respete una distancia mínima entre los exámenes consecutivos de todos los estudiantes. En caso de no ser posible, se activa la última función objetivo, que minimiza el número de veces que se incumple este parámetro. Tras la descripción del modelo matemático, la nomenclatura empleada y la arquitectura técnica, entre otros aspectos, se procede a la aplicación del programa en un caso real, empleando datos de partida provenientes de la ETSII. Se ejecuta el programa en 6 casos diferentes, evaluando las tres funciones objetivo que incluye el modelo. Los tres primeros casos incluyen datos que engloban a las cinco titulaciones de grado de la escuela, mientras que para los últimos tres casos se utilizan exclusivamente los datos de uno de los grados, en concreto los del grado GITI. El motivo de analizar las dos situaciones consiste en ver cómo afecta el trato de los grados de manera global a cada titulación en particular, pues al ejecutarlos en grupo se podrían ver favorecidas unas titulaciones frente a otras, en función del número de alumnos asistentes a los exámenes de cada una. Finalmente, se puede concluir que los resultados obtenidos son satisfactorios, sin detectar diferencias significativas entre los datos conjuntos y los datos particulares de GITI, además de obtener un tiempo de ejecución muy razonable.

En segundo lugar, durante el capítulo 5 se procede a la descripción del segundo modelo matemático destinado a los exámenes ordinarios de la escuela. En este caso se trata de un

modelo de mayor envergadura, dado el número de variables, parámetros y restricciones que incluye. Tras la descripción del modelo en su totalidad, se procede, de igual manera que antes, a la aplicación de la herramienta en un caso real con datos de la ETSII. Para este modelo, los datos empleados son tanto de las titulaciones de grado como de las de máster, siendo un total de 13 titulaciones. Esto implica que el tamaño de los datos de entrada es muy superior, lo cual se ha visto reflejado en los tiempos de resolución del modelo que se ha comprobado muy sensible a las funciones objetivo planteadas. El resultado que se obtiene es un calendario que indica la fecha de realización de cada examen, con un horario concreto de mañana o tarde así como las aulas en las que se desarrollan los exámenes de cada asignatura, según su capacidad máxima de estudiantes. Además, se determina el número de profesores necesarios para la vigilancia de los exámenes. Todos estos resultados atienden a todas las restricciones expuestas que permiten la factibilidad de la solución. Para validar la herramienta y evaluar su eficiencia de computacional, se proponen distintos escenarios en función de la restrictividad deseada para cada caso. Se incluye un conjunto de restricciones optativas que dan lugar a 6 posibles combinaciones que son ejecutadas en orden decreciente de restrictividad y se analiza la solución obtenida de carácter factible del escenario más restrictivo posible, para cada una de las cuatro funciones objetivo. Se puede concluir que se obtienen unos resultados satisfactorios, pues la herramienta es capaz de generar soluciones óptimas para la programación de exámenes en un tiempo razonable y sustancialmente inferior al actualmente invertido por los gestores.

Es interesante mencionar el ahorro de tiempo que se logra al implementar ambas herramientas, frente al tiempo de gestión requerido actualmente al trabajar de forma manual. Con las herramientas diseñadas se obtiene una solución óptima en 32,29 minutos para los exámenes extraordinarios y en un total de 102,33 minutos para los exámenes ordinarios. Dados los tiempos actuales de 8 horas y 14 horas para para cada convocatoria de exámenes extraordinarios y ordinarios, respectivamente. Se puede afirmar que supone una gran reducción de tiempo, y sobre todo teniendo en cuenta que la solución en este caso no es aproximada o satisfactoria, sino que se logran los valores óptimos.

Por lo que respecta a las **futuras líneas de actuación**, se plantean dos principales con objeto de poder utilizar el prototipo desarrollado en este TFG a la realidad de la ETSII: la **primera**, sería perfeccionar los modelos planteados previamente a su utilización por la ETSII y la **segunda**, realizar una comparación exhaustiva de la calidad de las soluciones obtenidas en relación a las existentes.

Con respecto a la **primera futura línea de actuación**, se puede observar que en ambos modelos se incluyen restricciones destinadas a forzar el cumplimiento de restricciones opcionales (blandas) que buscan mejorar la calidad de la solución implementando políticas de la Escuela, como por ejemplo: la distancia mínima entre exámenes, o que las aulas destinadas a los exámenes de una asignatura estén en el mismo edificio y planta. Si con los datos planteados no fuera posible cumplir alguna de estas restricciones, eliminarlas por completo para obtener una solución factible sin intentar minimizar el número de veces que se incumplen, puede dar lugar a soluciones poco deseables. Una forma de considerarlas cuando su cumplimiento no es posible sería definir una nueva función objetivo que minimizara el número de veces que se incumplen (p.e. minimizar el número de asignaturas que no tienen todas las aulas en la misma planta de un mismo edificio), lo que requeriría también una reformulación de dichas restricciones. El modelo debería considerar entonces varias funciones objetivo, pasando a tener que ser formulado como un **modelo multi-objetivo**. Implementar objetivos asociados a la minimización de las

restricciones blandas se considera un aspecto prioritario antes de pasar a su implementación y uso en la realidad.

Con respecto a la **segunda futura línea de actuación**, comentar que se considera necesario establecer **una comparación en profundidad entre la calidad de las soluciones obtenidas con los modelos y las existentes en la actualidad en términos de sostenibilidad**, es decir, no sólo en términos de ahorro en tiempo de gestión tal y como se ha hecho, sino en términos de uso más eficiente de recursos físicos y energéticos (aulas) y también humanos (profesores) así como sociales (satisfacción de estudiantes y profesores con respecto a la solución obtenida).

7. PRESUPUESTO

Se tiene como objeto de este capítulo el desarrollo de un presupuesto detallado para cada parte de la elaboración de este TFG.

7.1 Introducción

En esta última sección del proyecto se busca realizar una estimación monetaria de la elaboración completa del TFG, desde la redacción del presente documento y la elaboración de todos los capítulos que éste incluye, así como el diseño, implementación y ejecución de las herramientas de ayuda a la toma de decisiones relacionadas con la programación de calendarios de exámenes. Para ofrecer un presupuesto organizado, este está dividido en cuatro partes principales correspondientes a los costes vinculados principalmente con los capítulos 2. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA, 3. ANTECEDENTES, 4. HERRAMIENTA DE AYUDA A LA TOMA DE DECISIONES PARA LA PROGRAMACIÓN DE EXÁMENES EXTRAORDINARIOS y 5. HERRAMIENTA DE AYUDA A LA TOMA DE DECISIONES PARA LA PROGRAMACIÓN DE EXÁMENES ORDINARIOS.

7.2 Contenido del presupuesto

En este apartado se procede a realizar un presupuesto dividido en las actividades principales que componen este TFG, para poder realizar una valoración monetaria del coste total de la elaboración del proyecto.

Los subapartados correspondientes a las actividades principales a evaluar son los siguientes: 1) Descripción de la problemática, 2) Antecedentes, 3) Diseño, implementación y aplicación a un caso real de las herramientas de optimización, y 4) Redacción y preparación del proyecto. Cabe destacar que en este caso no se tienen que considerar los costes de las licencias de los softwares informáticos empleados ya que algunos son de acceso libre y otros cuentan con una versión académica a la que la autora, como estudiante, y la universidad, tiene acceso.

7.2.1. Descripción de la problemática

Tarea	Descripción	Cantidad (h)	Tasa horaria (€/h)	Importe (€)
1. Comprensión y análisis del proceso de programación de exámenes extraordinarios	Entendimiento del proceso de gestión actual y las ineficiencias presentes en éstos.	8	15	120
2. Comprensión y análisis del proceso de programación de exámenes ordinarios		5	15	75
3. Tutorías	Resolución de dudas concretas.	4	50	200
TOTAL				395

Tabla 21. Presupuesto asociado a la descripción de la problemática (Fuente: elaboración propia).

7.2.2. Antecedentes

A continuación se detalla el análisis económico de los costes incurridos para analizar la literatura existente en torno al tema objeto de estudio.

Tarea	Descripción	Cantidad (h)	Tasa horaria (€/h)	Importe (€)
1. Recolección del material	Búsqueda y selección en distintas fuentes de BBDD.	10	15	150
2. Selección de categorías	Definición de la taxonomía y sus categorías para analizar los diferentes trabajos relacionados con los problemas objeto de estudio.	5	15	75
3. Evaluación del material	Análisis de cada estudio y determinación de la presencia o ausencia de las categorías definidas.	40	15	600
4. Tutorías	Dudas personalizadas acerca de cómo realizar correctamente la búsqueda de artículos y su análisis.	5	50	250
TOTAL				1075

Tabla 22. Presupuesto asociado a los Antecedentes (Fuente: elaboración propia).

