



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



FACULTAD DE
INGENIERÍA

Herramienta de calendarización de parciales FING

Patricio Neri Carrera

Florencia Peirano Pereyra

*Proyecto de Grado de Ingeniería de Producción presentado ante la
Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República*

Tutor

Prof. Adrián Ferrari

Tribunal

Prof. Libertad Tansini

Prof. Karina López

Montevideo, Uruguay

Abril 2024

*Dedicado y realizado para
los futuros estudiantes de ingeniería de la Fing,
con la finalidad de mejorar la experiencia de la
educación pública de nuestro país*

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro profundo agradecimiento a todas aquellas personas que contribuyeron de una manera u otra al desarrollo y culminación de este Proyecto de Grado. Sus valiosos aportes y apoyos fueron fundamentales para recorrer este camino.

En primer lugar, agradecemos a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República por brindarnos la oportunidad de contribuir a la mejora en la gestión administrativa de los calendarios de parciales y por ende colaborar en cierta medida, en el avance académico de los estudiantes.

Agradecemos enormemente a Ema Soboredó, asistente académica de la FIng, por su disposición durante todo el proceso. Su compromiso y dedicación como contraparte fueron esenciales para el avance fluido de esta investigación.

Nuestro más sincero reconocimiento al Ingeniero Adrián Ferrari, quien desempeñó el papel de tutor y guía en este proyecto. Su experiencia, orientación e impulso fueron cruciales para dar forma a esta investigación y alcanzar los objetivos propuestos.

Asimismo, queremos expresar nuestra gratitud al equipo de Bedelías, en particular a Daniel Alessandrini de la Unidad de Enseñanza de la FIng, por la generosidad y celeridad con la que compartieron datos en diferentes oportunidades y brindaron sugerencias que enriquecieron considerablemente la solución propuesta.

Un agradecimiento especial al Ingeniero Héctor Cancela por su valioso asesoramiento en la elaboración del diseño del modelo. Sus conocimientos expertos y orientación técnica fueron fundamentales para el desarrollo y la robustez del enfoque propuesto.

Por último, resta agradecerle profundamente a nuestra familia y amigos, por el apoyo incondicional a lo largo de este proceso de aprendizaje como profesionales de la Ingeniería.

A todos ellos, nuestro más sincero agradecimiento.

Resumen

Este proyecto trata la problemática inherente a la asignación de un conjunto específico de unidades curriculares a turnos y días en un calendario de parciales. Se selecciona como caso de estudio primario el conjunto constituido por las unidades curriculares obligatorias y electivas de Ingeniería de Producción ofrecidas durante el semestre impar, según la currícula actualizada al 2023. Adicionalmente, se extiende el análisis al total de unidades curriculares de grado ofrecidas en la Facultad de Ingeniería.

El problema de confeccionar un calendario de evaluaciones conlleva la necesidad de proporcionar a los estudiantes asignaciones que faciliten una planificación efectiva del tiempo de estudio. Esto implica considerar restricciones de carácter *duras* y *blandas*, tales como la capacidad de los turnos o posibles conflictos entre las unidades curriculares.

Este problema ha persistido en su relevancia a lo largo del tiempo, experimentando diversas aproximaciones desde métodos manuales anteriores a la era computacional hasta estrategias heurísticas y modelos matemáticos respaldados por técnicas de inteligencia artificial. En este proyecto, se adopta un enfoque heurístico con el propósito de comprender exhaustivamente el comportamiento del modelo y facilitar la mejora continua mediante ajustes paramétricos.

La inclusión de las preferencias estudiantiles adquiere un papel crucial en la metodología. Para garantizar la utilidad de la solución propuesta, se implementan encuestas dirigidas a comprender las limitaciones y preferencias de los estudiantes, contribuyendo así a evitar conflictos en la programación. Además, se colabora estrechamente con el equipo de asistentes académicos y la unidad de enseñanza para comprender los procedimientos actuales y el comportamiento deseado de la herramienta.

La salida del modelo proporciona asignaciones sugeridas y matrices que posibilitan un análisis detallado de la calidad del resultado. Este análisis incluye la evaluación de la diferencia de días y turnos entre unidades curriculares, así como una métrica escalar que expresa la calidad del resultado al evaluar de forma conjunta el grado de conflictividad de las unidades curriculares y el distanciamiento que hay entre ellas. Asimismo, se permite al usuario iterar e incidir sobre la salida del modelo, con el fin de perfeccionar el resultado propuesto.

