



Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales
(ICADE), Universidad Pontificia de Comillas

Modelos de Optimización para la planificación de horarios en la Universidad Pontificia Comillas. Una mirada hacia la automatización.

Clave: 201911115

RESUMEN:

El estudio analiza la optimización de la planificación de los horarios de la Universidad Pontificia de Comillas, mediante la implementación de modelos matemáticos avanzados. Gracias a los datos recopilados, tres modelos fueron diseñados y desarrollados para, combinados, asignar aulas a grupos de alumnos (1), a subgrupos (2), y asignar profesores y asignaturas en horarios específicos (3). Los resultados del modelaje implementados con la herramienta GAMS, muestran una mejora significativa con respecto a la planificación manual, donde se ha minimizado el desperdicio de recursos físicos y maximizado las preferencias de los profesores. Es así como se ha logrado optimizar la gestión educativa de manera eficiente con el fin de mejorar la calidad educativa y reducir el estrés estudiantil.

ABSTRACT:

Study focuses on optimizing the scheduling of the Universidad Pontificia de Comillas through the implementation of advanced mathematical models. Using the collected data, three models were designed and developed to combinedly assign classrooms to student groups (1), subgroups (2), and schedule teachers and subjects at specific times (3). The results of the modeling, implemented using the GAMS tool, show significant improvements compared to the manual scheduling, minimizing the waste of physical resources and maximizing teachers' preferences. This has efficiently optimized educational management to improve educational quality and reduce student stress.

PALABRAS CLAVE:

Horarios, planificación de horarios, optimización de horarios, modelos matemáticos, asignación de aulas, modelos de optimización, reducción de estrés, GAMS Studio, gestión educativa, Universidad Pontificia de Comillas.

KEYWORDS:

Scheduling, timetable optimization, mathematical models, classroom allocation, educational management, stress reduction, GAMS Studio, schedule programming, Universidad Pontificia de Comillas.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	4
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	7
1.1. Los Horarios y sus orígenes	7
1.2. La Planificación de Horarios Universitarios y Reducción del Estrés	8
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA PARA LA PLANIFICACIÓN DE HORARIOS	12
2.1. Gestión de horarios en entorno educativo.....	12
2.2. Segmentación del Modelaje Matemático	12
2.3. GAMS: Herramienta empleada	15
CAPÍTULO III: FORMULACIÓN Y APLICACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS	16
3.1. Modelo de Asignación de Aulas a Grupos de alumnos	16
3.2. Modelo de Asignación de Aulas a Subgrupos de alumnos.....	19
3.3. Modelo de Asignación de Asignaturas, Profesores, Franjas horarias y Días	22
CAPÍTULO IV: ANALISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS	28
4.1. Resultados Modelo de Asignación de Aulas a Grupos	28
4.2. Resultados Modelo de Asignación de Aulas a Subgrupos	31
4.3. Resultados Modelo de Asignación de Asignaturas, Profesores, Horas y Días	32
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	34
CAPÍTULO VI: FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	36
CAPÍTULO VII: ANEXOS	38
7.1. Tablas de Datos empleadas para el Estudio	38
7.2. Declaración de Uso de Herramientas de Inteligencia Artificial en el TFG	42
7.3. BIBLIOGRAFÍA.....	44

INTRODUCCIÓN

La planificación de horarios académicos es una labor de elevada complejidad, a la vez que fundamental para la actividad principal de los centros educativos. Donde, junto al contenido de las asignaturas y la flota de profesores, la organización de los horarios es uno de los indicadores principales de calidad de la educación.

Revisión de la literatura

En el contexto teórico, el ser humano siempre ha tratado de buscar la manera de medir sobre todo organizar su tiempo para cumplir con sus obligaciones y disfrutar de los momentos de ocio. Zerubavel (2020) y Aubanell (2009) recalcan la importancia que tiene la cuantificación del tiempo en las primeras mediciones basadas en ciclos astronómicos naturales hasta las modernas herramientas de gestión del tiempo que se emplean en la actualidad. En el ámbito académico, (Yusop, 2022) resalta que la planificación efectiva de los horarios evita redundancias y conflictos además de ayudar a un estilo de vida saludable que reduce el estrés. Donde según (Acuña et al., 2024), una buena gestión del tiempo personal favorece a la salud mental y al rendimiento académico de los estudiantes. Mientras que (Fernández-Montalvo & Piñol, 2000) señala como un horario de trabajo irregular puede provocar trastornos en el sueño y estrés laboral. Por lo tanto, la gestión del tiempo y planificación de éste mediante horarios ayuda a reducir significativamente el estrés mientras que aumenta las posibilidades de una mejora del rendimiento académico.

Objetivos

Objetivo general

El objetivo general de este Trabajo de Fin de Grado es realizar de un análisis y posteriormente, una propuesta de planificación de horarios para la Universidad Pontificia de Comillas. Esto no solo implica la asignación óptima de aulas, días y horas a las clases de alumnos, sino el diseño y creación de un sistema integral que tome en cuenta las necesidades y disponibilidad de los profesores para proporcionar un horario que satisfaga a tanto alumnos como docentes. Y además de un manejo de los recursos del centro, con el motivo de mejorar la calidad educativa para que el alumnado pueda tener una mejor experiencia, pero con una gestión institucional óptima. Esta asignación debe optimizar tanto el uso de los recursos materiales como humanos de la universidad.

Objetivos específicos

Para lograr el objetivo general se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Analizar en profundidad el proceso actual de planificación de horarios de la Universidad Pontificia de Comillas, y recabar la información necesaria y disponible para el desarrollo del modelo matemático. Destaca entre otros datos, el número de aulas disponibles y su capacidad, cuántos grupos de alumnos hay y el número de sus integrantes, la plantilla de profesores y su disponibilidad, y muchos otros parámetros más.
- Realización de un modelo matemático de planificación de horarios que disponga de soluciones para la asignación de aulas, profesores y tiempos a cada grupo de alumnos.
- Desarrollar el código de un modelo de asignación de recursos y horarios mediante la herramienta GAMS Studio y el servidor NEOS Server, por el cual se ejecutará el código que proporcione como resultado una planificación de los horarios óptima. Donde minimice el desperdicio de asientos y maximice la disponibilidad de los profesores.
- Evaluar la viabilidad de la implementación del modelo propuesto para un horario en base a los resultados obtenidos. Se compara con los horarios utilizados por la universidad, que han sido desarrollados mediante una asignación manual de las aulas y profesores, y se realiza una prueba de hipótesis de diferencia de media entre dos poblaciones.
- Y, por último, realizar recomendaciones teóricas basadas en los análisis de los resultados y en el diseño del horario propuesto a la universidad. Además, proponer diferentes líneas de investigación donde partir en base al trabajo realizado en este estudio.

Estructura

Este Trabajo de Fin de Grado se estructura en seis partes o componentes principales. La primera parte proporciona una introducción al problema de planificación de los horarios basado en un contexto teórico donde analiza la historia de la medición y gestión del tiempo, para tener una visión más profunda del tema a tratar. En la segunda fase, se

describe la metodología empleada, enfocándose en la gestión de horarios en los entornos educativos, además del razonamiento de la segmentación del modelaje matemático para la planificación. En el capítulo IV se emplea una formulación y aplicación de los tres modelos matemáticos, los cuales tratan de asignar aulas a los grupos de alumnos, asignar aulas a algunos subgrupos de alumnos, y el último modelo asigna asignaturas y profesores a los grupos y subgrupos en determinadas franjas horarias y días. En el siguiente capítulo, se analizan los resultados obtenidos de cada uno de los diferentes modelos implementados anteriormente. Mientras que en el capítulo VI se discuten algunas de las posibles futuras líneas de investigación y puntos de mejora de los que partir desde este estudio. Y, por último, el capítulo VII incluye diversos anexos como son las tablas de los datos empleados en el estudio y los resultados también en tablas, también contiene la declaración de uso de inteligencia artificial en el presente estudio, y la bibliografía con las fuentes utilizadas en este Trabajo de Fin de Grado.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Los Horarios y sus orígenes

Desde tiempo inmemoriales, el ser humano ha buscado, mediante diferentes técnicas, la forma de **medir y organizar su tiempo** de manera que le permita cumplir con sus múltiples obligaciones y, al mismo tiempo, disfrutar de momentos de ocio y descanso. Como bien apunta Zerubavel (2020), la temporalidad y su medición han sido fundamentales en la configuración de las actividades sociales y personales a lo largo de la historia. Esta constante e incesante búsqueda ha provocado el desarrollo de diversas herramientas y metodologías diseñadas con el fin de optimizar la gestión del tiempo. Desde simples calendarios hasta aplicaciones digitales de gestión de tareas y proyectos, así como horarios personalizados a las necesidades personales de cada individuo.

En esta búsqueda por interpretar y dominar el manejo de nuestro tiempo, la cuantificación de este puede resultar una de las claves que revela un faro de luz. Aubanell (Aubanell, 2009) en su obra “Un paseo por el origen del calendario y del Sistema Métrico” nos invita a reflexionar con la frase “Conocer es cuantificar, cuantificar es comparar con una unidad, es decir medir. Y medir es saber”. El autor refleja la importancia de la **cuantificación en la gestión** eficiente del tiempo, ya que, en el contexto de la planificación de horarios, cuantificar el tiempo académico y las actividades de manera precisa es imprescindible para lograr una gestión eficiente. La posibilidad de poder asignar, con justicia y realismo, a cada tarea el tiempo necesario puede llegar a transformar la gestión del tiempo de una obligación a una oportunidad de mejora constante. Por ello, abogar por el desarrollo de herramientas y métodos que apliquen la cuantificación del transcurso del tiempo es un paso más hacia una mejor organización de las tareas a realizar.