7.2.3. Diseño, implementación y aplicación a un caso real de las herramientas de optimización.

A lo largo de este subapartado se detallan los costes resultantes de las actividades vinculadas con el diseño de las herramientas de optimización para el diseño de calendarios de exámenes extraordinarios y ordinarios, la implementación de dichos modelos en *Pyomo* y la solventación de los problemas eventuales debidos a pequeños errores a la hora de definir el código y ejecutar los modelos.

Tarea	Descripción	Cantidad (h)	Tasa horaria (€/h)	Importe (€)
1. Formación en el uso de Pyomo	Adquirir los conocimientos necesarios para poder transcribir el código de los modelos.	24	15	360
2. Diseño del modelo de exámenes extraordinarios	Elaboración de la nomenclatura, funciones objetivo y restricciones del modelo extraordinario.	15	15	225
3. Implementación de la herramienta de exámenes extraordinarios	Implementación del modelo en Pyomo, definición de la arquitectura, desarrollo e implementación de las herramientas de pre y posprocesado de datos.	40	15	600
4. Aplicación a un caso real de programación de exámenes extraordinarios	Recopilación de datos, generación de escenarios, resolución, validación y análisis de resultados.	20	15	300

5. Diseño del modelo de exámenes ordinarios	Elaboración de la nomenclatura, funciones objetivo y restricciones del modelo ordinario.	20	15	300
6. Implementación de la herramienta de exámenes ordinarios	Implementación del modelo en Pyomo, definición de la arquitectura, desarrollo e implementación de las herramientas de pre y posprocesado de datos.	80	15	1200
7. Aplicación a un caso real de programación de exámenes ordinarios	Recopilación de datos, generación de escenarios, resolución, validación y análisis de resultados.	20	15	300
8. Tutorías	Resolución de dudas de programación y del correcto entendimiento de los modelos.	20	50	1000
TOTAL				4285

Tabla 23. Presupuesto asociado al diseño, implementación y aplicación a un caso real de las herramientas de optimización (Fuente: elaboración propia).

7.2.4. Redacción y preparación del proyecto

A continuación se incluye la fase más larga, que ha estado presente desde el inicio hasta el final de la elaboración del presente TFG, que corresponde con la redacción y desarrollo del proyecto en su totalidad, detallada en la siguiente tabla:

Tarea	Descripción	Cantidad (h)	Tasa horaria (€/h)	Importe (€)
1. Redacción y preparación del TFG	Elaboración de un índice completo, redacción de todos los capítulos presentes, diseño de figuras y creación de tablas y ecuaciones.	80	15	1200
2. Revisión de documento	Revisión del documento por las tutoras	15	50	750
TOTAL				1950

Tabla 24. Presupuesto asociado a la redacción y preparación del proyecto (Fuente: elaboración propia).

7.2.5. Resumen

Para finalizar, se incluye un breve resumen de los costes del proyecto resultantes de los subapartados anteriores. Adicionalmente, se estima un porcentaje del 5% de los gastos totales vinculados con el material necesario para la completa elaboración del proyecto, desde material de oficina, impresos, desplazamientos y material informático.

Fase	Importe (€)
7.2.1. Descripción de la problemática.	395
7.2.2. Antecedentes.	1075
7.2.3. Diseño, implementación y aplicación a un caso real de las herramientas de optimización.	4285
7.2.4. Redacción y preparación del proyecto.	1950
Presupuesto de elaboración del proyecto	7705
Gastos varios (5%)	385,25
TOTAL	8090,25

Tabla 25. Resumen del presupuesto global de la elaboración del proyecto (Fuente: elaboración propia),

8. BIBLOGRAFÍA

- (ONU), O. d. (2022). *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)*. Obtenido de Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>
- (UPV), U. p. (2022). *Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial*. Obtenido de ETSII: <https://www.etsii.upv.es/index-es.php>
- Kasm, O.A., Mohandes, B., Diabat, A.H., & Khatib, S.E. (2019). Exam timetabling with allowable conflicts within a time window. *Comput. Ind. Eng.*, 127, 263-273.
- Ahmad, A., & Shaari, F. (2016). *Solving University/Polytechnics Exam Timetable Problem using Particle Swarm Optimization*. *Association for Computing Machinery.*, 46, 1-4.
- Arbaoui, T., Boufflet, J.-P., & Moukrim, A. (2016). *A matheuristic for exam timetabling*. *IFAC-PapersOnLine Volume 49, Issue 12, 1289-1294*
- Bruke, E., Jackson, K., H. Kingston, J., & Weare, R. (1997). Automated University Timetabling: The State of the Art. *The Computer Journal*, vol. 40, no. 9, pp. 565-571.
- Burke, E., Elliman, D., Ford, P., Weare, R. (1996). Examination timetabling in British Universities: A survey. In: Burke, E., Ross, P. (eds) *Practice and Theory of Automated Timetabling*. PATAT 1995. *Lecture Notes in Computer Science*, vol 1153.
- Burke, E., Gendreau, M., Hyde, M. *et al.* Hyper-heuristics: a survey of the state of the art. *J Oper Res Soc* 64, 1695–1724 (2013).
- Dimopoulou, Maria & Miliotis, P. (2001). Implementation of a university course and examination timetabling system. *European Journal of Operational Research*. 130. 202-213.
- Gashgari, R., Alhashimi, L., Obaid, R.M., & Palaniswamy, T. (2018). A Survey on Exam Scheduling Techniques. *2018 1st International Conference on Computer Applications & Information Security (ICCAIS)*, 1-5.
- Güray Güler, M., Geçici, E., Köroglu, T., & Becit, E. 2021. *A web-based decision support system for examination timetabling*. *Expert Syst. Appl.* 183, C (2021).
- Hart, W. E.-P. (2017). *Pyomo – Optimization Modeling in Python*. Obtenido de <https://pyomo.readthedocs.io/en/stable/index.html#>
- Hart, W., Watson, J.-P., & Woodruff, D. (2022). *Pyomo Documentation 6.4.1*. Obtenido de <https://pyomo.readthedocs.io/en/stable/>
- Nergiz A. Ismayilova, Mujgan Sağır, and Rafail N. Gasimov. 2007. *A multiobjective faculty-course-time slot assignment problem with preferences*. *Math. Comput. Model.* 46, 7–8 (2007), 1017–1029.
- J. Kadam, V., & S. Yadav, S. (2016). ACADEMIC TIMETABLE SCHEDULING : REVISITED. *International Journal of Research In Science & Engineering*, 417-423.
- Kumar Bania, Rubul & Duarah, Pinkey. (2018). Exam Time Table Scheduling using Graph Coloring Approach. *INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTER SCIENCES AND ENGINEERING*. 6.

- Kusumawardani, Dian & Mukhlason, Ahmad & Supoyo, Vicha. (2019). Examination Timetabling Automation and Optimization using Greedy-Simulated Annealing Hyper-heuristics Algorithm. 1-6.
- . Mauritsius, A. N. Fajar, Harisno and P. John, "Novel Local Searches for Finding Feasible Solutions in Educational Timetabling Problem," *2017 5th International Conference on Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering (ICICI-BME)*, 2017, pp. 270-275.
- Molina, E. (2008). *Universidad Carlos III de Madrid*. Obtenido de http://www.est.uc3m.es/esp/nueva_docencia/comp_col_leg/ing_tec_inf_gestion/io/doc_col_grupo1/archivos/PL-08-primera-parte.pdf
- Muklason, A., Bagus, G., & Marom, A. (2019). *Great Deluge Based Hyper-heuristics for Solving Real-world University Examination Timetabling Problem: New Data set and Approach*. *Procedia Computer Science*, 161, 2019, 647-655.
- Ahmed, Leena & Özcan, Ender & Kheiri, Ahmed. (2015). Solving High School Timetabling Problems Worldwide Using Selection Hyper-heuristics. *Expert Systems with Applications*. 42. 5463–5471.
- Pérez, F. (2022). *Jupyter Project Documentation*. Obtenido de <https://docs.jupyter.org/en/latest/>
- Ramos, A. (2019). *Programación lineal entera mixta - Universidad Pontificia Comillas*. Obtenido de https://www.comillas.edu/https://pascua.iit.comillas.edu/aramos/simio/transpa/t_mip_ar.pdf
- Rothberg, E., Bixby, B., & Gu, Z. (2022). *Gurobi Optimization*. Obtenido de <https://www.gurobi.com/documentation/>
- Suñé, A., B. Fonollosa, J., Fernández, V., & M. Sallán, J. (2016). *MÉTODOS CUANTITATIVOS PARA LA TOMA DE DECISIONES*. Barcelona: Iniciativa Digital Politècnica, Oficina de Publicacions Acadèmiques Digitals de la UPC.
- Universidad Politécnica de Valencia, U. (Junio de 2022). *Competencias transversales en la UPV*. Obtenido de www.upv.es: <http://www.upv.es/contenidos/COMPTRAN/>
- Vicéns Salort, E., Ortiz Bas, Á., & Guarch Bertolín, J. J. (1998). *Métodos Cuantitativos, Volumen I*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.