Se lleva a cabo un análisis de sensibilidad para examinar la variabilidad del calendario de salida y las matrices frente a modificaciones en parámetros específicos, tales como la disponibilidad y capacidad de los turnos, o la conflictividad entre unidades curriculares.

El modelo computacional propuesto adopta asimismo un enfoque que permite la replanificación según sea necesario. Se reconoce la posibilidad de que surjan imprevistos, como paros o reclamos estudiantiles, y se contempla la necesidad de ajustar el plan original en consecuencia.

Palabras clave: *calendarización de exámenes, métodos heurísticos, replanificación, métricas ponderadas.*

Keywords: *exam scheduling, heuristic methods, replanning, weighted metrics.*

Índice

Agradecimientos	3
Resumen	5
Índice	6
Índice de Figuras	8
Índice de Tablas	9
Glosario de términos	11
1. Introducción	13
2. Marco teórico	15
2.1. Factibilidad del problema.....	15
2.2. Antecedentes.....	17
2.3 Métodos utilizados.....	18
2.3.1.Métodos secuenciales.....	18
2.3.1.1. Teoría de grafos.....	18
2.3.2.Métodos de cluster.....	20
2.3.3.Métodos restrictivos.....	20
2.3.4 Métodos heurísticos y metaheurísticos.....	21
2.3.4.1. Optimización por colonia de hormigas.....	23
2.3.4.2. Búsqueda Tabú.....	23
2.3.4.3. Algoritmos genéticos y meméticos.....	24
2.3.5. Otros métodos.....	25
2.3.5.1. Algoritmos de aprendizaje automático.....	25
2.3.5.2. Enfoque multicriterio.....	26
2.3.5.3. Aplicación del Razonamiento Basado en Casos.....	27
2.3.6. Recientes investigaciones y desarrollo del área de trabajo.....	27
2.3.6.2 PATAT.....	27
2.3.6.3. Desarrollo de un benchmark.....	28
3. Definición del Problema	30
3.1. Planes de estudio y calendario lectivo FING.....	30
3.2. Descripción método actual.....	31
3.3. Descripción del caso.....	33
3.3.1. Elementos del problema.....	33
3.3.1.1 Horarios disponibles.....	33
3.3.1.2 Recursos disponibles.....	34
3.3.1.3 Conjunto de unidades curriculares.....	35
3.3.1.4 Restricciones.....	35
3.4. Importancia de calendarios en los estudiantes: Resultados de la encuesta.....	36
3.4.1. Conclusiones de la encuesta.....	43
3.5. Deserción en la FING.....	43
3.4. Modelado de la realidad.....	44
3.5. Simplificaciones y suposiciones.....	45
4. Diseño del modelo	46

4.1. Formulación.....	46
4.1.1. Parámetros.....	47
4.1.2. Variables.....	51
4.2. Evolución del modelo.....	53
4.2.1. Coloración de grafos.....	53
4.2.2. Modelo matemático.....	53
4.2.3. Modelo por fases.....	53
4.3. Estructura.....	62
4.3.1. Fase 1.....	63
4.3.2. Fase 2.....	66
4.3.3. Fase 3.....	69
4.4. Excepciones.....	70
4.5. Validación del modelo.....	74
5. Relevamiento y generación de datos.....	81
5.1. Metodología.....	81
5.2. Datos obtenidos.....	81
5.3. Dificultades encontradas.....	82
6. Análisis de resultados.....	83
6.1. Análisis del modelo completo.....	83
6.1.1 Entradas.....	83
6.1.2 Performance del modelo.....	84
6.1.2.1 Fase 1.....	84
6.1.2.2 Fase 2.....	87
6.1.3. Salidas.....	87
6.2. Análisis de sensibilidad.....	91
6.3. Análisis complementarios.....	93
6.3.1 Comparación calendario manual y computacional semestre impar.....	93
6.3.2 Comparación calendario manual y computacional semestre par.....	100
7. Aplicación en la realidad.....	109
7.1 Herramienta para la toma de decisiones.....	109
7.2 Recomendaciones.....	109
8. Conclusiones.....	111
9. Trabajos futuros.....	113
10. Bibliografía.....	115
10. Anexos.....	118