Curiosamente, si echamos vista atrás en la historia, podemos encontrar que las primeras mediciones del tiempo estaban basadas en **ciclos astronómicos regulares** y naturales, como, por instancia, el día, el mes y el año, ya que son consideradas las unidades naturales de tiempo (Morones Ibarra, 2008). Esta perspectiva histórica en fenómenos regulares y predecibles ofrece un punto de vista muy valioso que brinda la oportunidad de inspirar métodos modernos de planificación horaria en el ámbito educativo. Donde aprovechando los patrones de dichos fenómenos naturales y consistentes, las instituciones educativas, y en este caso, la universidad Pontificia de Comillas, podría

desarrollar sistemas de planificación horaria que imiten esta regularidad y exactitud de los ciclos astronómicos, lo cual le permitirá a la universidad una distribución de las actividades educativas más eficiente y armoniosa.

A través de la conexión entre las antiguas prácticas de medición del tiempo y las estrategias que se emplean en la actualidad sobre la planificación, cabe la posibilidad de **redescubrir y reinventar maneras más innovadoras** para superar los desafíos actuales de gestión de tiempo en las nuevas generaciones que se encuentran en los ambientes estudiantiles. Además, como bien apunta Rubén en su artículo llamado “La medición del tiempo” (J. Rubén, 2008), la historia nos ilustra que la adaptación de los ciclos naturales y regulares para la planificación del tiempo, no es solo una aplicación ancestral, sino también un recurso con mucho valor para brindar soluciones adaptativas a las adversidades contemporáneas de la gestión del tiempo.

1.2. La Planificación de Horarios Universitarios y Reducción del Estrés

En la era de la información, donde las nuevas tecnologías y plataformas tratan de captar el máximo número de personas, además de mantener cautivos a sus usuarios la mayor cantidad de tiempo posible, el tiempo se convierte en un recurso cada vez más escaso y valioso. Por lo tanto, la gestión eficiente del mismo se convierte en una destreza esencial y necesaria en todos los ámbitos de la vida. Yusop (2022) resalta en su artículo de investigación llamado “Optimization Timetable in Education to Support Work-Life Balance (WLB)” que una **planificación efectiva** del horario académico no solo evita redundancias y conflictos entre horarios de docentes y estudiantes, sino que también apoya un estilo de vida saludable y equilibrado. Este argumento obtiene una mayor relevancia en el entorno universitario, donde una planificación de horarios apropiada y eficiente se cimienta como un pilar fundamental no solo para la organización académica, sino también para la **salud y bienestar** de la comunidad de estudiantes y docentes universitarios. En este entorno, el presente trabajo se enfoca en una examinación sobre cómo una planificación de horarios precisa y adecuada puede provocar consecuencias positivas significativas, tales como la reducción del estrés, el fomento de la inclusión laboral y una mejora considerativa de los resultados académicos mediante el aumento del rendimiento de tanto alumnos como docentes.

Sin embargo, a pesar de estos avances tecnológicos, el desafío de planificar de manera eficaz el tiempo continúa persistiendo, especialmente en entornos dinámicos de cambios constantes como los que se encuentran en las instituciones educativas.

A pesar de la existencia de numerosas investigaciones centradas en la optimización de una tarea mediante el uso de algoritmos o sistemas de automatización, este desafío continúa siendo una fuente de preocupación, alcanzando incluso el estrés, para muchos miembros de la comunidad educativa. Empiezan a aparecer iniciativas para una **reducción del estrés** provocado por las responsabilidades académicas, donde por ejemplo se ha desarrollado este año 2024 una app para el móvil donde según dice: “ayudar a mejorar el rendimiento académico, reducir el estrés y promover la equidad” (Acuña et al., 2024). Donde con la app se puede ayudar a los estudiantes con su tiempo, y a mejorar el rendimiento académico y reducir el estrés.

Dicho estrés no solo provoca un deterioro de la salud física y mental de los componentes del colectivo estudiantil, sino que también puede conllevar a un impacto rotundamente negativo en el **desempeño y resultados**, primero en el ámbito académico y posteriormente en el laboral. Investigaciones enfocadas en la conciliación entre los horarios laborales y la salud, como la de Fernández-Montalvo & Piñol (2000), señalan que horarios de trabajo irregulares, especialmente los nocturnos o rotativos, pueden llegar a provocar trastornos del sueño, estrés laboral, e incluso síntomas depresivos, afectando significativamente la salud mental de los trabajadores. Este **estrés laboral** puede ser una de las consecuencias de horarios de trabajo mal gestionados, por lo que, en la universidad, un horario bien estructurado, favorece a minimizar el estrés académico de los docentes y alumnos, promoviendo una mejor salud mental y, por consiguiente, un mejor rendimiento.

El rendimiento académico en el ámbito universitario es un asunto de elevado interés para los alumnos, educadores e incluso administrativos puesto que no solo refleja la adquisición de conocimientos, sino que también muestra la capacidad de aplicarlos en contextos más prácticos. Este rendimiento puede ser repercutido por diversos factores, desde el entorno más privado del propio estudiante, como la familia, los amigos o la ambición personal, hasta las metodologías de enseñanza empleadas por la institución educativa.

Entre los motivos destaca la **motivación intrínseca del estudiante**, la cual representa un papel fundamental. Los universitarios que encuentran un propósito personal y

profesional en sus estudios tienden a esforzarse más y a organizarse adecuadamente sus horarios. El estudio de Razali et al., 2018 destaca la planificación del tiempo de los alumnos como el predictor más significativamente correlacionado con el **éxito académico**. El cual argumenta que los estudiantes que planifican su tiempo de manera eficiente, estableciendo objetivos claros y priorizando tareas, tienden a lograr mejores resultados académicos. La investigación también muestra la otra cara de la moneda, donde los comportamientos relacionados con la pérdida de tiempo están negativamente correlacionados con sus calificaciones académicas, lo que indica que los **estudiantes que procrastinan** y no llevan una buena organización, tienden a no aprovechar su potencial para lograr el éxito en el ámbito educativo.

Otra estrategia con el objetivo de la mejora el rendimiento del alumnado, y que, además ha cobrado relevancia en el contexto actual marcado por los desafíos y cambios causados por la pandemia del COVID-19, es la combinación de **modalidades presenciales y telemáticas**. Esta posibilidad de enfoque híbrido no solo responde a la necesidad de adaptarse a las nuevas realidades laborales y educativas, sino que también introduce una complejidad adicional en la gestión del tiempo y su impacto en el rendimiento académico. Según Santillán-Marroquín (2020), el teletrabajo, el cual define como ‘un nuevo esquema de trabajo utilizando internet y otras plataformas de comunicación’, brinda la posibilidad de ser paralelamente aplicado en la educación. Donde la **flexibilidad de horarios** y la adaptación entre modalidades online y presenciales facilita la oportunidad de potenciar la autonomía del estudiante y mejorar su capacidad de gestión de tiempo, lo que potencialmente podría verse reflejado en las calificaciones.

Por otro lado, la obtención de flexibilidad en el horario es un beneficio fundamental del teletrabajo que ayuda a alcanzar una **mejor conciliación entre la vida laboral** o estudiantil y la personal. Aplicando horarios mixtos, los estudiantes tienen en sus manos balancear de manera más eficaz sus estudios con otras actividades de ocio y salud, mejorando así tanto su bienestar como sus resultados académicos. No obstante, como indica Baker et al., (2019) en su estudio realizado sobre la mejora del rendimiento académico con clases online, aunque las propuestas que promueven la planificación del estudio muestran en el inicio mejoras considerable en el rendimiento, mediante un aumento significativo en las calificaciones de los primeros test, el efecto tiende a disminuir con el paso del tiempo. Por consiguiente, es necesario que este tipo de

estrategias de combinación entre lo presencial y online no solo se implementen de manera aislada, sino que formen parte de un conjunto de métodos constantes y diversificados para mantener estos beneficios en el largo plazo hasta la conclusión del curso académico.

En conclusión, la planificación de horarios en las universidades representa un desafío complejo debido a la diversidad de factores a considerar. Por esta razón, el presente trabajo tiene como objetivo aportar nuevas perspectivas y métodos para abordar un problema antiguo como es la **planificación del tiempo**, pero con implicaciones modernas. Donde se destaca la importancia del bienestar estudiantil y docente como un elemento fundamental en la planificación de horarios académicos. Para así, tratar de crear un entorno educativo más armonioso, en el cual la gestión del tiempo se pueda convertir en un aliado en vez de un obstáculo que impedita el desarrollo personal como académico.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA PARA LA PLANIFICACIÓN DE HORARIOS

2.1. Gestión de horarios en entorno educativo.

Una gestión eficiente de los horarios académicos es uno de los desafíos más cruciales que las instituciones educativas tienen que afrontar cada año escolar. En el caso de la Universidad Pontificia de Comillas, tampoco es ajena esta problemática. Esta planificación de los horarios universitarios afecta de manera directa a la calidad de la educación que experimentan los alumnos. Por lo que para mantener la excelencia educacional es necesario abordar este proceso de planificación con rigurosidad y efectividad.