ANEXOS

Índice

Anexo 1: Programación de Exámenes Extraordinarios.....	97
Anexo 2: Tablas de los resultados obtenidos en los diferentes escenarios planteados en el modelo de exámenes extraordinarios.....	98
Anexo 3: Tablas de los resultados obtenidos en los diferentes casos planteados en el modelo de exámenes ordinarios.....	114

Índice de tablas

Anexo 1, Tabla 1. Parámetros (a) (Fuente: elaboración propia).....	97
Anexo 2, Tabla 1. Calendario resultante para cada estudiante en el caso 1-TIT (Fuente: elaboración propia).....	101
Anexo 2, Tabla 2. Calendario resultante para cada estudiante en el caso 2-TIT (Fuente: elaboración propia).....	105
Anexo 2, Tabla 3. Calendario resultante para cada estudiante en el caso 3-TIT (Fuente: elaboración propia).....	108
Anexo 2, Tabla 4. Calendario resultante para cada estudiante en el caso 1-GITI (Fuente: elaboración propia).....	110
Anexo 2, Tabla 5. Calendario resultante para cada estudiante en el caso 2-GITI (Fuente: elaboración propia).....	111
Anexo 2, Tabla 6. Calendario resultante para cada estudiante en el caso 3-GITI (Fuente: elaboración propia).....	113
Anexo 3, Tabla 1. Calendario de exámenes según titulación y curso para el caso 1 (Fuente: elaboración propia).....	118
Anexo 3, Tabla 2. Calendario de exámenes según el aula de cada examen para el caso 1 (Fuente: elaboración propia).....	120
Anexo 3, Tabla 3. Calendario de exámenes según titulación y curso para el caso 2 (Fuente: elaboración propia).....	123
Anexo 3, Tabla 4. Calendario de exámenes según el aula de cada examen para el caso 2 (Fuente: elaboración propia).....	125
Anexo 3, Tabla 5. Calendario de exámenes según titulación y curso para el caso 3 (Fuente: elaboración propia).....	129
Anexo 3, Tabla 6. Calendario de exámenes según el aula de cada examen para el caso 3 (Fuente: elaboración propia).....	131
Anexo 3, Tabla 7. Calendario de exámenes según titulación y curso para el caso 4 (Fuente: elaboración propia).....	134

Anexo 3, Tabla 8. Calendario de exámenes según el aula de cada examen para el caso 4
(Fuente: elaboración propia). 136

Anexo 1: Programación de Exámenes Extraordinarios.

A continuación, se incluye la tabla del parámetro $ns(a)$ que indica el número de estudiantes que solicita asistir al examen de cada asignatura (a).

a	$ns(a)$
1	9
2	15
3	28
4	5
5	2
6	2
7	2
8	3
9	5
10	2
11	1
12	2
13	1
14	1
15	2
16	1
17	4
18	2
19	2
20	1
21	1
22	1
23	1
24	1
25	1
26	17
27	19
28	9
29	3
30	1
31	1
32	1
33	2
34	1
35	5
36	4
37	11
38	2
39	1
40	2
41	1
42	1
43	1

Anexo 1, Tabla 1. Parámetro $ns(a)$ (Fuente: elaboración propia).

Anexo 2: Tablas de los resultados obtenidos en los diferentes escenarios planteados en el modelo de exámenes extraordinarios

Las siguientes tablas muestran, para cada uno de los casos planteados en el capítulo 4, el calendario de exámenes resultante para cada estudiante, donde en cada fila se observa el código de la asignatura de la cual tienen el examen en la fecha y hora indicada en las columnas.

S	Segmento temporal										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	L 11/07 8:00	L 11/07 15:00	M 12/07 8:00	M 12/07 15:00	X 13/07 8:00	X 13/07 15:00	J 14 /07 - 8:00	J 14 /07 - 15:00	V 15 /07 - 8:00	V 15 /07 - 15:00	
1	11428		11426		11425		11427				
2			11426								
3	11428		11426				11408				
4									11416		
5	11428				11425						
6	11428				11425						
7	11428										
8	11428						11431		11429		
9					11425				11424		
1											
0	11428		11426						11424		
1											
1	11428				11425		11427				
1											
2					11425						
1											
3	11428										
1											
4	11428						11431				
1											
5	11428		11426		11425						
1											
6	11428										
1											
7	11428				11425						
1											
8	11428								11424		
1											
9					11425						
2											
0	11428				11425						
2											
1	11428						11408		11424		
2											
2	11428										
2											
3	11428										

2					
4	11428	11426	11425		
2					
5	11435	11432	11425		
2					
6	11428	11432			11423
2					
7	11428				
2					
8	11428			11427	
2					
9	11428				
3					
0	11428				11416
3					
1	11407	11426			
3					
2	11418				11423
3					
3		11426			11421
3					
4	11428		11425	11427	11424
3					
5	11428		11425	11427	11421
3					
6				11431	11429
3					
7	11428				
3					
8		11426			
3					
9	11428				
4					
0			11425		
4					
1				11419	
4					
2	11490			11494	
4					
3	11490			11494	11478
4					
4	11499				
4					
5					11478
4					
6	11490				11501
4					
7	11527			11485	11534
4					
8	11490				11495
4					
9	12954				12961

5				
0	12954			
5				
1		12963		
5				
2	12954			12961
5				
3	12954			
5				
4				12961
5				
5	12954			
5				
6		12963		12961
5				
7	12954			12961
5				
8	12954			12961
5				
9	12954	12963		12961
6				
0	12954	12963		12961
6				
1	12954	12963	12959	
6				
2	12954	12963		
6				
3	12954			12961
6				
4	12954	12963		12961
6				
5		12963	12959	12961
6				
6	12954			
6				
7	12954			
6				
8				12961
6				
9			12959	12961
7				
0	12954	12955	12952	12961
7				
1	12954	12941		12949
7				
2	12954	12963		12961
7				
3				12961
7				
4	12954	12941		12961
7				
5			13059	

7										
6		12298							13988	
7										
7	12272									
7										
8	12272			12288						
7										
9	12272	12289								
8										
0	12272								13988	
8										
1	12272	12298								
8										
2	12272					12273				
8										
3	12272	12298								
8										
4	12272	12285		12275		12273				
8										
5	12272								13988	
8										
6	12272									
8										
7									13988	
8										
8						12276				
8										
9									13988	
9										
0	12272	12298		12288						

Anexo 2, Tabla 1. Calendario resultante para cada estudiante en el caso 1-TIT (Fuente: elaboración propia).

S	Segmento temporal									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	L 11	L 11	M 12	M 12	X 13	X 13	J 14	J 14	V 15	V 15
	/07 -	/07 -	/07 -	/07 -	/07 -	/07 -	/07 -	/07 -	/07 -	/07 -
	8:00	15:00	8:00	15:00	8:00	15:00	8:00	15:00	8:00	15:00
1	11428		11425		11426				11427	
2					11426					
3	11428		11408		11426					
4			11416							
5	11428		11425							
6	11428		11425							
7	11428									
8	11428		11431		11429					
9			11425				11424			
1										
0	11428				11426		11424			
1										
1	11428		11425						11427	

1				
2		11425		
1				
3	11428			
1				
4	11428	11431		
1				
5	11428	11425	11426	
1				
6	11428			
1				
7	11428	11425		
1				
8	11428			11424
1				
9		11425		
2				
0	11428	11425		
2				
1	11428	11408		11424
2				
2	11428			
2				
3	11428			
2				
4	11428	11425	11426	
2				
5	11435	11425	11432	
2				
6	11428	11423	11432	
2				
7	11428			
2				
8	11428			11427
2				
9	11428			
3				
0	11428	11416		
3				
1	11407		11426	
3				
2	11418	11423		
3				
3			11426	11421
3				
4	11428	11425	11424	11427
3				
5	11428	11425	11421	11427
3				
6		11431	11429	
3				
7	11428			

3				
8			11426	
3				
9	11428			
4				
0		11425		
4				
1	11419			
4				
2	11490		11494	
4				
3	11490	11478	11494	
4				
4	11499			
4				
5		11478		
4				
6	11490	11501		
4				
7	11527	11485	11534	
4				
8	11490	11495		
4				
9	12954	12961		
5				
0	12954			
5				
1			12963	
5				
2	12954	12961		
5				
3	12954			
5				
4		12961		
5				
5	12954			
5				
6		12961	12963	
5				
7	12954	12961		
5				
8	12954	12961		
5				
9	12954	12961	12963	
6				
0	12954	12961	12963	
6				
1	12954		12963	12959
6				
2	12954		12963	
6				
3	12954	12961		

6				
4	12954	12961	12963	
6				
5		12961	12963	12959
6				
6	12954			
6				
7	12954			
6				
8		12961		
6				
9		12961		12959
7				
0	12954	12961	12952	12955
7				
1	12954	12949	12941	
7				
2	12954	12961	12963	
7				
3		12961		
7				
4	12954	12961	12941	
7				
5	13059			
7				
6		13988	12298	
7				
7	12272			
7				
8	12272	12288		
7				
9	12272	12289		
8				
0	12272	13988		
8				
1	12272		12298	
8				
2	12272	12273		
8				
3	12272		12298	
8				
4	12272	12273	12285	12275
8				
5	12272	13988		
8				
6	12272			
8				
7		13988		
8				
8	12276			
8				
9		13988		

9			
0	12272	12288	12298

Anexo 2, Tabla 2. Calendario resultante para cada estudiante en el caso 2-TIT (Fuente: elaboración propia).