Índice de Figuras

Figura I: ejemplo método de coloración de grafos.....	19
Figura II: ejemplo de Programación Entera Mixta (Taha, 2014).....	21
Figura III: Pseudocódigo búsqueda Tabú (Islam et al, 2016).....	24
Figura IV: Principios de algoritmos genéticos (Burke et al, s.f).....	25
Figura V: Principios de algoritmos meméticos (Burke et al, s.f).....	25
Figura VI: Distribución de la muestra por carrera.....	37
Figura VII: Distribución de año de ingreso FIng.....	37
Figura VIII: Distribución de la muestra en semestre en curso.....	37
Figura IX: Percepción de incidencia de los calendarios en el avance de carrera.....	38
Figura X: Revisión de los calendarios del mismo semestre del año anterior.....	38
Figura XI: Percepción de influencia de calendario en la elección de las UC a inscribirse.....	38
Figura XII: Distribución de nivel de consulta de calendarios tentativos.....	39
Figura XIII: Percepción grado de influencia de calendarios en el abandono de UCs.....	39
Figura XIV: Abandono de UCs en función de calendario de primeros parciales.....	39
Figura XV: Percepción de nivel de organización de los parciales de Fing.....	40
Figura XVI: Solicitud de cambios sobre el calendario definitivo de parciales.....	40
Figura XVII: Consideración de solicitud de cambios del calendario definitivo de parciales...	41
Figura XVIII: Aspectos prioritarios a considerar a la hora de armar el calendario.....	42
Figura XIX: Importancia de tener calendarios tentativos.....	42
Figura XX: Primer versión del diagrama de decisión de fase 1.....	57
Figura XXI: Segunda versión del diagrama de decisión de fase 1.....	60
Figura XXII: Diagrama de arquitectura del programa (fases 1, 2 y 3).....	63
Figura XXIII: Diagrama de decisión definitivo de primera fase.....	65
Figura XXIV: Diagrama de decisión definitivo de Fase 2.....	67
Figura XXV: Diagrama de decisión definitivo de tercera fase.....	70
Figura XXVI: Pasos acumulados modelo completo fase 1.....	85
Figura XXVII: Pasos acumulados modelo completo fase 2.....	87
Figura XXVIII: Diferencia mínima para UC en conflicto.....	90
Figura XXX: Diferencia de turnos mínima para UC en conflicto semestre impar.....	98
Figura XXXI: Distribución de UC semestres iniciales en modelo.....	99
Figura XXXII: Distribución de unidades curriculares sugeridas para semestres iniciales en.....	99
Figura XXXIII: Distribución de UC sugeridas para semestres avanzados en el.....	100
Figura XXXIV: Distribución de UC sugeridas para semestres avanzados computacional...	100
Figura XXXV: Diferencia de turnos mínima para UC en conflicto semestre par.....	104
Figura XXXVI: Distribución de UC sugeridas para semestres iniciales manual.....	105
Figura XXXVII: Distribución de UC sugeridas semestres iniciales computacional.....	106
Figura XXXVIII: Distribución de UC sugeridas semestres avanzados manual.....	106
Figura XXXIX: Distribución de UC sugeridas semestres avanzados computacional.....	107

Índice de Tablas

Tabla I: Ingresos y egresos estudiantes a Facultad de Ingeniería por año.....	30
Tabla II: Fechas de períodos de parciales.....	31
Tabla III: Tipos de restricciones.....	36
Tabla IV: Matriz de disponibilidad de turnos binaria a modo de ejemplo.....	47
Tabla V: Matriz de disponibilidad y capacidad de turnos a modo de ejemplo.....	48
Tabla VI: Matriz de concurrencia a modo de ejemplo.....	48
Tabla VII: Matriz de datos maestros de las unidades curriculares.....	49
Tabla VIII: Vector de unidades curriculares.....	49
Tabla IX: Vector de nombres de unidades curriculares.....	50
Tabla X: Vector de inscriptos por UC.....	50
Tabla XI: Ejemplo vector de asignaciones.....	51
Tabla XII: Ejemplo matriz de diferencia de días.....	52
Tabla XIII: Ejemplo matriz de diferencia de turnos.....	52
Tabla XIV: Representación del calendario de salida.....	66
Tabla XV: Representación del calendario de salida.....	67
Tabla XVI: Calendario a ser modificado.....	72
Tabla XVII: Calendario con día a modificar.....	73
Tabla XVIII : turnos_disponibles_dt modificado para tratar excepción.....	74
Tabla XIX: Calendario de salida de la primera fase.....	76
Tabla XX: Calendario de salida de la segunda fase.....	77
Tabla XXI: Resultado visual de asignaciones tras primeras 2 fases.....	78
Tabla XXII: Cantidad de estudiantes asignados por turno.....	79
Tabla XXIII: Porcentaje de ocupación por turno.....	79
Tabla XXIV: Calendario asignación fase 1 modelo completo.....	86
Tabla XXV: Calendario asignación fase 2 modelo completo.....	89
Tabla XXVI: Ocupación de estudiantes por turno.....	91
Tabla XXVII: Ocupación por turno en porcentajes.....	91
Tabla XXVIII: Análisis de sensibilidad variando cantidad_UC_fase1.....	92
Tabla XXIX: Análisis de sensibilidad variando semestre_prefiere_último_turno.....	93
Tabla XXX: Calendario modelo manual semestre impar 2023.....	95
Tabla XXXI: Calendario de salida del modelo computacional semestre impar 2023.....	96
Tabla XXXII: Comparación modelos de calendario parciales semestre impar.....	97
Tabla XXXIII: Calendario manual semestre par 2023.....	102
Tabla XXXIV: Calendario de salida del modelo computacional semestre par 2023.....	103
Tabla XXXV: Resumen comparación entre modelo computacional y calendario manual....	104
Tabla XXXVI: Reasignación de UC.....	107
Tabla XXXVII: turnos_disponibles_dt ajustado para replanificación a días posteriores.....	108
Tabla XXXVIII: Asignación en días posteriores de UC afectadas.....	108