La justificación para dar comienzo a este proyecto de estudio en profundidad sobre la planificación de horarios de una universidad cumple varias facetas. En primer lugar, un diseño correcto es prioritario y esencial para que los estudiantes puedan acceder a las aulas asignadas sin tener ningún conflicto de horario. Ya sea por solapamiento de clases en un mismo tiempo o por dificultad para la asistencia puntual debido a el traslado entre clases. Dicha planificación también influye en la gestión de la universidad mediante la **asignación sus recursos**, tanto docentes como aulas, los cuales se busca maximizar su utilización y reducir costes innecesarios para llevar una gestión óptima.

Asimismo, una **programación inadecuada** puede implicar que los estudiantes experimenten dificultades para la organización de sus actividades académicas y extracurriculares, lo que puede afectar de manera negativa en sus resultados académicos. Además, un horario no optimizado para los profesores puede ocasionar una sobrecarga de trabajo, la cual puede desembocar en una bajada de la calidad de la docencia y la investigación. Y en el peor de los escenarios, si el horario del profesorado no es adecuado, algunos de estos se pueden.

2.2. Segmentación del Modelaje Matemático

Para una implementación totalmente realista y óptima del modelo donde asignamos toda la flota de profesores a impartir clase de las asignaturas que enseñan a sus grupos correspondientes en las aulas con el mínimo espacio desperdiciado posible deberíamos crear varios millones de variables binarias, donde un aula a es asignada a un grupo g o subgrupo s para que se imparta la asignatura c por el profesor p en el horario h del día d .

Es así como se ha optado por realizar el modelaje de la asignación de aulas en un horario determinado para cada asignatura de tan **solo dos grupos de alumnos**. Por lo que para encontrar una solución más óptima se ha decidido realizar una partición del modelaje la cual consta de tres fases o modelos y son las siguientes:

1. Primer Modelo (Aulas-Grupos).

Durante la primera fase del modelaje se realizará una **asignación de aulas a cada uno de los grupos de alumnos**. La cual se hará basándose en minimizar el número de asientos libres que quedan al asignar un aula a un grupo de estudiantes. Además, la utilización de esta división es muy conveniente y lógica para facilitar el modelo debido a que, una vez asignadas las clases con menos desperdicio de asientos, los alumnos siempre acudirán al mismo aula. Por lo tanto, los estudiantes no necesitarán moverse de aula en aula, mejorando así la experiencia educativa.

A la hora de realizar el desarrollo de este primer modelo se necesita tener en consideración diferentes factores. Algunos de estos factores son los siguientes.

Diferentes tipos de grupos **según el año** en que se está realizando la planificación de horarios debido a que se están lanzando nuevas carreras y deprecando otras más antiguas. Y, en consecuencia, en un año determinado puede haber tan solo primer y segundo curso de un grado nuevo, y apenas cuarto curso de otro grado diferente el cual no se ha continuado ofertando.

También es importante tener en cuenta la **disponibilidad de las aulas** para la educación universitaria a los estudiantes. Esto se debe a que no todas las aulas van a estar disponibles para la impartición de clases, algunas de ellas están reservadas para eventos u otros grados que no se estudiarán para esta asignación de aulas.

El último aspecto a considerar es el estado de las aulas y su aforo en cuanto a **máximo número de alumnos** que alberga cada aula para la asistencia y participación en clases magistrales.

2. Segundo Modelo (Aulas-Subgrupos)

Para el segundo modelo se llevará a cabo una **asignación de aulas a cada subgrupo**, este modelo se utiliza debido a que existen asignaturas que requieren una docencia más personalizada y con un menor número de alumnos. Por lo que se

realizan particiones de los grupos de estudiantes y se imparte la misma asignatura para todos los subgrupos en diferentes aulas. Es por eso que para este modelo se asignará un aula diferente para cada subgrupo independientemente del día y la franja horaria.

Existen asignaturas que se han de impartir en grupos más reducidos, o **desdoblamientos**, para asegurar la calidad educativa del grado estudiado. En consecuencia, para estos caso se imparte la misma asignatura a un grupo en la misma hora y día, solo que se realiza una partición del grupo de alumnos en subgrupos donde cada subgrupo recibe la misma asignatura en diferentes aulas y mediante diferentes profesores. Además, en los últimos años de los grados se imparten diferentes optativas a elegir por el alumno, las cuales también se dan en el mismo momento a pesar de ser asignaturas y profesores distintos.

No obstante, para este modelo de asignación de aulas a subgrupos también se necesita optimizar el desperdicio de asientos libres. Por lo tanto, la aplicación del segundo modelo tiene muchos ápices de semejanza con respecto al primer modelo.

3. Tercer modelo (Profesores-Asignaturas-Horas-Días)

Finalmente, en el tercer modelo se determinará a cada grupo la **asignación de profesores y asignaturas** que imparten cada profesor para los grupos seleccionados **en las franjas horarias y días** que encajen con la disponibilidad de los docentes. A la hora de desarrollar esta última parte del modelaje de planificación de horarios, debemos tener en consideración diferentes factores o variables para tener una visión más clara y detallada de las necesidades de este problema.

Para una correcta ejecución de este tercer modelo se necesita recopilar información de primera manos sobre la **disponibilidad de los profesores**, estos datos son de extrema importancia puesto que ningún profesor tiene disponibilidad absoluta para impartir clase cualquier día y hora. Por lo tanto, se ha de recabar las prioridades y disponibilidades de toda la flota de profesores, tanto los que trabajan a tiempo parcial como los que trabajan única y exclusivamente para la Universidad.

Asimismo, también se debe tener en cuenta el hecho que no todas las asignaturas son iguales, es decir, algunas asignaturas solo se imparten 2 horas a la semana mientras que otras se pueden impartir 4 horas semanales. El **número de horas** o de

franjas horarias que se debe impartir para cada asignatura está directamente correlacionado con el número de créditos que observa cada asignatura. Del mismo modo, cada crédito representa un total de 10 horas de clase a ser impartidas, por consiguiente, se calcula el número de franjas horarias que se debe impartir cada asignatura. Por instancia, si una asignatura en un semestre consta de 6 créditos, eso significa que se deben impartir una media de 60 horas para esta clase. Donde, si cada semestre se compone de 15 semanas, podemos calcular que esta asignatura debe enseñarse alrededor de unas 4 horas por semana, y, en consecuencia, se deben asignar dos franjas horarias de 2 horas cada una en días diferentes en el horario de un grupo de alumnos determinado. Es por eso que, el número de veces que se ha de impartir una asignatura a la semana se puede determinar de manera más directa y generalizando, si se divide el total de créditos entre 3, donde si una asignatura consta de 3 créditos, se deberá impartir una vez a la semana.

2.3. GAMS: Herramienta empleada

Para el presente estudio, además de un planteamiento y **modelaje matemático** donde se crean conjuntos y variables, se definen funciones objetivo y se acotan mediante restricciones, las soluciones de estos tres modelos. Para que todo lo anterior se materialice en una solución proporcionada, se ha de implementar estos conocimientos y diseños teóricos en una herramienta que modele de manera práctica los objetivos del estudio y donde realice una **iteración con todos los posibles resultados** para proporcionar la solución óptima de esta planificación de horarios.

Dicha herramienta ha sido GAMS, que significa **General Algebraic Modeling System**. Este programa es capaz de resolver diferentes tipos problemas de programación matemática para obtener resultados de problemas de optimización tanto lineales como no lineales. GAMS al final es un compilador de lenguaje con una variedad de solucionadores asociados.

CAPÍTULO III: FORMULACIÓN Y APLICACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS

3.1. Modelo de Asignación de Aulas a Grupos de alumnos

Esta primera parte del modelaje tiene como objetivo asignar un aula fija a cada grupo de alumnos de manera que se minimice el número de asientos libres, o, en otras palabras, para tratar de desperdiciar el mínimo número de asientos posibles para que el número de alumnos sea prácticamente el número de asientos disponibles. En este modelo se busca asegurar que los estudiantes no tengan que moverse entre distintas aulas para cada una de sus diferentes asignaturas, mejorando así la calidad educativa y su experiencia universitaria.

Además, este enfoque permite una investigación y modelaje mucho más eficiente donde al fijar la asignación de aulas a grupos de alumnos, se reduce de manera significativa el número de variables de estudio. Así evitando también la necesidad de utilizar un super ordenador para poder iterar un solo modelo sin fragmentar.

Índices y Conjuntos:

- **G:** Conjunto de grupos de alumnos a los que se le debe asignar un aula, con su asignatura y profesor en una hora determinada. Cada grupo se representa con la letra g . Estos grupos se identifican de manera única y pueden estar asociados a un año académico particular, un curso específico dentro del grado de estudios y una posible división adicional si es necesario. Por ejemplo, el grupo g_1 podría corresponder al año académico 2023-2024, primer curso del grado en Administración y Dirección de Empresas (ADE), con una posible subdivisión en grupos A y B.
- **A:** Este conjunto comprende las aulas disponibles para la impartición de clases. Cada aula se identifica con la letra a , y puede variar en capacidad de asientos. Por ejemplo, a_1 podría ser un aula con capacidad para 30 alumnos, mientras que a_2 podría tener capacidad para 50 alumnos.