S	Segmento temporal									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	L 11 /07 - 8:00	L 11 /07 - 15:00	M 12 /07 - 8:00	M 12 /07 - 15:00	X 13 /07 - 8:00	X 13 /07 - 15:00	J 14 /07 - 8:00	J 14 /07 - 15:00	V 15 /07 - 8:00	V 15 /07 - 15:00
1	11427				11428		11425			11426
2										11426
3	11408				11428					11426
4										11416
5					11428		11425			
6					11428		11425			
7					11428					
8	11429				11428			11431		
9			11424				11425			
0			11424		11428					11426
1										
1	11427				11428		11425			
1							11425			
2										
3					11428					
4					11428			11431		
5					11428		11425			11426
6					11428					
7					11428		11425			
8			11424		11428					
9							11425			
0					11428		11425			
2										
1	11408		11424		11428					
2										
2					11428					
2										
3					11428					
2										
4					11428		11425			11426
2										
5	11432			11435			11425			

2					
6	11432		11428		11423
2					
7			11428		
2					
8	11427		11428		
2					
9			11428		
3					
0			11428		11416
3					
1		11407			11426
3					
2			11418		11423
3					
3		11421			11426
3					
4	11427	11424	11428	11425	
3					
5	11427	11421	11428	11425	
3					
6	11429				11431
3					
7			11428		
3					
8					11426
3					
9			11428		
4					
0				11425	
4					
1	11419				
4					
2			11494		11490
4					
3	11478		11494		11490
4					
4	11499				
4					
5	11478				
4					
6			11501		11490
4					
7		11485		11534	11527
4					
8	11495			11490	
4					
9		12961			12954
5					
0					12954
5					
1	12963				

5				
2		12961		12954
5				
3				12954
5				
4		12961		
5				
5				12954
5				
6	12963	12961		
5				
7		12961		12954
5				
8		12961		12954
5				
9	12963	12961		12954
6				
0	12963	12961		12954
6				
1	12963		12959	12954
6				
2	12963			12954
6				
3		12961		12954
6				
4	12963	12961		12954
6				
5	12963	12961	12959	
6				
6				12954
6				
7				12954
6				
8		12961		
6				
9		12961	12959	
7				
0	12955	12961		12954
7			12952	
1	12941		12949	12954
7				
2	12963	12961		12954
7				
3		12961		
7				
4	12941	12961		12954
7				
5	13059			
7				
6	13988			12298
7				
7		12272		

7										
8	12288			12272						
7										
9	12289			12272						
8										
0	13988			12272						
8										
1				12272						12298
8										
2				12272		12273				
8										
3				12272						12298
8										
4	12285			12272		12273		12275		
8										
5	13988			12272						
8										
6				12272						
8										
7	13988									
8										
8	12276									
8										
9	13988									
9										
0	12288			12272						12298

Anexo 2, Tabla 3. Calendario resultante para cada estudiante en el caso 3-TIT (Fuente: elaboración propia).

S	Segmento temporal									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	L 11 /07 - 8:00	L 11 /07 - 15:00	M 12 /07 - 8:00	M 12 /07 - 15:00	X 13 /07 - 8:00	X 13 /07 - 15:00	J 14 /07 - 8:00	J 14 /07 - 15:00	V 15 /07 - 8:00	V 15 /07 - 15:00
1	11428		11426				11427		11425	
2			11426							
3	11428		11426						11408	
4									11416	
5	11428								11425	
6	11428								11425	
7	11428									
8	11428		11431		11429					
9					11424				11425	
1										
0	11428		11426		11424					
1										
1	11428						11427		11425	
1										
2									11425	
1										
3	11428									

1				
4	11428	11431		
1				
5	11428	11426		11425
1				
6	11428			
1				
7	11428			11425
1				
8	11428		11424	
1				
9				11425
2				
0	11428			11425
2				
1	11428		11424	11408
2				
2	11428			
2				
3	11428			
2				
4	11428	11426		11425
2				
5	11435		11432	11425
2				
6	11428		11423	11432
2				
7	11428			
2				
8	11428		11427	
2				
9	11428			
3				
0	11428			11416
3				
1	11407	11426		
3				
2	11418		11423	
3				
3		11426	11421	
3				
4	11428		11424	11427
3				11425
5	11428		11421	11427
3				11425
6		11431	11429	
3				
7	11428			
3				
8		11426		
3				
9	11428			

4	
0	11425
4	
1	11419

Anexo 2, Tabla 4. Calendario resultante para cada estudiante en el caso 1-GITI (Fuente: elaboración propia).

S	Segmento temporal									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	L 11 /07 - 8:00	L 11 /07 - 15:00	M 12 /07 - 8:00	M 12 /07 - 15:00	X 13 /07 - 8:00	X 13 /07 - 15:00	J 14 /07 - 8:00	J 14 /07 - 15:00	V 15 /07 - 8:00	V 15 /07 - 15:00
1	11428		11425		11426				11427	
2					11426					
3	11428		11408		11426					
4			11416							
5	11428		11425							
6	11428		11425							
7	11428									
8	11428		11431		11429					
9			11425				11424			
1										
0	11428				11426		11424			
1										
1	11428		11425						11427	
1										
2			11425							
1										
3	11428									
1										
4	11428		11431							
1										
5	11428		11425		11426					
1										
6	11428									
1										
7	11428		11425							
1										
8	11428						11424			
1										
9			11425							
2										
0	11428		11425							
2										
1	11428		11408				11424			
2										
2	11428									
2										
3	11428									
2										
4	11428		11425		11426					

2										
5	11435	11425		11432						
2										
6	11428	11423		11432						
2										
7	11428									
2										
8	11428							11427		
2										
9	11428									
3										
0	11428	11416								
3										
1	11407			11426						
3										
2	11418	11423								
3										
3				11426		11421				
3										
4	11428	11425				11424		11427		
3										
5	11428	11425				11421		11427		
3										
6		11431		11429						
3										
7	11428									
3										
8				11426						
3										
9	11428									
4										
0		11425								
4										
1	11419									

Anexo 2, Tabla 5. Calendario resultante para cada estudiante en el caso 2-GITI (Fuente: elaboración propia).

S	Segmento temporal									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	L 11	L 11	M 12	M 12	X 13	X 13	J 14	J 14	V 15	V 15
	/07 -	/07 -	/07 -	/07 -	/07 -	/07 -	/07 -	/07 -	/07 -	/07 -
	8:00	15:00	8:00	15:00	8:00	15:00	8:00	15:00	8:00	15:00
1	11425		11428			11426				11427
2						11426				
3	11408		11428			11426				
4	11416									
5	11425		11428							
6	11425		11428							
7			11428							
8	11429		11428							11431
9	11425							11424		

1				
0		11428	11426	11424
1				
1	11425	11428		11427
1				
2	11425			
1				
3		11428		
1				
4		11428		11431
1				
5	11425	11428	11426	
1				
6		11428		
1				
7	11425	11428		
1				
8		11428		11424
1				
9	11425			
2				
0	11425	11428		
2				
1	11408	11428		11424
2				
2		11428		
2				
3		11428		
2				
4	11425	11428	11426	
2				
5	11425		11435	11432
2				
6		11428		11432
2				11423
2				
7		11428		
2				
8		11428		11427
2				
9		11428		
3				
0	11416	11428		
3				
1	11407		11426	
3				
2			11418	11423
3				
3			11426	11421
3				
4	11425	11428		11424
3				11427
5	11425	11428		11421
				11427

3			
6	11429		11431
3			
7		11428	
3			
8			11426
3			
9		11428	
4			
0	11425		
4			
1	11419		

Anexo 2, Tabla 6. Calendario resultante para cada estudiante en el caso 3-GITI (Fuente: elaboración propia).