Glosario de términos

AA: Asistente académico. Es el rol encargado dentro de la Unidad de Enseñanza de elaborar los calendarios de parciales y exámenes de la Fing.

Algoritmos Genéticos: Métodos de optimización que simulan la evolución natural, utilizando procesos de selección, cruce y mutación para encontrar soluciones óptimas en problemas complejos.

Algoritmos heurísticos: Métodos que se utilizan para producir soluciones aproximadas, las cuales son aceptables basados en una serie de reglas o suposiciones.

Algoritmos metaheurísticos: Métodos heurísticos basados en procesos iterativos y componentes aleatorios para explorar y optimizar soluciones.

Bolsa negra: Proceso donde varios elementos individuales son tratados como una sola entidad agregada a modo de simplificación. Esta estrategia se aplica comúnmente en situaciones donde manejar elementos individuales es demasiado complejo o detallado, y una visión más generalizada es más práctica.

CSV: Formato de archivo para almacenar datos en forma de texto, donde cada registro está separado por comas, usado por su simplicidad y compatibilidad con muchas aplicaciones.

EVA: Espacio Virtual de Aprendizaje.

FADU: Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo.

FCEA: Facultad de Ciencias Económicas y Administración.

Fing: Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República.

INCO: Instituto de Computación.

IP: Ingeniería de Producción.

PL: Programación Lineal

PEM: Programación Entera Mixta

Turno: Bloque temporal en donde se asignan parciales o exámenes, por lo general, un día de parciales puede presentar de 1 a 3 turnos.

SGAE: Sistema de Gestión Administrativa de la Enseñanza.

UC: Unidad Curricular, se utiliza en sustitución a la vieja nomenclatura donde se denominaban materias o asignaturas.

UdelaR: Universidad de la República Oriental del Uruguay.

Umbral: Porcentaje de ocupación en el cual el turno deja de ser considerado con el fin de evitar la asignación excesiva de unidades curriculares en el mismo, y así garantizar que la capacidad se cumpla a efectos reales.

1. Introducción

En esta sección se realizará una revisión y análisis de la literatura relacionada con los métodos de calendarización de exámenes. Se busca aplicar este conocimiento al confeccionamiento de una herramienta computacional en el que se obtenga como salida una propuesta de calendario de parciales.

Este enfoque se aplica con el propósito específico de abordar las complejidades inherentes al proceso de confección manual del calendario de parciales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República. El objetivo principal de la investigación es el desarrollo de una herramienta computacional que perfeccione la metodología actual y facilite al usuario distintas matrices subyacentes al calendario destinadas a respaldar a los asistentes académicos en la toma de decisiones asociadas a esta problemática.

En la actualidad, el proceso de elaboración del calendario de evaluaciones, tanto parciales como exámenes, se realiza mediante un procedimiento arduo e iterativo, que naturalmente consume recursos humanos y tiempo considerable. Aunque esta metodología ha logrado generar calendarios que atienden las necesidades académicas de un porcentaje de estudiantes, el presente trabajo evidencia que algunos estudiantes se ven obligados a ajustar sus planes semestrales o experimentan obstáculos en el avance de sus carreras debido a la superposición de evaluaciones y a la insuficiencia de tiempo entre evaluaciones.