Definición de Subconjuntos:

- *Año*: Subconjunto que representa los años académicos. Por ejemplo, podríamos tener los años académicos 2023 – 2024, 2024 – 2025, etc.
- *Curso*: Subconjunto que indica los diferentes cursos dentro del grado de estudios. Por ejemplo, podríamos tener los cursos primero, segundo, tercero, etc.
- *Grado*: Subconjunto que representa los distintos grados de estudios. Por ejemplo, podríamos tener los grados en Administración y Dirección de Empresas (ADE), ADE + Relaciones Internacionales, y muchos otros grados más.
- *División adicional*: Subconjunto que indica posibles particiones añadidas dentro de un grupo, como grupos A, B, etc. Esto permite una mayor especificidad en la asignación de aulas.
- *Semestre*: Subconjunto que indica los dos diferentes semestres en los que se imparten las asignaturas.

Definición de Parámetros:

- N_g : Este parámetro indica el número de alumnos en cada grupo g cuando no se divide en subgrupos. Es esencial para determinar la capacidad requerida de las aulas y para calcular el número de asientos ocupados en cada asignación.
- C_a : Muestra la capacidad máxima de cada aula a en términos de asientos disponibles, donde a pertenece al conjunto de aulas disponibles. Este parámetro es crucial para garantizar que cada aula asignada tenga suficiente capacidad para todos los estudiantes del grupo.

Definición de Variables de Decisión:

$x_{g,a}$: Esta variable binaria determina si el grupo g está asignado al aula a independientemente del horario o la asignatura. Toma el valor 1 si el grupo está asignado al aula en ese horario y día, y 0 en caso contrario.

Función Objetivo:

Una función objetivo en un modelo de optimización es decisiva debido a que define y acota el criterio que se busca optimizar. Desde una perspectiva enfocada en el cálculo geométrico, la función objetivo busca el punto extremo óptimo del conjunto convexo o cóncavo acotado por las restricciones. En el contexto del modelo que estamos diseñando para la asignación de aulas a grupos y subgrupos de alumnos la función objetivo es la siguiente:

$$\mathbf{Min} z = \sum_{g=1}^N \left(\sum_{a=1}^M (C_a - N_g) * X_{g,a} \right)$$

La función objetivo tiene como finalidad principal minimizar el número de asientos libres en las aulas asignadas, maximizando así el uso efectivo de los espacios disponibles.

Definición de Restricciones del modelo:

- Asignación de Aulas a Grupos:

$$\sum_{a=1} x_{g,a} = \mathbf{1} ; \quad \forall g \in G$$

Cada grupo debe ser asignado a un aula específico. Esta restricción garantiza que no haya superposiciones de grupos en el mismo espacio físico y al mismo tiempo ya que el aula asignada es fija. Evitando conflictos y asegurando la organización eficiente del espacio disponible.

- Capacidad de Aula:

$$N_g x_{g,a} \leq C_a ; \quad \forall g \in G, \quad \forall a \in A$$

La capacidad del aula debe ser suficiente para alojar a todos los alumnos del grupo. Esta restricción garantiza que no se exceda la capacidad máxima de ningún aula, evitando así la sobresaturación y asegurando condiciones adecuadas para el aprendizaje.

- Único Grupo por Aula:

$$\sum_{g=1} x_{g,a} \leq \mathbf{1} ; \quad \forall a \in A$$

Cada aula solo puede ser asignada a un máximo de un grupo. Esta restricción asegura que no existen dos grupos a los que se les ha asignado el mismo aula, evitando así superposiciones de espacio y asegurándose que cada grupo dispone de la exclusividad de un aula.

3.2. Modelo de Asignación de Aulas a Subgrupos de alumnos

Para este segundo modelo se tratará de asignar las aulas correspondientes a los subgrupos de alumnos puesto que todos los grupos tienen asignaturas con desdoblamiento y se realizan particiones del grupo de estudiantes en subgrupos más pequeños. Además, como este modelo parte de la base que los grupos enteros de alumnos ya tienen asignada un aula determinada, solo se debe realizar una asignación de aulas a los subgrupos. En este modelo también se buscará minimizar el número de asientos libres para las aulas asignadas a cada grupo.

Debido a la complejidad de este análisis se ha decidido realizar este modelo únicamente para dos grupos de alumnos, los cuales se dividirán en subgrupos en función de las asignaturas que deban cursar que requieran realizar una división en subgrupos.

Definición de Índices y Conjuntos:

- **G:** Conjunto de grupos de alumnos a los que se le debe asignar un aula. Cada grupo se representa con la letra g . Igual que se ha mencionado anteriormente, estar asociados a un año académico particular, un curso específico dentro del grado de estudios y una posible división adicional si es necesario. Para este modelo solo tendremos en cuenta dos grupos.
- **S:** Conjunto de subgrupos para las clases con desdoblamientos, y se identifica como s . Existen algunas asignaturas que se deben impartir en grupos de alumnos más reducidos que el tamaño de algunos grupos. Por lo que se divide un grupo de universitarios en varios subgrupos donde esa misma asignatura se imparte en diferentes aulas con diferentes profesores en la misma hora para cada subgrupo.
- **A:** Este conjunto comprende las aulas disponibles para la impartición de clases. Como ya se han asignado algunas aulas a los grupos enteros de alumnos, este conjunto representa las aulas disponibles (no asignadas anteriormente) para poder asignar a estos subgrupos, por lo que este conjunto será más pequeño que

el conjunto original de aulas. Cada aula se identifica con la letra a , y puede variar en capacidad de asientos.

- **AG:** En este conjunto se encuentran las aulas asignadas previamente a cada grupo entero. Esta variable la vamos a tener en cuenta a la hora de asignar las aulas a los subgrupos ya que estas aulas no van a estar disponibles para ser asignadas.

Definición de Parámetros:

- N_g : Este parámetro indica el número de alumnos en cada grupo representado como g , cuando no se divide en subgrupos. Es esencial para determinar la capacidad requerida de las aulas y para calcular el número de asientos ocupados en cada asignación.
- N_s : Este parámetro representa el número de alumnos para cada subgrupo para esas asignaturas que requieren desdoblamiento. Es también esencial para averiguar la capacidad mínima del aula a asignar.
- C_a : Muestra la capacidad máxima de cada aula a en términos de asientos disponibles, donde a pertenece al conjunto de aulas disponibles. Este parámetro es crucial para garantizar que cada aula asignada tenga suficiente capacidad para todos los estudiantes del grupo.
- K_a : Parámetro que representa el número de total de subgrupos en los que se divide cada grupo g .

Definición de Variables de Decisión:

$x_{s,a}$: Esta variable binaria indica si el subgrupo s está asignado al aula a independientemente del horaria o la asignatura. La variable toma valor 1 cuando el subgrupo s ha sido asignado al aula a , mientras que toma el valor 0 en caso contrario.

Función objetivo:

La función objetivo para esta segunda parte del modelaje de planificación de horarios es la siguiente:

$$\text{Min } z = \sum_{s=1} (\sum_{a=1} (C_a - N_g) * X_{s,a})$$

Como podemos observar, la función objetivo de este segundo modelo busca minimizar el número de asientos libres para las aulas asignadas a los subgrupos. Donde como nos hemos centrado en dos subgrupos, se ha asignado un aula diferente a cada uno de los subgrupos seleccionados para este estudio.

Definición de Restricciones del modelo:

- Asignación de Aulas a Subgrupos:

$$\sum_{a=1} x_{s,a} = 1 ; \quad \forall s \in S$$

Cada subgrupo deber ser asignado exactamente un aula, puesto que para que se imparta cualquier clase a un subgrupo debe ser en un aula. Esta restricción garantiza que a cada grupo le corresponde un aula para que no haya ni superposición de varios espacios asignados a los mismos alumnos, ni subgrupos sin aula asignada.

- Capacidad del Aula:

$$N_s x_{s,a} \leq C_a ; \quad \forall s \in S, \quad \forall a \in A$$

La capacidad de cada aula debe ser suficiente para poder albergar a todos los alumnos de cada subgrupo. Esta restricción asegura que no se exceda la capacidad máxima de ningún aula, evitando así la sobresaturación y asegurando condiciones adecuadas para el aprendizaje.

- Exclusividad de Aulas:

$$\sum_{s=1} x_{g,a} \leq 1 ; \quad \forall a \in A$$

Cada aula solo puede ser asignada como máximo a un subgrupo. Esta restricción garantiza que no existen dos subgrupos a los que se les ha asignado el mismo

aula, evitando así superposiciones de espacio y asegurándose que cada grupo dispone de un aula exclusivamente reservada para su clase y grupo.

3.3. Modelo de Asignación de Asignaturas, Profesores, Franjas horarias y Días

En este tercer y último modelo de optimización de horarios se pretende asignar asignaturas y sus correspondientes profesores a los grupos y subgrupos de alumnos en las horas y días correctos. El modelo parte de los resultados de los dos modelos anteriores donde se asignaban aulas a los distintos grupos y subgrupos de estudiantes, donde solo se ha decidido realizar este horario para dos grupos y sus correspondientes subgrupos debido a la complejidad del modelo. Sin embargo, para el primer modelo sí que se ha tenido en cuenta todos los grupos y aulas.