Anexo 3: Tablas de los resultados obtenidos en los diferentes casos planteados en el modelo de exámenes ordinarios.

A continuación se adjuntan dos tablas para cada uno de los cuatro casos. La primera tabla muestra para cada curso de cada titulación, la fecha y horario en que tiene lugar el examen de cada asignatura. La segunda tabla incluye un calendario en el que se indica la fecha y horario de cada asignatura, así como el aula en el que tienen lugar los exámenes.

Fecha y horario	25/10		26/10		22/10		21/10		28/10		20/10		27/10		02/11		29/10	
Titulación y curso	8h	15h	8h	15h	8h	15h	8h	15h	8h	15h	8h	15h	8h	15h	8h	15h	8h	15h
MUIB																		
1º obligatorio	1445 5		1445 6		14457		14458		14459		1446 0		1446 1					
GITI																		
1º obligatorio	1140 0										1140 6		1140 2		1140 4			
2º obligatorio		11435		1141 5				1141 7						1143 6				1141 1
3º obligatorio	1142 3		1140 8		11418		11416		11407									1142 6
4º obligatorio				1142 1		1142 5		1142 8		1141 9		1142 7					1142 4	
2º optativas											1299 1		1343 6					
4º optativas	1466 3				13755		13884		14661		1466 2							1344 4
GIOI																		
1º obligatorio	1147 5				11473						1147 0		1147 2					
2º obligatorio		11481		1149 2		1148 6		1147 7						1148 5		1148 7		1148 8

3º obligatorio	1149 0		1149 9		11497		11478		11494							1149 8	
4º optativas												1321 6					
4º organización				1150 7		1150 6				1148 9		1150 8					1150 5
3º optativas											1307 1		1343 4				
4º tecnologías	1152 8			1152 4		1152 7		1152 6		1148 9		1153 4				1152 5	1152 9
GIE																	
1º obligatorio					12929				10169		1293 2				1293 4		
2º obligatorio						1294 2				1294 9				1294 8		1294 7	1293 9
3º obligatorio			1295 0		12946		12941				1295 6		1293 7		1293 6		1295 1
4º obligatorio		12963				1295 7		1295 4				1296 0		1296 1			1295 9
2º optativas											1296 5		1343 0				
4º optativas																	1424 0
GIB																	
1º obligatorio			1304 5		13040				13034		1391 7				1303 6		
2º obligatorio		13029				1303 2		1304 1				1303 1				1305 1	1303 3
3º obligatorio	1305 3		1306 6						13054		1305 0				1305 8		

4º obligatorio		13068						13059		13056							13062
4º optativas													13429				
GIQ																	
1º obligatorio			13963		12262						12268				12265		
2º obligatorio				12266		12276				12282		12294		12295		12293	
3º obligatorio	12285		12287		12274		12291		12275								
4º obligatorio						12273		12272				12288				12280	
4º optativas														13988			12298
3º optativas		12297															
MUIQ																	
2º op.3 bloque 1 y op.3 bloque 2		34762		33490		33478				33477				33476		33489	33491
2º op.1 bloque 1 y op.1 bloque 2		34761				33482				33481		33483		33476		33484	33485
2º op.1 bloque 1 y op.2 bloque 2				33490		33482				33481		33488		33476		33486	33487
2º op.1 bloque 1 y op.3 bloque 2		34762				33482				33481				33476		33489	33491

2º op.2 bloque 1 y op.1 bloque 2	34761						3348 0		3347 9		3348 3		3347 6		3348 4		3348 5
2º op.2 bloque 1 y op.2 bloque 2							3348 0		3347 9		3348 8		3347 6		3348 6		3348 7
2º op.2 bloque 1 y op.3 bloque 2	34762		3349 0				3348 0		3347 9				3347 6		3348 9		3349 1
2º op.3 bloque 1 y op.1 bloque 2	34761					3347 8			3347 7		3348 3		3347 6		3348 4		3348 5
2º op.3 bloque 1 y op.2 bloque 2						3347 8			3347 7		3348 8		3347 6		3348 6		3348 7
MUII																	
2º optativas											3455 5				3512 6		
2º Utilización energía	33759					3376 2	3376 0				3376 3		3376 1				3376 4
2º Electrónica							3372 4		3372 2		3372 3				3372 8		3372 7
2º Medio ambiente	33757		3375 6			3375 3	3375 2				3375 5						
2º Generación energía	33707		3370 3						3370 4		3370 5		3370 6		3370 2		
2º Construcciones			3368 2			3368 1			3368 4		3367 9				3368 3		3367 8
2º Producto	33700						3369 5		3370 1		3369 4		3369 8				3369 7

2º Control automática y robótica		33686				33687		33688				33689				33691		33690
2º Organización		33746						33747				33750		33748		33749		33744
2º Materiales		33741		33738						33739				33736		33740		33737
2º Mecánica		33732		33731		33730		33733				33729						
2º Eléctrica		33714		33720		33721		33717		33719		33718						

Anexo 3, Tabla 1. Calendario de exámenes según titulación y curso para el caso 1 (Fuente: elaboración propia).

Fecha	25/10/2022		26/10/2022		22/10/2022		21/10/2022		28/10/2022		20/10/2022		27/10/2022		02/11/2022		29/10/2022	
Aulas	8h	15h																
032	14455	12297				13032	11478	11477			12932				12265			
110			14456	33720	13755	33687		33717			14662	33483		12295				33678
311					14457		13884		14459	33479	14460	33729		33698			11529	
527		33746		33682		12273	14458		14661	33477	12268	33689						33764
222	13053			11524	12929				11494		11470	11534	14461					
014	11400	12963			11418	12942					11406	11427			12934	11424	11426	13033
022	11400	33714	12950	11421		11486				12949	12965					33702		33697
023	11400			11415		11425					12991	33755	13216	11485		11487		33690
031	11400	11435	11408	11415	11418	11425	11416	33747	11407	11419	11406	11427	11402	11436	11404	11424		12959
041	11400	11435	13045	11421	11418	11425	11416	11417	11407	11419	12956	11508	11402	11436	11404	11424	11426	12939
011	11423	11435	11408	11415	11497	11425	11416	11417	11407	13056	11406	11427	11402	11436	13036	11424	11426	33744
021	11423	11435	11408	11421	11418	12957	11416	13059	11407	11419	11406	11427	11402	12948	11404	13051	11426	13062
025	12285	11481	11499					11417	10169		12932		11402					13033
033	12285	34761	11499		12262	12942		11477		12949		33705		11485	11404			33727

035	11423	12963						12954							11404		11426	
521			13963	12266	11473	12273		11428				12294				33728		11411
522	11475		13963	12266				11428			12268					12293		11411
523	11475			11492	11473			11428		33739		12294	13436					11411
525		33707						11428		33719	13071		13436			11525		11411
526		33746		11492				11428					33488			12293		11411
013	11423		11408	11415				11417	10169					11436		33489		
024	11490	12297	12287	11421		13032		12954		11419		33723			12265			
312				33738		33730		33688		33481			13429				13444	
524	14663												33718				33486	
223					12929	12276		33695			11470		13434	12961		33740	12951	11488
421	11528	34762						12272	12275	12282	13050	12960	11472	13988		12280		
425							12291	12272	13034				11472	33476		33749		33487
012	11490	11481	12287	33703		11486								33706		11487	12298	
211					12274	33478		11526					13031					11488
034				33756	12262		11478						33679		12934		12298	
214					12274	12276			11494	33722		13031		33761				
323		13068	13066	11507	12946	11506	12941	13041	13054	11489	13917	33750	12937	33748	13058	12947	11498	11505
112						11527		33724			34555		13430	12295	35126	33691		
424		13029			13040				12275	33704		12288			12936	33749		
420										33684		12960		33736				
212		33759		33490						33701		33694		12961				33737
111		33700		33731		33762											14240	
410		33757			13040	33721		33760	13034	12282		12288				33683		33491
411		13029				33681	12291				13050			13988		12280		33485
215	13053	33686						33733								33484		
213		33732				33482		33480				33763						
412		33741				33753		33752										

Anexo 3, Tabla 2. Calendario de exámenes según el aula de cada examen para el caso 1 (Fuente: elaboración propia).