La adecuada calendarización de parciales no solo impacta en la organización y logística de la institución educativa, sino también en la experiencia académica de los estudiantes y en la eficiencia de los procesos administrativos. Una calendarización efectiva puede contribuir a la mejora del rendimiento académico y a la satisfacción general de la comunidad educativa.

Es por ello que se busca desarrollar una solución computacional que facilite el diseño de los calendarios de evaluaciones de la Facultad de Ingeniería, accesible a su vez para los asistentes académicos. Se pretende que el modelo emule el proceso analítico de diseño de los calendarios, incorporando restricciones adicionales que añadan valor, pero que actualmente no se consideran debido a la dificultad asociada a su implementación manual, sin que esto suponga una complejización en la utilización de la herramienta. Asimismo, se pretende incorporar la posibilidad de replanificación, de modo que la herramienta pueda ser utilizada posteriormente al diseño inicial ante casos excepcionales como paros de transporte o académicos.

Por último, se busca lograr una eficiencia en el modelo de tal manera que el tiempo de resolución sea menor al requerido actualmente por el método manual y que no constituya un obstáculo para su utilización.

2. Marco teórico

La planificación de horarios de exámenes, también conocida como *examination timetabling* o *examination scheduling* en inglés, se enmarca dentro del campo de la optimización combinatoria (COP) que se ocupa de encontrar la mejor solución posible entre un conjunto finito de posibles soluciones. En este contexto, la calendarización de exámenes implica la asignación eficiente de parciales a un período acotado de tiempo, considerando restricciones y preferencias específicas tales como la no superposición de ciertas unidades curriculares y la capacidad física de salones disponibles en el turno (Asmuni et al, 2005).

Los problemas de programación de horarios educativos pueden clasificarse en tres tipos (Schaerf, 1999), cada uno con sus propias características y restricciones específicas:

- Programación de horarios escolares: Estos problemas se relacionan con la asignación de clases semanales en las instituciones. El objetivo es asignar un conjunto de profesores a un conjunto de salones, para un conjunto de cursos en determinados períodos, satisfaciendo ciertas restricciones.
- Programación de exámenes: El objetivo principal es asignar un conjunto de exámenes a un conjunto dado de intervalos de tiempo. Cada examen tiene una lista de estudiantes inscriptos.
- Programación de cursos: El propósito es asignar cursos y eventos asociados, grupos de estudiantes y profesores a intervalos de tiempo de manera que no haya conflictos en ningún período.

Un problema de planificación de horarios de exámenes o pruebas presenta cuatro parámetros principales: T , un conjunto finito de horarios disponibles; R , un conjunto finito de recursos; M , un conjunto finito de pruebas a asignar; y C , un conjunto finito de restricciones. El problema consiste en asignar horarios y recursos a las instancias de evaluación de manera que se cumplan las restricciones (Burke et al, 2004).

2.1. Factibilidad del problema

El problema de asignación de instancias de evaluación (exámenes o parciales) en un calendario, es un problema conocido en la teoría de la optimización combinatoria. Se trata de un problema *NP-hard* o NP-complejo, lo que significa que no se conoce un algoritmo eficiente que pueda encontrar la solución óptima global en un tiempo polinómico para instancias arbitrariamente grandes del problema. Dicho de otra manera: encontrar la solución óptima global para el problema de asignación de exámenes puede requerir un tiempo de ejecución exponencial en relación con el tamaño de la entrada, lo cual es poco realista para grandes modelos. Esto se debe a que el número de posibles combinaciones y asignaciones crece de manera exponencial a medida que aumenta la complejidad del problema. Además, se considera que este tipo de problemas no tiene soluciones particularmente eficientes, ni presenta un algoritmo específico que se pueda utilizar, dado que cada institución tiene sus propias restricciones especiales (Alghamdi et al., 2020).

En el contexto del problema de asignación de exámenes, la "solución óptima global" se refiere a la asignación de horarios de exámenes o parciales que minimiza o maximiza (dependiendo del objetivo específico) ciertos criterios, como la cantidad total de conflictos de horarios, el solapamiento entre exámenes, o cualquier otro criterio establecido. Por ejemplo, si el objetivo es minimizar el solapamiento de horarios entre los exámenes para evitar conflictos para los estudiantes, entonces la solución óptima global sería aquella que logra la mínima cantidad de solapamientos posibles en toda la programación de exámenes.