Esta última parte del modelaje tiene especial complejidad debido a que se busca cuadrar la disponibilidad de todos los profesores implicados, además de dar distintas prioridades según el tipo de profesor que sea (parcial o a tiempo completo).

Una vez desarrollado este modelo se dispondrá del planteamiento y aplicación completos para la planificación de horarios optimizada para la Universidad Pontificia de Comillas.

Definición de Índices y Conjuntos:

- **G:** conjunto que representa los grupos de alumnos seleccionados para esta parte del modelaje, es decir, tan solo los dos grupos seleccionados con los que se trabajará para realizar la asignación de horario. Se identifica con la letra g .
- **S:** Conjunto de subgrupos para las clases con desdoblamientos, y se identifica como s . Los subgrupos son particiones de los grupos de alumnos previamente escogidos.
- **A:** Conjunto de aulas ya asignadas tanto a los grupos como a sus subgrupos, independientemente del día o la hora. Este índice ya ha sido estudiado en los modelos anteriores, por lo que no se realizará prácticamente análisis con este.

- **P:** Conjunto de profesores que imparten clases para los grupos y subgrupos que se van a estudiar. Estos profesores imparten cierto tipo de asignaturas las cuales son comunes para diferentes grupos. Se identifica con la letra p y dependen de la asignatura c que tengan que impartir.
- **C:** Este conjunto representa las asignaturas que han de ser impartidas para los distintos grupos, estas asignaturas varían a lo largo de del tiempo para el mismo grupo de personas, esto es debido a que estos alumnos van avanzando de curso año tras año, mientras que la asignatura sigue siendo la misma para el mismo grupo con personas diferentes. Se identifica como c .
- **D:** Conjunto de días de la semana laboral, comprendido entre lunes y viernes. Donde en estos días se impartirá clase a los grupos de estudiantes. Este conjunto se identifica con la letra d .
- **H:** Conjunto de franjas horarias donde se puede impartir clases por parte de los profesores a los alumnos. Estas franjas horarias tienen una duración de entorno a dos horas, donde es tiempo suficiente para impartir una clase y que los estudiantes dispongan de un breve momento de tiempo entre clase y clase para aumentar su experiencia educativa.

Definición de parámetros:

- **$Cred_c$:** Indica el total de créditos de cada asignatura, el cual está directamente relacionado con el número de horas semanales que requiere ser impartida la asignatura c . Este número de horas de cada asignatura depende estrictamente de los créditos que tenga asociados a esta, donde por consecuencia cuantos más créditos tenga la asignatura, más horas se deberá impartir. Existen muchos dobles grados en la Universidad Pontificia de Comillas que tienen un plan de estudios más diferente, sin embargo, por regla general, por cada crédito que tiene una asignatura se deben impartir 10 horas de ésta.
- **$Disp_{p,d,h}$:** Indica la disponibilidad y preferencia de los profesores que trabajan en la universidad para impartir clase en cada hora y día. Este parámetro depende

del conjunto de profesores p , días d , y franjas horarias h . Esta disponibilidad nos la han proporcionado previamente para poder realizar una planificación que se ajuste a todas las necesidades de tanto los alumnos como los profesores. Si el profesor p tiene disponibilidad en el día d y en la franja horaria h , entonces se representa con el valor 1, en caso contrario es 0.

- **$ProfEsp_{a,p}$** : Este parámetro muestra la especialidad de un profesor p para impartir clases de un tipo de asignatura o , específicamente de una asignatura c . Dicho parámetro es de suma importancia puesto que los profesores no pueden impartir cualquier tipo de asignatura, cada profesor está autorizado a impartir unas pocas asignaturas específicas a los alumnos. Si el profesor p tiene el permiso y especialidad de impartir la asignatura a , entonces se representará con el valor 1, en caso contrario con un 0.

Definición de Variables de Decisión:

- **$x_{p,c,g,d,h}$** : Variable binaria que toma el valor 1 dado el caso que el profesor p enseñe la asignatura c al grupo g en el día d y en la franja horaria h , y en caso contrario toma el valor 0. En esta variable se trata de buscar la asignación de los profesores a las asignaturas con los grupos de alumnos, aunque también contempla la asignación de profesores y asignaturas a diferentes subgrupos, como se verá más adelante.

Función Objetivo:

La función objetivo de este último modelo busca maximizar la asignación de asignaturas y profesores, para poder completar los requerimientos de la planificación de horarios. Al maximizar la esta parte de asignación, se busca asegurar que no quede ningún grupo de alumnos con asignaturas por dar, o sin docente que les imparta alguna asignatura. Esta asignación es ponderada por la especialidad y la disponibilidad de cada profesor, ya que cada profesor debe impartir clases de su especialidad en el día y hora que tenga disponibilidad.

La función objetivo para este tercer modelo es la siguiente:

$$Max z = \sum_{c=1} \left(\sum_{p=1} \left(\sum_{g=1} \left(\sum_{d=1} \left(\sum_{h=1} \left(ProfEsp_{a,p} * Disp_{p,d,h} \right) * X_{c,p,g,d,h} \right) \right) \right) \right) \right)$$

Definición de Restricciones del modelo:

- Asignación de créditos por Asignatura:

$$\sum_{p=1} \left(\sum_{g=1} \left(\sum_{d=1} \left(\sum_{h=1} \left(ProfEsp_{a,p} * Disp_{p,d,h} \right) * X_{c,p,g,d,h} \right) \right) \right) = \frac{Cred_c}{3} ;$$

$$\forall c \in C$$

Esta restricción asegura que cada asignatura debe tener asignadas las clases necesarias para cumplir con los créditos establecidos en el plan de estudios de cada grado. Para hacer esto posible, se deben asignar los profesores especializados en sus asignaturas, con las asignaturas que imparten para cada asignatura el número de veces que sea necesario. Como ya se ha mencionado anteriormente, el número de veces que se imparte una asignatura está directamente correlacionado con los créditos de ésta, donde cada 3 créditos una asignatura se imparte una media de una vez a la semana, y así proporcionalmente.

- Disponibilidad del Profesor:

$$\sum_{c=1} \left(\sum_{g=1} \left(ProfEsp_{a,p} * X_{c,p,g,d,h} \right) \right) \leq Disp_{p,d,h} ;$$

$$\forall p \in P, d \in D, h \in H$$

Esta restricción garantiza que los profesores solo imparten sus asignaturas en el día y la hora que tienen disponibilidad. Y además de ello, la restricción también asegura que un profesor no se le pueda asignar la impartición de clases a grupos diferentes en el mismo momento (día y hora), debido a que no puede estar en dos lugares al mismo tiempo.

- Una Asignatura por Franja Horaria:

$$\sum_{a=1} (X_{c,p,g,d,h}) \leq 1; \quad \forall c \in C, p \in P, d \in D, h \in H$$

Esta restricción certifica que no pueda haber más de una asignación de una asignatura en la misma franja horaria y el mismo. En consecuencia, se confirma la exclusividad de cada asignatura en un momento determinado cuando ya se ha realizado una asignación para cada grupo.

- Asignación Simultánea de Profesores para las Asignaturas con Desdoblamiento:

$$X_{c,p1,g,d,h} = X_{c,p2,g,d,h};$$

$$\forall c \in C, \text{ con múltiples profesores } p1, p2 \dots, \forall g \in G$$

Esta restricción tiene en cuenta la posibilidad de asignaturas que requieran un desdoblamiento donde el grupo de alumnos se divide en diferentes subgrupos. Para esta casuística se ha de realizar todas las igualdades de todos los profesores que impartan la misma asignatura al mismo grupo dividido en subgrupos, con el fin de que todos los profesores impartan la misma clase en el mismo día y hora. Con esta restricción se asegura que los alumnos reciban clase de la misma asignatura en el mismo momento, pero de manera más personalizada, con el objetivo de mejorar la calidad educativa. Si, por ejemplo, la clase se particiona en 2 subgrupos, esta ecuación solo se tendría que declarar una vez igualando ambos profesores p . Sin embargo, si el grupo se divide en 4 subgrupos, cada profesor se debería igualar con el resto de los profesores, haciendo así 6 ecuaciones para igualar el momento de impartir clase con cada uno de los profesores.

- No repetición de Asignatura:

$$\sum_{p=1} \left(\sum_{g=1} \left(\sum_{h=1} \left(\text{ProfEsp}_{a,p} * \text{Disp}_{p,d,h} \right) * X_{c,p,g,d,h} \right) \right) \leq 1;$$

$$\forall a \in A, \forall d \in D$$

Esta restricción garantiza que una asignatura es impartida como máximo una vez en el mismo día, o, en otras palabras, que una asignatura no se puede impartir al mismo grupo más de una vez en el mismo día. Esto se tiene en cuenta para

garantizar una mínima calidad educativa y con el fin de que entre clase y clase los alumnos tengan la oportunidad de poder prepararse la lección antes de que se imparta.

CAPÍTULO IV: ANALISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

4.1. Resultados Modelo de Asignación de Aulas a Grupos

En la asignación de aulas a grupos de alumnos, el objetivo principal es la optimización de los espacios disponibles de la Universidad Pontificia de Comillas maximizando su eficiencia operativa. Esto significa que se busca minimizar el desperdicio de asientos, o, en otras palabras, minimizar el número de asientos que quedan vacíos al realizar la asignación de un aula a un grupo de alumnos. Por esta razón, para validar la eficacia del modelo matemático empleado de asignación de aulas, se ha de emplear análisis estadístico en profundidad de los resultados obtenidos.