Fecha y horario	25/10		26/10		22/10		21/10		28/10		20/10		27/10		02/11		29/10	
Titulación y curso	8h	15h																
MUIB																		
1º obligatorio	1445 7		1445 9		1446 1		1445 5				1445 6		1446 0				1445 8	
GITI																		
1º obligatorio	1140 0				1140 4						1140 2		1140 6					
2º obligatorio		1141 7				1141 1		1143 5				1143 6				1141 5		
3º obligatorio	1142 6		1140 8		1141 8		1141 6				1140 7				1142 3			
4º obligatorio				1142 4		1142 7		1141 9		1142 1		1142 8		1142 5				
2º optativas											1343 6							1299 1
4º optativas	1344 4		1375 5						1466 1		1388 4		1466 2					1466 3
GIOI																		
1º obligatorio	1147 3				1147 5						1147 0							1147 2
2º obligatorio		1147 7		1148 5		1148 7		1148 1		1148 6		1149 2		1148 8				
3º obligatorio	1147 8		1149 4		1149 0		1149 9		1149 7				1149 8					
4º optativas											1321 6							
4º organización		1150 7		1150 5		1150 6		1148 9				1150 8						

3º optativas										1343 4						1307 1	
4º tecnologías	1152 9			1152 5		1153 4		1148 9		1152 4		1152 6		1152 7	1152 8		
GIE																	
1º obligatorio	1293 4				1293 2				1016 9		1292 9						
2º obligatorio		1294 7				1294 8		1294 2				1294 9		1293 9			
3º obligatorio	1294 6		1293 6		1293 7		1294 1		1295 0		1295 6		1295 1				
4º obligatorio		1296 0		1295 9		1296 1		1296 3		1295 7		1295 4					
2º optativas											1343 0						1296 5
4º optativas													1424 0				
GIB																	
1º obligatorio	1303 6				1304 0						1303 4		1391 7				1304 5
2º obligatorio		1303 3		1305 1		1302 9		1303 1				1303 2		1304 1			
3º obligatorio	1305 8		1306 6		1305 4		1305 3				1305 0						
4º obligatorio						1306 8		1305 6				1305 9		1306 2			
4º optativas											1342 9						
GIQ																	

1º obligatorio	1226 8				1226 5					1226 2	1396 3						
2º obligatorio		1229 5		1228 2		1227 6		1226 6			1229 3	1229 4					
3º obligatorio	1227 4					1227 5		1228 5			1228 7					1229 1	
4º obligatorio						1227 2		1228 0		1228 8		1227 3					
4º optativas			1229 8								1398 8						
3º optativas				1229 7													
MUIQ																	
2º op.3 bloque 1 y op.3 bloque 2		3347 8		3349 1		3348 9		3347 7		3476 2		3347 6		3349 0			
2º op.1 bloque 1 y op.1 bloque 2		3348 2		3348 5		3348 3		3348 1				3347 6		3348 4			3476 1
2º op.1 bloque 1 y op.2 bloque 2		3348 2		3348 6		3348 8		3348 1		3348 7		3347 6		3349 0			
2º op.1 bloque 1 y op.3 bloque 2		3348 2		3349 1		3348 9		3348 1		3476 2		3347 6					
2º op.2 bloque 1 y op.1 bloque 2		3348 0		3348 5		3348 3		3347 9				3347 6		3348 4			3476 1
2º op.2 bloque 1 y op.2 bloque 2		3348 0		3348 6		3348 8		3347 9		3348 7		3347 6					
2º op.2 bloque 1 y op.3 bloque 2		3348 0		3349 1		3348 9		3347 9		3476 2		3347 6		3349 0			
2º op.3 bloque 1 y op.1 bloque 2		3347 8		3348 5		3348 3		3347 7				3347 6		3348 4			3476 1

2º op.3 bloque 1 y op.2 bloque 2		3347 8		3348 6		3348 8		3347 7		3348 7		3347 6						
MUII																		
2º optativas							3512 6					3455 5						
2º Utilización energía		3375 9		3376 2		3376 3		3376 4				3376 1		3376 0				
2º Electrónica		3372 8		3372 7								3372 3		3372 2				3372 4
2º Medio ambiente		3375 5				3375 7		3375 3				3375 2		3375 6				
2º Generación energía		3370 4		3370 3		3370 6		3370 5				3370 7		3370 2				
2º Construcciones		3368 4		3367 8		3368 2		3368 1				3368 3						3367 9
2º Producto		3369 8		3369 4				3369 5		3369 7				3370 1				3370 0
2º Control automática y robótica		3368 6		3368 7		3369 0		3369 1		3368 8		3368 9						
2º Organización		3374 7		3374 8		3374 4		3374 6				3374 9		3375 0				
2º Materiales		3374 1		3373 9		3373 6		3374 0				3373 8		3373 7				
2º Mecánica		3373 2		3373 3				3372 9		3373 0		3373 1						
2º Eléctrica						3371 9		3372 1		3371 8		3371 7		3372 0			3371 4	

Anexo 3, Tabla 3. Calendario de exámenes según titulación y curso para el caso 2 (Fuente: elaboración propia).

Fecha	25/10/2022		26/10/2022		22/10/2022		21/10/2022		28/10/2022		20/10/2022		27/10/2022		02/11/2022		29/10/2022	
Aulas	8h	15h																
032	12268	12295		11424	11404	11411	12941	12266			11407	11428		11425				
110				33694	13040	12276		13056	10169	11524	12929	11526	14460				14458	
311				33762		12961		33695	14661	33487	13429	33476		33756				
527	11400	11507		33687	11418	13029		33746		33730	13050	33723	14662	33722	11423			
222	11478	33728	11408	33678		11487	12285	12963			13436	13059		33490				
014	11426	33704	12298		11404	11427	11416	11419			11407	11428		33702				
022	13036	33482	12936		13054	11411	11416	33705			11407	12273	11406	11425				
023	11426	33698	12298	12959	13054	11427	11416	33681			11402	12954		11425				
031	12268			11424	12937	11427	12941	11435			11407	11428	11406	12939				33700
041	11473	33478	11494	11485	12932	13068		11419	12950		11402	11508		12294			12291	
011	11473	33741	11494	11485	12275	12272		33729		11486	13034	12273	12951	13041			12291	
021	12946		12936	33748	11404	12272	11416	11435			11402	11428	11406	12939				
025	13036	33684	12298	11424	11404	11411	11416	12266		34762	13034	11492	11406	12294				
033	11426	33759		11424	11404	11427	11416	11419			11402			11425			14663	
035	11426	13033	13755	11424	12275	11411		11419	12950		11402	33749		12294			13045	
521	11400	11477			11418	13029		12942		11421	12287	11436	14662	11488	11423	33714	11472	
522	11400	11507			11418	11534	13053	12942		11421	13050	11436		11488	11423		12965	
523	11400	11477		11525	11418	12948	13053	33746		11421	11470	11436		11488	11423		11472	
525	11400	33686			14461	12948		33721		11421	12287	11436		33701			12965	
526	11400	11477			11418	33483		33479		33730	11470	11436			11423			
013	13036	13033		33703	12932	11427		11435			11407	12954	11406	11425				34761
024	12268		12936	12959	11404	11411		11435			13430	33749		12939				
312	12274	12960		12297	11490	33488	35126				12262	33476		33750				
524		33732		33727	11418	33682		33764		11421	34555	33683		33720				
223		33747	11408	33485		11487	12285	13031			13436	12293		11527				
421	12934	11417	13066	11505	11475			11499	11481		12288	14456	12949	11498			11415	

425	11529	11417		13051	12265	33744	11499	11481			12956	33689	13963			11415		
012	11426	12295			11404	11411	11416	11419			11407	11428		11425			13045	
211	11478	33480	11408	33733		11506		12280		33718		33738	14240					
034	11426			11424		33719	11416	11435		11486	11402	11492		12294				
214		12947	11408			33706		12280			13988	13059						
323	12274	12960		12297	11490	12961	35126	11489	11497		12262	33707		33750			12991	33679
112						12276	14455	13056	10169	33697	12929	33717		33484	11528		13071	33724
424	13058	11417		12282	11475		11499	33753		12957	13216	13032	13917	13062		11415		
420	14457	11417	13066	12282		33757					12956	33752	13963			11415		
212	11478	12947	11408			11506	12285	13031			13988	33731						
111		33755		33491	13040	33763		33481			12929	33761						
410	12934	11417	14459	11505	12265	33744				12288	13434	13032	13917	13062		11415		
411	13058	11417	14459	13051		33489		33477		12957	13884	12949	13963			11415		
215		33747	11408	33486		33690		33691		33688	13988	12293		33737				
213		12947	11408	33739		11506	12285	12963				12293		33760				
412	13444	11417	13066	12282	12265	33736		33740			13434	12949	11498			11415		

Anexo 3, Tabla 4. Calendario de exámenes según el aula de cada examen para el caso 2 (Fuente: elaboración propia).