La "solución óptima global" implica que, entre todas las posibles asignaciones de horarios de exámenes, la elegida es la que optimiza el criterio definido. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, encontrar esta solución óptima global puede ser un problema computacionalmente costoso y, en muchos casos, poco práctica para modelos con un gran número de instancias a asignar.

Para demostrar que el problema de programación de exámenes es *NP-hard*, se reduce al problema del viajante de comercio, conocido por las siglas en inglés TSP, que refiere a *Travelling Salesman Problem*. La analogía se presenta considerando a cada asignatura como una ciudad del TSP y al intervalo de tiempo deseado entre cada asignatura como la distancia entre las ciudades (Wren, 1996). La solución óptima al TSP es una asignación de UCs en un calendario que minimiza el tiempo total que se necesita para impartir todas las asignaturas.

En la transición del modelo TSP a la calendarización de exámenes, la regla de visitar cada ciudad una sola vez se transforma en la obligación de programar cada parcial en una franja horaria única, garantizando que cada examen se lleve a cabo sin conflictos de programación. Asimismo, el concepto de retorno al punto de partida en el TSP se adapta al ámbito de la calendarización como la necesidad de que todos los exámenes sean asignados a franjas horarias dentro del límite del período designado para exámenes, asegurando que el proceso de evaluación se complete dentro del calendario establecido.

En este caso, si existe un algoritmo óptimo para resolver el problema de asignación de asignaturas en un calendario, también existe un algoritmo óptimo para resolver el TSP. Sin embargo, la literatura indica que el TSP es *NP-hard*, el problema de asignación de UCs en un calendario también lo es por analogía. El enfoque más directo para computar una solución en esta situación es con algoritmos exactos, los cuales prueban con todas las permutaciones posibles de asignaciones y devuelven el óptimo usando fuerza bruta. Sin embargo, el tiempo de ejecución de este enfoque se encuentra dentro de un factor polinómico equivalente al factorial del número de unidades curriculares a asignar, por lo que esta solución resulta computacionalmente costosa incluso para sólo 20 UC (Kuo, 2023).

A pesar de no ser *NP-hard*, es posible encontrar soluciones aproximadas que sean de utilidad. En la práctica, se recurre a enfoques heurísticos y metaheurísticos para obtener soluciones aceptables en un tiempo razonable. Estas soluciones pueden no ser óptimas globalmente, pero tienden a ser suficientemente buenas para abordar las limitaciones computacionales del problema. Se utilizará este enfoque en el presente proyecto.

2.2. Antecedentes

Según Werra (1985) la calendarización es un campo de interés para la investigación de operaciones dado que hay incontables problemas por resolver dentro de la planificación de horarios. Su tratamiento involucra a su vez disciplinas desde matemáticas, combinatoria e informática y utiliza conocimientos de bases de datos e implementación de algoritmos.

Sin embargo, la calendarización educativa ha captado la atención de investigadores entre la amplia variedad de problemas de calendarización, por ser de las tareas administrativas propias de la gestión educativa que consumen más tiempo y requieren de resultados de alta calidad, teniendo una frecuencia periódica de al menos 2 veces al año (Qu, 2008).

El primer caso de automatización de calendario fue realizado por Gottlieb en 1963 y posteriormente las metodologías empleadas han experimentado una notable evolución que refleja tanto los avances tecnológicos como los cambios en las demandas y expectativas de las instituciones y sus partes interesadas. En 1967, Welsh y Powell utilizaron el concepto de coloración de grafos para reducir el problema de calendarización (Islam, 2016). A lo largo de los años, se han desarrollado y aplicado una variedad de métodos heurísticos y metaheurísticos para abordar la calendarización de exámenes de manera más efectiva. Estos métodos incluyen algoritmos genéticos, búsqueda tabú, recocido simulado, colonia de hormigas, entre otros. Estas técnicas heurísticas han demostrado ser útiles para encontrar soluciones de buena calidad en un tiempo razonable, incluso para problemas grandes y complejos.

En paralelo, con el avance de la informática y el surgimiento de las computadoras, se han desarrollado herramientas y software específicos para la calendarización de exámenes, lo que ha facilitado el proceso y permitido una mayor automatización. Estos sistemas suelen integrar una variedad de técnicas algorítmicas y heurísticas para generar horarios eficientes y libres de conflictos.

La consolidación del interés por el campo de estudio, se ve reforzada mediante la creación en 1995 de una Conferencia internacional sobre la temática denominada PATAT por sus siglas en inglés: *Practice and Theory of Automated Timetabling* y la conformación de un grupo de trabajo denominado EURO Asociación Europea de Sociedades de Investigación Operativa vinculada a la investigación sobre la calendarización automatizada.