Una vez se han obtenido los resultados de la asignación de aulas a grupos de estudiantes, los cuales se pueden ver más en detalle en la **Tabla 6**, es necesario realizar una comparación con la asignación manual que se ha estado haciendo previamente a este estudio. Para esta verificación no es suficiente con observar el total de desperdicio de asientos para cada horario, sino que se ha de realizar un análisis de **prueba de hipótesis de diferencia de media entre dos poblaciones**.

El análisis de hipótesis es una técnica imprescindible para determinar si las diferencias entre los resultados de ambas asignaciones son estadísticamente significativas, o si es producto del azar. Para este análisis se observa la diferencia de asientos libres o desperdiciados. Una vez realizado este análisis, dará la posibilidad de tomar una decisión certera sobre la validez y la efectividad de este modelaje matemático mediante la herramienta GAMS de asignación de aulas que se ha empleado en el Trabajo de Fin de Grado.

Declaración de Hipótesis:

- **Hipótesis nula (H_0):** Esta primera hipótesis, la cual se va a tratar de rechazar para este análisis, indica que el desperdicio medio en la asignación manual y es igual al nuevo desperdicio de la asignación empleada en esta investigación. La representación estadística de esta hipótesis se representa de la siguiente manera:

$$H^0: \mu_{manual} - \mu_{nueva} = 0$$

- **Hipótesis alternativa (H₁):** Esta segunda hipótesis afirma que el desperdicio medio de la asignación manual es mayor que el desperdicio de la asignación realizada en esta investigación mediante la herramienta de GAMS. Esta hipótesis es estadísticamente representada de la siguiente manera:

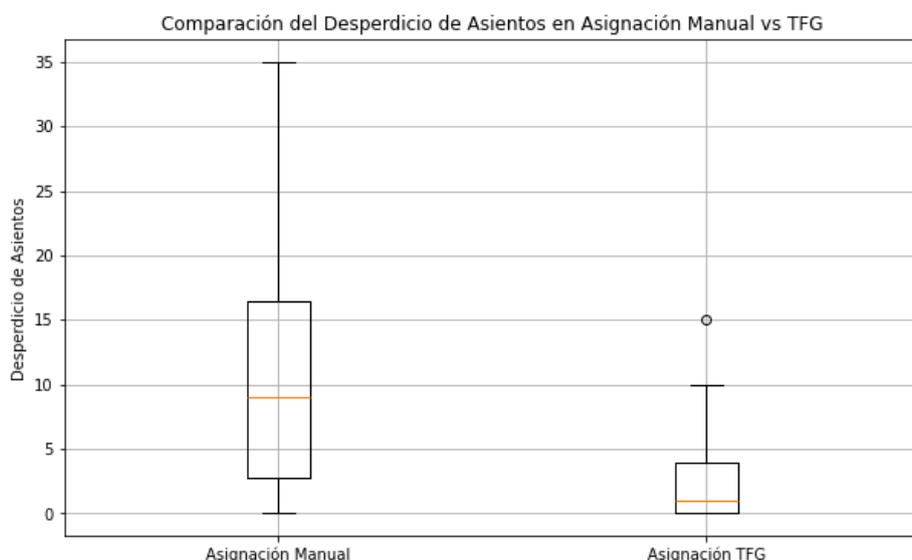
$$H^0: \mu_{manual} - \mu_{nueva} > 0$$

Datos utilizados:

Los datos que se ha utilizado para este análisis han sido el número de estudiantes que comprende cada grupo de alumnos a los que se requiere asignar un aula. Para más detalles sobre los diferentes grupos de alumnos y el número de integrantes, los datos se muestran en la **Tabla 2**. Y con la diferencia entre la capacidad del aula y el total de alumnos por grupo se ha obtenido el desperdicio de asientos para cada asignación.

La otra variable empleada ha sido el aforo máximo de cada aula en ambas asignaciones, o, en otras palabras, la capacidad de asientos disponibles de cada aula asignada. Estos datos están reflejados en la **Tabla 1**, donde se muestra el cada aula con el número de asientos.

A continuación, se muestra una tabla de la **comparación del desperdicio de asientos** en la asignación manual que se realiza hoy en día, frente al desperdicio de la asignación realizada en este estudio:



Como podemos observar en la asignación manual, el desperdicio es notoriamente mayor al desperdicio del modelo planteado y realizado de planificación de horarios. Esto se debe a que el modelo matemático encuentra el escenario óptimo de una asignación con el mínimo número posible de asientos libres o desperdiciados. Mientras que, en la asignación manual, se registran hasta desperdicios de 35 asientos, en la asignación propuesta el máximo desperdicio por clase es de 15 asientos, teniendo una mediana muy cercana a 0 asientos libres frente a la mediana de casi 10 asientos del modelo manual.

Cálculos:

Se han calculado las medias y las varianzas de cada grupo con su aula asignada y se han obtenido los diferentes resultados:

- Media de desperdicio en la asignación manual:

$$\bar{X}_1 = 11,25$$

- Media de desperdicio en la asignación del modelo matemático ejecutado por GAMS:

$$\bar{X}_2 = 2,9$$

- Varianza de la asignación manual:

$$s_1^2 = 151,92$$

- Varianza de la asignación nueva:

$$s_2^2 = 16,16$$

Más tarde, se ha calculado el T-Estadístico, el cual es una medida que se emplea en las pruebas de T de Student, con el fin de determinar si realmente existe una diferencia significativa entre las medias de los dos grupos. Esta prueba es comúnmente utilizada en la estadística inferencial para los casos de muestras pequeñas y con desviación estándar de la población desconocida. Este valor de T-Estadístico se compara posteriormente con un valor crítico de la distribución T de Student para ver si el valor crítico depende del nivel de significancia

El T-Estadístico se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} = 3,351$$

Donde:

- \bar{X}_1 y \bar{X}_2 son las medias de las muestras de las dos asignaciones.
- s_1^2 y s_2^2 son las varianzas de las muestras de las dos asignaciones.
- n_1 y n_2 son los tamaños de las muestras de ambas asignaciones.

A continuación, al calcular los grados de libertad (df) y el valor crítico t para esta prueba ($df=38$; $t_{\text{crítico}} = 1,686$) y para una cola con $\alpha = 0,05$ podemos posteriormente averiguar el P-valor, el cual nos proporciona la información necesaria para rechazar cualquiera de las dos hipótesis del estudio.

Se obtiene un p-valor asociado con el t estadístico mediante la tabla de distribución t con el valor de $p = 0,000915$.

Interpretación de los Resultados:

A la hora de interpretar los resultados obtenidos por el análisis de comparación de media poblacional hay que realizar dos comparaciones.

En primer lugar, se compara el T-Estadístico con el Valor t crítico, donde como el T-Estadístico (3,351) es mayor que el valor t crítico (1,686), se rechaza la hipótesis nula (H_0) en favor de la hipótesis alternativa (H_1).

En segundo lugar, se compara el P-valor (0,000915) con el nivel de significancia ($\alpha = 0,05$), y como el P-valor es menor que 0,05 también podemos **rechazar la hipótesis nula** de que los mejores resultados obtenidos por el modelo matemático empleado en esta investigación son fruto del azar. Concluyendo así que, en la metodología empleada ayuda significativamente a reducir el desperdicio de asientos libres la planificación de los horarios de la Universidad Pontificia de Comillas.

4.2. Resultados Modelo de Asignación de Aulas a Subgrupos

Primeramente, este segundo modelo de asignación de aulas a subgrupos se ha llevado a cabo exitosamente donde se han encontrado y asignado a los subgrupos, las aulas que proporcionaban el menor número de asientos libres posible.

Como bien se puede observar en la **Tabla 7**, el estudio se ha centrado en la asignación para los subgrupos de tan solo 2 grupos (en este caso g3 y g12). Donde el desperdicio total de asientos, sumando todas las aulas asignadas, es de **156 asientos libres**. Esto indica que, aunque se ha conseguido asignar aulas a todos los subgrupos que se han seleccionado, el desperdicio de esta asignación aún es bastante significativo en la mayoría de las aulas. Por lo tanto, se ha intentado minimizar el desperdicio, pero todavía hay **margen para mejorar** la asignación de aulas y reducir aún más los asientos no utilizados.

Para reducir esa amplia posibilidad de mejorar los resultados de desperdicio de asientos del segundo modelo se pueden llevar a cabo diversos enfoques. El modelo en sí tiene bastantes **limitaciones**, ya que el primer modelo se desarrolló únicamente teniendo en cuenta los grupos y no los subgrupos y desdoblamientos, y el segundo modelo se construyó en base a las aulas que aún quedaban libres después de la primera asignación.

Con una asignación atemporal, en la que no se tiene en cuenta ni la hora ni el día reservando en todo momento el aula para el mismo grupo provoca que las aulas que se han asignado a los subgrupos se queden **inutilizadas durante la gran mayoría de tiempo**, salvo cuando se imparten las asignaturas con desdoblamientos de ese grupo, lo cual contribuye al **aumento de desperdicio de asientos**.