Fecha y horario	25/10		26/10		22/10		21/10		28/10		20/10		27/10		02/11		29/10	
Titulación y curso	8h	15h	8h	15h	8h	15h	8h	15h	8h	15h	8h	15h	8h	15h	8h	15h	8h	15h
MUIB																		
1º obligatorio	1445 6		1445 5		1445 9		1445 7				1446 0		1446 1		1445 8			
GITI																		
1º obligatorio	1140 4				1140 2						1140 0		1140 6					
2º obligatorio		1141 5		1141 7		1143 5		1141 1					1143 6					

3º obligatorio	1140 7		1140 8		1142 6		1141 8		1142 3		1141 6						
4º obligatorio		1142 4				1141 9		1142 1			1142 5		1142 8				1142 7
2º optativas					1299 1						1343 6						
4º optativas	1375 5		1388 4				1466 3				1466 1		1466 2		1344 4		
GIOI																	
1º obligatorio	1147 3				1147 0						1147 5						1147 2
2º obligatorio		1148 5		1148 8		1148 1		1147 7		1149 2		1148 6		1148 7			
3º obligatorio	1149 7		1149 9				1149 4		1147 8				1149 0				1149 8
4º optativas											1321 6						
4º organización		1150 8		1148 9		1150 6		1150 7				1150 5					
3º optativas					1307 1						1343 4						
4º tecnologías		1152 5		1148 9	1152 9			1152 4	1152 8			1152 7		1152 6			1153 4
GIE																	
1º obligatorio	1016 9				1292 9						1293 2		1293 4				
2º obligatorio		1293 9		1294 2		1294 8		1294 9				1294 7					
3º obligatorio	1295 6		1295 0		1293 7		1294 6		1295 1		1293 6		1294 1				

4º obligatorio		1296 0		1295 7		1295 9		1296 1				1295 4		1296 3				
2º optativas					1296 5							1343 0						
4º optativas												1424 0						
GIB																		
1º obligatorio	1304 0				1303 4							1304 5		1391 7				1303 6
2º obligatorio		1304 1		1303 1		1303 3		1305 1					1302 9		1303 2			
3º obligatorio	1305 4				1305 0		1305 8					1306 6		1305 3				
4º obligatorio		1306 2				1305 6		1305 9					1306 8					
4º optativas												1342 9						
GIQ																		
1º obligatorio	1226 5				1226 8							1396 3		1226 2				
2º obligatorio		1229 3		1227 6		1226 6		1229 5					1228 2		1229 4			
3º obligatorio	1227 5				1227 4		1228 7		1229 1			1228 5						
4º obligatorio		1227 3				1228 8		1227 2					1228 0					
4º optativas							1229 8					1398 8						
3º optativas													1229 7					

MIUQ																		
2º op.3 bloque 1 y op.3 bloque 2		3349 0		3347 8		3347 6		3348 9		3476 2		3349 1		3347 7				
2º op.1 bloque 1 y op.1 bloque 2				3348 2		3347 6				3348 5		3348 3		3348 1		3476 1		3348 4
2º op.1 bloque 1 y op.2 bloque 2		3349 0		3348 2		3347 6		3348 8		3348 7		3348 6		3348 1				
2º op.1 bloque 1 y op.3 bloque 2				3348 2		3347 6		3348 9		3476 2		3349 1		3348 1				
2º op.2 bloque 1 y op.1 bloque 2				3348 0		3347 6				3348 5		3348 3		3347 9		3476 1		3348 4
2º op.2 bloque 1 y op.2 bloque 2				3348 0		3347 6		3348 8		3348 7		3348 6		3347 9				
2º op.2 bloque 1 y op.3 bloque 2		3349 0		3348 0		3347 6		3348 9		3476 2		3349 1		3347 9				
2º op.3 bloque 1 y op.1 bloque 2				3347 8		3347 6				3348 5		3348 3		3347 7		3476 1		3348 4
2º op.3 bloque 1 y op.2 bloque 2				3347 8		3347 6		3348 8		3348 7		3348 6		3347 7				
MUII																		
2º optativas			3455 5													3512 6		
2º Utilización energía		3376 1		3376 3				3375 9		3376 4		3376 0		3376 2				
2º Electrónica		3372 3		3372 7				3372 4						3372 8				3372 2
2º Medio ambiente				3375 7		3375 6				3375 2				3375 5		3375 3		
2º Generación energía		3370 6		3370 4		3370 3		3370 2		3370 7		3370 5						

2º Construcciones		3368 2		3368 3		3368 4		3368 1				3367 9		3367 8				
2º Producto		3369 4		3369 8				3370 1		3369 7		3370 0				3369 5		
2º Control automática y robótica				3368 8		3368 9		3369 0		3368 6		3368 7		3369 1				
2º Organización		3374 6		3374 9		3374 4		3375 0		3374 8		3374 7						
2º Materiales		3373 6						3373 8		3374 0		3373 7		3373 9		3374 1		
2º Mecánica				3373 3		3373 1		3372 9				3373 0				3373 2		
2º Eléctrica		3371 8		3372 1				3371 4				3371 9		3372 0		3371 7		

Anexo 3, Tabla 5. Calendario de exámenes según titulación y curso para el caso 3 (Fuente: elaboración propia).

Fecha	25/10/2022		26/10/2022		22/10/2022		21/10/2022		28/10/2022		20/10/2022		27/10/2022		02/11/2022		29/10/2022	
Aulas	8h	15h																
032		11424			11426			11524			11400	12947	11490			33717		
110	11497	33746	12950	12942	11529	33744	14457	12272		34762	12285	12280		12963				33722
311			34555	33757		33684		33690			13430	33705						
527	13040	11415		13031	12268	13033		11421			13988	33486	12934	33678		33732		11427
222		13041			11470	11419	12287	13059		33740	11475	12282	14461					
014	11404	33694			11402		11418	11411			11416	11425	11406	33479				
022	11407	33490		11417	11426			33489		33487	13045	33760		11487				
023	11407			12276	11402	12266	11494	11411			11416	33687		12294				
031	11407	11525			11402	13056	11494	11507			13434	11505	12941	12294				11472
041	11404	12293		33480	12937	33703		33714	12291	33752	11400	11425	11406	33739				13036
011	11407	33706		12276	13071	11435	11418	12961			11416	13068	13053	11487				
021	11407	12939	11499	11417	11426	11435	11418	12961	11478	33485	11400	33747	11406					11472

025	11404	11424			11426	11435		11411			11416	12947	13053				
033		12293		11417	11402	11435		11477			11400	11486					
035	11404	11424			11426	12266	11418	11477	11478		11416	11425		33755			
521	10169	11415	11408	13031	12929	13033	13058	11421			12932	11436	12934	11428	35126		11427
522	12275	13062	11408	33683	12929	33689		11421			13436	11436		11428			11427
523	13040	11415	11408	33482		11481		13051			12932	11436	12262	11428			11427
525	10169	11415	11408	11488		33476		11421			13988	11436		11428			
526	12275	11415	11408	11488	12268	11481		11421	12951		13436	11436	12262	11428			11427
013		11424		33480	11426	12959		11411			13045	11425	11406		13444		
024		11424		11417	11402	12959		33702			11400	33730	11406	33728			
312		11508		33698		12948		33729			14460	33705		33477			
524	10169	13062	11408	33763	12268		13058	13051			13216		14662	11428			11427
223	13054	12960		33688		11419	12298	33750	11528	33686		33737					11534
421	12265	11485		33749	13034	12288		12295	11423	11492	14240	12297		11526			
425	13755	12273		33704	14459	11506			11423		12936	12954	13917	33691			
012	11404	11424	11499	11417	11402	11435	11418	11411	12291	33764	11400	11486	11490			34761	
211	12956	33761	13884		11470	11419		33724		33697	13066	12282		13032			
034	11404	33718		33478	11402			11411			11416	11425					13036
214	14456	33761		33721	11470	11419	12287	33738			11475	33700			14458	33753	
323		11508		33727	12965	12948	12946	33488			14661	33483		33762		33741	
112		33736	14455	33733	12991	33756	14663	33681		33707	12285	12280		33481			11498
424	11473	12273		12957	12274	12288		12949	11423		13963	12954	13917				
420	11473	33682			13034	11506		33701	11423	11492	13963	33679					
212	12956	12960		11489	13050	11419		33750		33748	11475	13029	14461	13032			
111	11497	33746		12942	12991	33744		12272			13429	33491		12963			11498 33484
410	12265	33723		33749	12274	33731		12295	11423	11492	13963	12297		33720			
411	11473	11485			13034	11506		12949	11423		12936	33719		33691		33695	
215	13054	13041		11489	13050	11419		13059		33748	11475	13029		13032			

213	13054	33761		11489	13050	11419	12298	33759		33748	13066	13029		13032				
412	11473	11485		12957	12274			12949	11423		13963	11527	13917					

Anexo 3, Tabla 6. Calendario de exámenes según el aula de cada examen para el caso 3 (Fuente: elaboración propia).