A nivel internacional, existen varios autores que impulsan tanto publicaciones en el campo de la calendarización de horarios y exámenes como la propia Conferencia PATAT.

Uno de los principales exponentes es Edmund K. Burke, Profesor de la Universidad de Leicester en el Reino Unido, líder en investigación en el campo de la calendarización de horarios y exámenes. Desde 1995, ha liderado la organización de la Serie Internacional de Conferencias conocida como PATAT.

Las investigaciones del estado del arte reportan un conjunto de más de 100 artículos y libros vinculados al tema, considerando también las exposiciones en los grupos de trabajo y conferencias internacionales como el PATAT (Islam, 2016), por lo cual se procederá a hacer un resumen de los principales métodos, los hallazgos y aplicaciones.

2.3 Métodos utilizados

En este subcapítulo se describen los enfoques discutidos a lo largo de la elaboración del modelo de calendarización de parciales, los mismos incluyen enfoques desde naturaleza manual hasta computacionales.

Los métodos se pueden dividir a grandes rasgos en 4 clases (Carter et al, 1996):

- 1) Métodos secuenciales
- 2) Métodos de cluster
- 3) Métodos restrictivos
- 4) Métodos metaheurísticos

2.3.1. Métodos secuenciales

Los métodos secuenciales ordenan eventos utilizando heurísticas de dominio y luego asignan los eventos secuencialmente en períodos de tiempo válidos para que ningún evento genere conflicto con los demás (Carter, 1986). En los métodos secuenciales, los problemas de programación de horarios suelen representarse como grafos donde los eventos se representan como vértices, mientras que los conflictos entre los eventos se representan mediante aristas.

2.3.1.1. Teoría de grafos

La teoría de grafos busca la asignación de UC sin conflictos de horario. D. Werra ejemplifica varios métodos a través de la teoría de grafos. Este modelo emplea una representación gráfica en la cual cada instancia se ilustra como un nodo inicialmente aislado (Werra, 1985). Posteriormente, se identifican los estudiantes inscriptos en cada unidad curricular, asignándoles un identificador único, y en el paso siguiente, se establecen conexiones, o aristas, entre aquellos nodos o UC que comparten estudiantes. La metodología para la asignación de horarios se basa en la técnica de coloración de grafos, en donde se asigna a cada nodo un color correspondiente a un día y turno específicos del calendario, asegurando que nodos adyacentes (UC con estudiantes compartidos, es decir, en conflicto) no coincidieran en el mismo color (Seijas, 2017).

La [Figura 1](#) ilustra el modelo de coloración de grafos mediante un simple ejemplo de 3 instancias o UC.

En el paso 1, se delimitan 3 nodos aislados, donde cada uno corresponde a una única unidad curricular, con los códigos: 1151, 1061 y 1023. Posteriormente, en el paso 2, se indican los alumnos que rinden cada una de ellas, por ejemplo, 2 alumnos rinden la UC 1023: 1514311-2 y 4779559-9. Como tercer paso, se unen con una arista aquellas UC que comparten inscriptos, por ejemplo, se une la UC 1151 y 1023 porque comparten al alumno con el identificador 4779559-9. Luego, en los pasos 4, 5 y 6, se colorean, de manera ordenada, a cada UC, asegurándose que en cada iteración no se coloree a un nodo con el mismo color que alguno adyacente.

En esta configuración, el 'Día 1, Turno 1' se asigna al color naranja, mientras que el 'Día 1, Turno 2' se asigna al color azul. Por otro lado, el color gris indica que la UC aún no tiene turno asignado.

El artículo de Welsh y Powell (1967) representó una contribución muy importante a la literatura sobre la calendarización de horarios. Construyó el puente entre la coloración de grafos y la calendarización de horarios, lo que condujo a una cantidad significativa de investigaciones posteriores sobre heurísticas de grafos en la calendarización de horarios (Islam, 2008).