Este aumento del desperdicio se debe a que, para este modelo, las aulas no se pueden reutilizar para otras clases en diferentes franjas horarias a las que se imparte las asignaturas con desdoblamiento. A pesar de que este enfoque simplifica el problema y proporciona una solución lógica y viable en el corto plazo, esta planificación propuesta por el modelo termina siendo una subutilización de los recursos físicos disponibles de la universidad.

4.3. Resultados Modelo de Asignación de Asignaturas, Profesores, Horas y Días

Antes de entrar en detalle sobre las diferentes variables del estudio, a pesar de la extrema complejidad del tercer modelo de asignación de asignaturas y profesores a grupos y subgrupos en una franja horaria y día determinados, se ha conseguido

proporcionar resultados no solo lógicos, sino también óptimos donde se ha podido cumplir todos los requisitos de este enrevesado y difícil modelo.

Como se puede observar en la **Tabla 8** y en la **Tabla 9**, los grupos y sus correspondientes subgrupos g3 y g12 fueron asignados unos profesores y asignaturas en unos horarios específicos con diferentes franjas y días de la semana, tratando de cumplir con las preferencias horarias de los docentes. La representación de las dos tablas tan solo muestra las variables binarias ($x_{p,c,g,d,h}$) que han sido identificadas con el valor 1, indicando que se ha efectuado esa asignación para todas las variables.

También se puede observar en los resultados del modelo que se ha dado el caso de diferentes casuísticas de planificación de horarios, un ejemplo es, la asignatura c7 del grupo g3 se imparte por dos profesores diferentes p11 y p12 en la franja horaria de h3 de los viernes. Esto se debe a que para esa asignatura se particiona el grupo en dos, dándose clase el mismo día a la misma hora, pero con dos profesores distintos, uno para cada subgrupo.

Asimismo, también se respetó la restricción de la **exclusividad del profesor** donde cada docente no tiene asignado la impartición de clase a más de un grupo o subgrupo en el mismo instante.

En definitiva, el modelo ha logrado por regla general la asignación de horarios respetando las preferencias horarias de los profesores, cumpliendo todas las restricciones declaradas y consiguiendo el **resultado óptimo**. Esta asignación propuesta tiene la capacidad de provocar una mejora en la satisfacción de los profesores y en la organización de los recursos y la planificación del horario académico.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio realizado para este Trabajo de Fin de Grado ha facilitado el desarrollo de un sistema integral donde desarrolla la planificación de horarios de la Universidad Pontificia de Comillas. Este modelaje implementado ha logrado una asignación óptima de las aulas, días y horas para el desarrollo de las clases de los alumnos, teniendo en consideración no solo las necesidades de los estudiantes, sino las disponibilidades y preferencias de los profesores. A lo largo del análisis, se han desarrollado e implementado 3 diferentes modelos, donde cada uno cubre una necesidad diferente en la planificación de los horarios.

Una vez finalizado el análisis de los resultados obtenidos por el primer modelo matemático de asignación de aulas para los grupos, la evidencia del análisis estadístico muestra que el desperdicio medio de los asientos en la asignación previamente manual es significativamente mayor que el desperdicio en la asignación realizada en este Trabajo de Fin de Grado.

Los resultados del análisis de **comparación de media de diferentes poblaciones** validan científica y estadísticamente los beneficios de la metodología propuesta en la investigación. Ya que, al demostrar que el desperdicio de los asientos es significativamente menor que la asignación manual que se emplea hoy en día.

Lo que significa que la metodología propuesta en este estudio demuestra ser mucho **más eficiente** en cuanto a **reducción de desperdicio** de los espacios físicos de la universidad, reflejado en los asientos de las aulas asignadas a los grupos de alumnos. Dicho análisis respalda la justificación de adoptar este nuevo método de asignación de aulas y planificación de horarios, no solo porque los resultados son más eficientes y óptimos que la asignación manual, sino también porque este modelo mejora la eficiencia en la gestión de los recursos administrativos y físicos. De tal manera que la nueva metodología propuesta puede tener implicaciones de **mejora económica y logística** significativas no solo para la Universidad Pontificia de Comillas, sino para otros centros de enseñanza, mejorando así la calidad educativa.

En el segundo modelo, la **asignación atemporal** de las aulas a los subgrupos ha conllevado a un desaprovechamiento de las aulas en los horarios donde no se imparten las asignaturas de desdobles. Por lo que la necesidad de reservar un aula completa para un subgrupo independientemente del día y la hora resulta en ineficiencias adicionales.

Consecuentemente, con el fin de **mejorar la asignación de aulas a subgrupos** en planificaciones de futuros años, se recomienda una incorporación de **preferencias temporales**, donde se considera incluir las franjas horarias específicas que se utilizarán las aulas para el desdoblamiento. Posibilitando así una reutilización de las mismas aulas en diferentes horas para mejorar la eficiencia de los espacios físicos. Sin embargo, conforme se amplían las dimensiones de cada variable de estudio, también se aumenta la complejidad del modelo ejecutado, el cual puede resultar más difícil de desarrollar. Y si se ha decidido implementar una división del modelaje de la planificación para simplificar el diseño y realizar una respuesta más eficiente, sería contraproducente hacer lo contrario, agrupar las variables de los modelos.

Después de ejecutar y analizar los dos primeros modelos, los cuales buscan la asignación de aulas a diferentes grupos y subgrupos tratando de minimizar el desperdicio de asientos y espacio físico de la universidad se ha realizado la asignación del resto de variables del estudio. Estableciéndose unos horarios (franja horaria y día) para la asignación de profesores y aulas a los diferentes grupos estudiados. Con esta última parte del modelaje se ha conseguido **maximizar la satisfacción de las preferencias horarias** de los profesores, garantizando que no hubiese conflicto de horarios con respecto a tanto los grupos como asignaturas y profesores. Es así como se ha conseguido **mejorar la gestión de los recursos humanos** de la institución educativa al mejorar la organización del horario académico. A pesar de que la inclusión de estas preferencias horarias de cada uno de los docentes provoca un aumento en la complejidad del modelo además de requerir más ajustes para adaptarse a los cambios de las disponibilidades de los profesores, estas preferencias pueden tener consecuencias de impacto positivo. Puesto que al aumentar la satisfacción de los docentes mejorando la conciliación con sus otras obligaciones fuera de la universidad, favorece la **retención de talento** de los profesores.

Tras realizar conclusiones sobre los resultados de los tres modelos, conviene realizar un análisis de las herramientas utilizadas para llevar a cabo el modelaje del estudio. En esta investigación, se han empleado dos herramientas de modelaje algebraico para obtener resultados de problemas de optimización lineales y no lineales, estas herramientas son GAMS Studio y NEOS Server. Donde desarrollando el código necesario, se ha logrado materializar los modelos planteados con sus variables, parámetros, funciones y restricciones para hallar así el mejor resultado posible.

CAPÍTULO VI: FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Aunque el desarrollo del sistema de planificación de horarios para la universidad haya conseguido significativos avances en la optimización de recursos tanto humanos como económicos, la complejidad de este ejercicio requiere hacer el ejercicio de retrospección y analizar posibles futuras líneas de investigación a partir del estudio realizado.

Una de las áreas clave para una exploración futura es la **incorporación de más factores**, el ejemplo más claro es añadir las preferencias y necesidades de los estudiantes para el tercer modelo de la planificación. Debido a que la satisfacción estudiantil es un componente de suma importancia para la universidad al ser privada, tener en cuenta las **preferencias de los alumnos** puede favorecer a la mejorar de la experiencia universitaria y la percepción de calidad educativa. La incorporación de datos sobre las inquietudes y necesidades del alumnado, recolectada mediante encuestas periódicas sobre las preferencias horarias, puede contribuir positivamente al bienestar general de los universitarios. Este tipo de enfoque ya se está llevado a cabo en la planificación de exámenes finales de la universidad, donde la predisposición a recibir feedback de los estudiantes por parte de la universidad tiene muy buena acogida por parte de los alumnos.

Otra posible línea de ampliación del modelo puede ser una mejora del uso de los recursos compartidos maximizando la utilización de algunos espacios comunes como laboratorios, bibliotecas, salas de conferencias o de estudio. Para la metodología de esta nueva propuesta podría ser el desarrollo de un modelo específico dentro de todo el modelaje donde se coordine y se optimice la **asignación de estos espacios compartidos**, tratando de asegurar que estén disponibles siempre que se necesiten, minimizando así los periodos de inutilización para erradicar el desperdicio de estas salas.

Y, por último, una vez se ha evaluado la aplicación de este modelaje de asignación de aulas y planificación de horarios para toda la universidad, y posteriormente se ha implementado la propuesta de este estudio, puede ser beneficioso realizar una **expansión del modelo a otras instituciones educativas**. Donde, a partir del éxito que el modelo habría tenido, se podría utilizar como base para implementar esta herramienta en otras universidades, colegios o centros educativos. Esta propuesta no solo ayudaría a otras instituciones a mejorar su gestión de recursos humanos y económicos, sino que

también mejoraría su calidad educativa, siendo desde el punto de vista de la Universidad Pontificia de Comillas **otra fuente de ingresos**.