Fecha y horario	25/10		26/10		22/10		21/10		28/10		20/10		27/10		02/11		29/10	
Titulación y curso	8h	15h																
MUIB																		
1º obligatorio	1446 1		1445 5						1446 0		1445 6		1445 7		1445 8		1445 9	
GITI																		
1º obligatorio	1140 0										1140 4		1140 2		1140 6			
2º obligatorio		1141 1		1141 7		1143 5						1143 6						1141 5
3º obligatorio	1141 8		1140 7		1140 8		1142 6								1141 6		1142 3	
4º obligatorio		1142 8		1142 4		1142 1				1142 5		1142 7		1141 9				
2º optativas			1299 1							1343 6								
4º optativas			1466 1				1388 4			1375 5		1466 2		1466 3			1344 4	
GIOI																		
1º obligatorio			1147 3		1147 5							1147 2			1147 0			
2º obligatorio		1148 6		1147 7				1148 1		1148 8		1149 2				1148 5		1148 7
3º obligatorio	1149 9				1147 8		1149 0					1149 7		1149 8			1149 4	

4º optativas								1321 6									
4º organización			1150 7				1150 5			1150 6		1148 9					1150 8
3º optativas			1307 1					1343 4									
4º tecnologías		1152 6	1152 5		1152 4	1152 9		1152 7		1153 4		1148 9				1152 8	
GIE																	
1º obligatorio			1293 2							1292 9			1293 4				1016 9
2º obligatorio				1294 2	1294 8		1293 9	1294 7		1294 9							
3º obligatorio	1293 6		1295 1		1294 1	1294 6		1295 6					1295 0				1293 7
4º obligatorio		1295 7			1295 4		1296 3			1295 9		1296 0		1296 1			
2º optativas			1296 5					1343 0									
4º optativas													1424 0				
GIB																	
1º obligatorio	1391 7				1304 0			1303 6		1303 4				1304 5			
2º obligatorio				1303 2	1304 1		1303 1	1303 3				1305 1					1302 9
3º obligatorio	1305 4		1305 8		1305 3			1306 6		1305 0							
4º obligatorio		1306 2			1305 6		1305 9			1306 8							

4º optativas								1342 9									
GIQ																	
1º obligatorio	1396 3			1226 8							1226 2					1226 5	
2º obligatorio		1229 3		1228 2		1229 4		1227 6			1226 6		1229 5				
3º obligatorio				1228 5		1227 5				1227 4		1228 7				1229 1	
4º obligatorio		1227 2				1228 0		1227 3			1228 8						
4º optativas									1398 8				1229 8				
3º optativas			1229 7														
MUIQ																	
2º op.3 bloque 1 y op.3 bloque 2				3347 6		3347 7			3347 8		3349 1		3476 2		3349 0		3348 9
2º op.1 bloque 1 y op.1 bloque 2		3348 3		3347 6		3348 2		3348 1			3348 5		3476 1				3348 4
2º op.1 bloque 1 y op.2 bloque 2				3347 6		3348 2		3348 1			3348 8		3348 7		3349 0		3348 6
2º op.1 bloque 1 y op.3 bloque 2				3347 6		3348 2		3348 1			3349 1		3476 2				3348 9
2º op.2 bloque 1 y op.1 bloque 2		3348 3		3347 6		3347 9		3348 0			3348 5		3476 1				3348 4
2º op.2 bloque 1 y op.2 bloque 2				3347 6		3347 9		3348 0			3348 8		3348 7				3348 6
2º op.2 bloque 1 y op.3 bloque 2				3347 6		3347 9		3348 0			3349 1		3476 2		3349 0		3348 9

2º op.3 bloque 1 y op.1 bloque 2	3348 3	3347 6	3347 7	3347 8	3348 5	3476 1	3348 4
2º op.3 bloque 1 y op.2 bloque 2		3347 6	3347 7	3347 8	3348 8	3348 7	3348 6
MUII							
2º optativas			3455 5	3512 6			
2º Utilización energía	3376 1	3376 3	3376 2	3375 9		3376 4	3376 0
2º Electrónica			3372 8	3372 2		3372 7	3372 4
2º Medio ambiente		3375 2	3375 3	3375 7		3375 5	3375 6
2º Generación energía	3370 6		3370 3	3370 7	3370 4	3370 5	3370 2
2º Construcciones	3367 9		3368 1	3368 2	3368 3		3368 4
2º Producto		3369 4		3369 7	3370 0	3369 5	3370 1
2º Control automática y robótica	3369 1	3368 6	3368 8	3369 0	3368 7	3368 9	
2º Organización			3375 0	3374 4	3374 8	3374 6	3374 7
2º Materiales	3374 1	3373 7	3373 8	3374 0		3373 6	3373 9
2º Mecánica	3373 2	3373 3	3372 9	3373 0		3373 1	
2º Eléctrica	3371 7	3371 8		3372 0	3371 9	3371 4	3372 1

Anexo 3, Tabla 7. Calendario de exámenes según titulación y curso para el caso 4 (Fuente: elaboración propia).

Fecha	25/10/2022		26/10/2022		22/10/2022		21/10/2022		28/10/2022		20/10/2022		27/10/2022		02/11/2022		29/10/2022	
Aulas	8h	15h																
032	11418	11428	11407	11417	11475	11421			13430			11534	11498		11406			
110		13062		11525		33703	11529			33687	14662	33689	14457	33756	12934	33684	11528	33678
311				33718	13040	33738					11497	12959						33486
527	13917	33483	12965			33479		12273			13034	13068		12960			12265	11487
222	13963			12942	11478	12954		33720				12288						11415
014	11400	33741		11417	11408	11421	11426			11425	11404	11506	11402		11406		11423	
022	11418	11411	12991	11424	11408	11421				11425	14456	11436	11402		11416			
023	11400	11428	12932	11424		13041	11490			33748	11404	11436	11402	13051	11406	11485		
031		11428	11407	11424		11421		33744		13988		11436		11419	11416			11508
041	11400	11411	12932	11477	11408	11435	11426	33707	12956	33748	13050	33746	11402	12295	11416		11494	33749
011		11411	11407	11477	11408	11435	11490	12276		11425	11404	11427	12262	12295	11416	12961	11494	33749
021		12957	11407	11424	11475	11435		33697	13066	13988		11427	11498	13051	11416	12961		
025	11400	11411	13058	11417		13056		33759		12947	13050	11427		11419			11423	
033	11418	11411		11417	34555	33729	11426		13430		12274	11427		11419	11406		11423	
035	11418	11411			11408	13041	11426	12276			11404	11427	11402			13444	11423	
521	11499	12293	12297	33752	13053	12294		12273			11472	33731	12287	12960			12265	11487
522	11499		11473	13032	13053	33479	35126	33690		33704		33695			14458			33760
523		12293	12297	13032		33479	12946	12963			11472	13068		34762	12298			11487
525	13917	33691	11473	33476		12294		11505			13034	11492		11489			12265	
526	12936		12951		12941	33479		12963			13034	11492	12287	11489				33739
013	11400	11428	11407			13056			13036	11425		11436		11419	11406			
024	11418	33679	13058	11424	11475	11421			13434	12947	11404	11436	11402		12950	11485		
312		33706	14661			12948	12275	33722			11497	33736		33487			12291	13029
524	12936				12941		12946	11505				33485			12298			33484
223	13054			12282		12954								33747				11415
421		11486			12268	33750		13031	13436		12929	12949			11470		12937	

425		12272		33737		12280		11481		11488		12266			13045		10169	
012	11400	11428	11407		12285	11435	11426	13059	13036	11425	12274	33746	12262	33764	11406	11485		
211	13963	33717		12942		33688						33488						11415
034	11418	11428		11417	12285	11435	11426	13059		11527	11404	11506	11402	11419			11423	
214	13963			33686	11478	33728		33480		13033		12288		33702				11415
323		33706		11507	13040	12948	12275	12939	14460		11497	12959		33724			12291	13029
112	14461	33761	14455	33694		33482	13884	33757	13216	33719	14662	33727		33701	12934	33698		33489
424		12272			12268	33762		11481		33683	12929	12266			11470		14459	
420		11526			12268	12280		33730	13436	33700		33714			13045		10169	
212	13963			12282		11524		33481		33478		33705		33747				11415
111		13062	13071	33733		33753		33740	13429	33687	14662	33491		33721	14240	33490		
410		11486		33763	12268	33750		13031	13436	11488		12949	14663		13045		10169	33723
411						33681		33682	13755	33683		33755			11470			
215	13963			33686		33477				13033								11415
213	13054	33732		12282		33477				13033		33705		33702				11415
412						12280						12266		34761	11470		12937	

Anexo 3, Tabla 8. Calendario de exámenes según el aula de cada examen para el caso 4 (Fuente: elaboración propia).