En conclusión, la implementación de este sistema integral de planificación de horarios basado en los modelos matemáticos propuestos, los cuales tienen como objetivo optimizar maximizando el uso de los recursos físicos y la disponibilidad de los profesores, ofrece múltiples beneficios a la universidad, como una mejora de la satisfacción tanto docente como estudiantil. La recomendación de este Trabajo de Fin de Grado es realizar un piloto de planificación de horarios para un par de grupos, y viendo su posterior éxito, escalar y aumentar la resta de grupos de estudiantes de la universidad.

CAPÍTULO VII: ANEXOS

7.1. Tablas de Datos empleadas para el Estudio

Tabla 2: Grupos de Alumnos (C_a)

GrupoID	nº Alumnos
g1	65
g2	65
g3	65
g4	65
g5	65
g6	65
g7	65
g8	65
g9	60
g10	60
g11	55
g12	55
g13	60
g14	60
g15	60
g16	60
g17	50
g18	50
g19	50
g20	50

Tabla 1: Aulas Disponibles (N_g)

AulaID	Aforo
a1	66
a2	61
a3	60
a4	90
a5	67
a6	75
a7	60
a8	60
a9	48
a10	80
a11	80
a12	80
a13	24
a14	44
a15	44
a16	60
a17	100
a18	67
a19	68
a20	66
a21	63
a22	36
a23	86
a24	86
a25	65
a26	80
a27	51
a28	51
a29	54
a30	60
a31	40
a32	40
a33	60
a34	54

Tabla 3: Asignaturas de cada grupo y sus créditos

Grupo	Asignatura	Creditos
g12	c1	6
g12	c2	6
g12	c3	6
g12	c4	3
g12	c5	6
g12	c6	6
g3	c7	3
g3	c8	6
g3	c9	6
g3	c10	3
g3	c11	3
g3	c12	6
g3	c13	3

Tabla 4: Profesores disponibles y su disponibilidad

PROFESOR	L.h1	L.h2	L.h3	M.h1	M.h2	M.h3	X.h1	X.h2	X.h3	J.h1	J.h2	J.h3	V.h1	V.h2	V.h3
p1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
p2	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
p3	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
p4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1
p5	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
p6	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1
p7	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0
p8	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0
p9	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1
p10	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0
p11	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
p12	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
p13	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0
p14	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
p15	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1
p16	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
p17	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
p18	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0
p19	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1

Tabla 5: Especialidad de cada Profesor

Asignatura	PROFESOR
c1	p1
c2	p2
c3	p3
c4	p4
c5	p5
c5	p6
c5	p7
c5	p8
c5	p9
c6	p10
c7	p11
c7	p12
c8	p13
c9	p14
c10	p15
c11	p16
c12	p17
c13	p18
c13	p19

RESULTADOS:

Tabla 6: Resultados Primer Modelo

GRUPO	AULAS	X(G,A)	DESPERDICIO
g1	a25	1	0
g2	a20	1	1
g3	a1	1	1
g4	a6	1	10
g5	a5	1	2
g6	a19	1	3
g7	a26	1	15
g8	a18	1	2
g9	a16	1	0
g10	a8	1	0
g11	a3	1	5
g12	a21	1	8
g13	a30	1	0
g14	a33	1	0
g15	a2	1	1
g16	a7	1	0
g17	a34	1	4
g18	a28	1	1
g19	a29	1	4
g20	a27	1	1
TOTAL		20	58

Tabla 7: Resultados Segundo Modelo

GRUPO	SUBGRUPO	AULA	X(S,A)	DESPERDICIO
g12	g12s1	a32	1	27
g12	g12s2	a13	1	11
g12	g12s3	a31	1	27
g12	g12s4	a14	1	31
g12	g12s5	a15	1	31
g3	g3s1	a9	1	20
g3	g3s2	a22	1	9
TOTAL			7	156

Tabla 8: Resultados Tercer Modelo (Grupo G3)

GRUPO	ASIGNATURA	PROFESOR	DÍA	FRANJA HORARIA	X(C,P,G,D,H)
G3	c7	p11	V	h3	1
		p12	V	h3	1
	c8	p13	L	h2	1
			X	h1	1
	c9	p14	M	h3	1
			X	h3	1
	c10	p15	M	h2	1
	c11	p16	X	h2	1
	c12	p17	L	h1	1
			V	h1	1
	c13	p18	V	h2	1
		p19	V	h2	1

Tabla 9: Resultados Tercer Modelo (Grupo G12)

GRUPO	ASIGNATURA	PROFESOR	DÍA	FRANJA HORARIA	X(C,P,G,D,H)
G12	c1	p1	L	h2	1
			J	h2	1
	c2	p2	M	h2	1
			X	h2	1
	c3	p3	L	h3	1
			V	h3	1
	c4	p4	J	h3	1
	c5	p5	M	h1	1
			V	h2	1
		p6	M	h1	1
			V	h2	1
		p7	M	h1	1
			V	h2	1
		p8	M	h1	1
			V	h2	1
		p9	M	h1	1
			V	h2	1
	c6	p10	M	h3	1
X			h3	1	

7.2. Declaración de Uso de Herramientas de Inteligencia Artificial en el TFG

ADVERTENCIA: Desde la Universidad consideramos que ChatGPT u otras herramientas similares son herramientas muy útiles en la vida académica, aunque su uso queda siempre bajo la responsabilidad del alumno, puesto que las respuestas que proporciona pueden no ser veraces. En este sentido, NO está permitido su uso en la elaboración del Trabajo fin de Grado para generar código porque estas herramientas no son fiables en esa tarea. Aunque el código funcione, no hay garantías de que metodológicamente sea correcto, y es altamente probable que no lo sea.

Por la presente, yo, Sergio Íñiguez Rodríguez, estudiante de ADE y Business Analytics de la Universidad Pontificia Comillas al presentar mi Trabajo Fin de Grado titulado MANOS UNIDAS. Análisis cuantitativo y cualitativo de los mensajes recibidos del buzón de Manos Unidas., declaro que he utilizado la herramienta de Inteligencia Artificial Generativa ChatGPT u otras similares de IAG de código sólo en el contexto de las actividades descritas a continuación:

1. **Referencias:** Usado juntamente con otras herramientas, como Science, para identificar referencias preliminares que luego he contrastado y validado.
2. **Metodólogo:** Para descubrir métodos aplicables a problemas específicos de investigación.
3. **Interpretador de código:** Para realizar análisis de datos preliminares.
4. **Corrector de estilo literario y de lenguaje:** Para mejorar la calidad lingüística y estilística del texto.
5. **Sintetizador y divulgador de libros complicados:** Para resumir y comprender literatura compleja.
6. **Revisor:** Para recibir sugerencias sobre cómo mejorar y perfeccionar el trabajo con diferentes niveles de exigencia.

Afirmo que toda la información y contenido presentados en este trabajo son producto de mi investigación y esfuerzo individual, excepto donde se ha indicado lo contrario y se han dado los créditos correspondientes (he incluido las referencias adecuadas en el TFG y he explicitado para que se ha usado ChatGPT u otras herramientas similares). Soy

consciente de las implicaciones académicas y éticas de presentar un trabajo no original y acepto las consecuencias de cualquier violación a esta declaración.

Fecha: [19/06/2024]

Firma: Sergio Íñiguez Rodríguez

7.3. BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, C. A. A., Sabili, M. A., & Frigal, F. F. S. (2024). MARA: A Mobile-based Academic Reminder Application. *International Journal of Computing Sciences Research*, 8, 2734-2748. [//www.stepacademic.net/ijcsr/article/view/493](http://www.stepacademic.net/ijcsr/article/view/493)
- Aubanell, A. (2009). *UN PASEO POR EL ORIGEN DEL CALENDARIO Y DEL SISTEMA MÉTRICO*.
- Baker, R., Evans, B., Li, Q., & Cung, B. (2019). Does Inducing Students to Schedule Lecture Watching in Online Classes Improve Their Academic Performance? An Experimental Analysis of a Time Management Intervention. *Research in Higher Education*, 60(4), 521-552. <https://doi.org/10.1007/s11162-018-9521-3>
- Fernández-Montalvo, J., & Piñol, E. (2000). Horario laboral y salud: Consecuencias psicológicas de los turnos de trabajo. *Revista de Psicopatología y Psicología Clínica*, 5(3), Article 3. <https://doi.org/10.5944/rppc.vol.5.num.3.2000.3899>
- J. Rubén, M. I. (2008). *La medición del tiempo*. 11, 10.
- Morones Ibarra, J. R. (2008). *La medición del tiempo*. XI, 10.
- Razali, S., Rusiman, M. S., Gan, W. S., & Arbin, N. (2018). The Impact of Time Management on Students' Academic Achievement. *Journal of Physics: Conference Series*, 995, 012042. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/995/1/012042>
- Santillán-Marroquín, W. (2020). Teletrabajo en el COVID-19. *CienciAmérica*, 9(2), 65-76. <https://doi.org/10.33210/ca.v9i2.289>
- Yusop, N. (2022). A Systematic Literature Review: Optimization Timetable in Education to Support Work-Life Balance (WLB). *Journal of Computing Research and Innovation*, 7(2), Article 2. <https://doi.org/10.24191/jcrinn.v7i2.324>

Zerubavel, E. (2020). The Sociology of Time. En J. Reinecke, R. Suddaby, A. Langley,
& H. Tsoukas (Eds.), *Time, Temporality, and History in Process Organization
Studies* (p. 0). Oxford University Press.

<https://doi.org/10.1093/oso/9780198870715.003.0004>