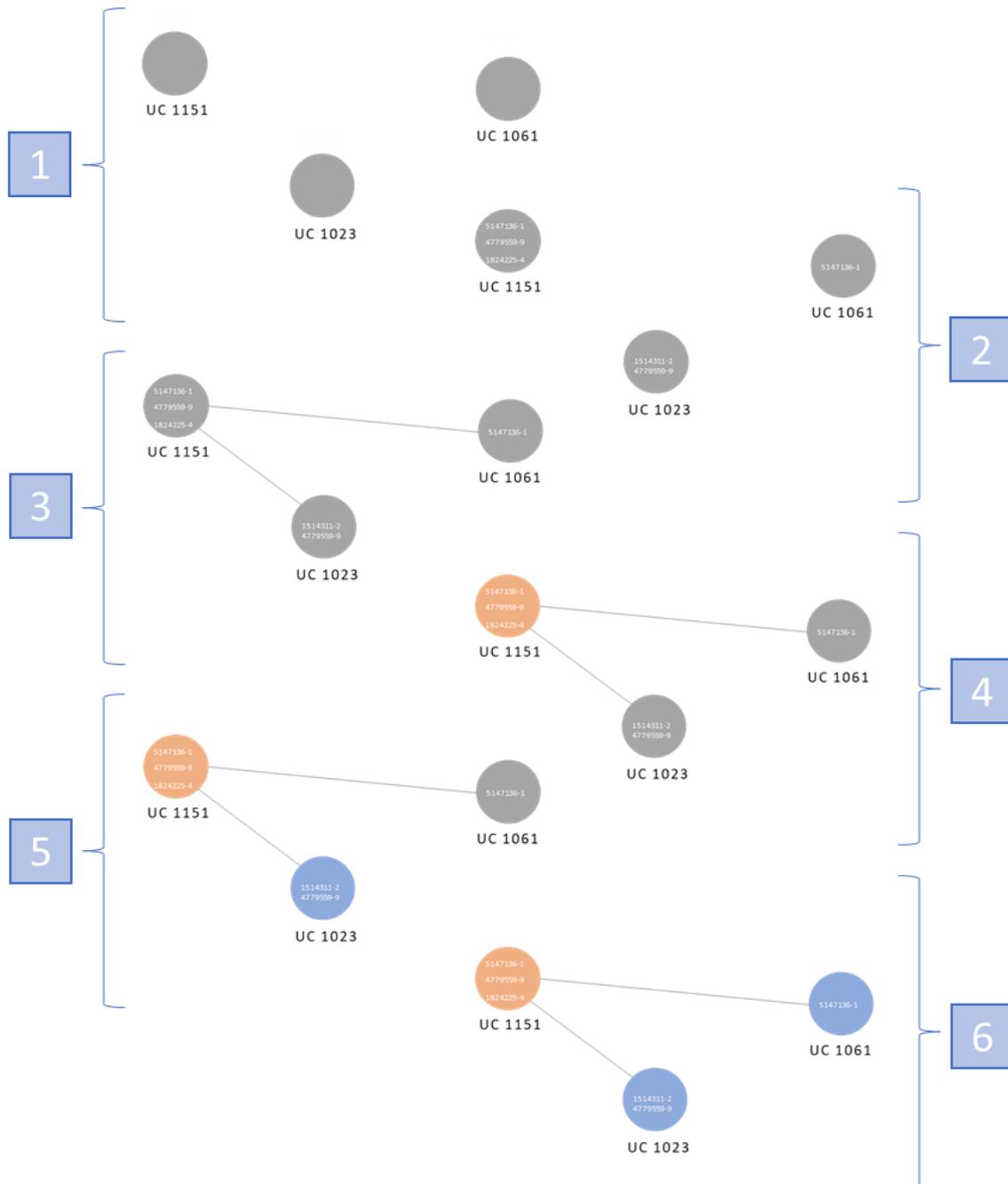


Figura 1: ejemplo método de coloración de grafos

2.3.2. Métodos de cluster

En estos métodos, el conjunto de eventos se divide en grupos que satisfacen restricciones estrictas, y luego se asignan a períodos de tiempo para cumplir con restricciones blandas. La principal desventaja de estos enfoques es que los grupos de eventos se forman y fijan al principio del algoritmo, lo que puede resultar en un horario de baja calidad (Burke et al., 2002).

2.3.3. Métodos restrictivos

En estos métodos, el problema se modela como un conjunto de variables o eventos a las cuales se les deben asignar valores que representan recursos como salones para satisfacer una serie de restricciones. Usualmente, se definen reglas para asignar recursos a eventos. Cuando ninguna regla es aplicable a la solución parcial actual, se realiza un retroceso hasta encontrar una solución que satisfaga todas las restricciones (Burke et al., 2002).

Un ejemplo de estos métodos podría ser la programación entera mixta. Entre 1990 y 2010, se introdujo el uso de la programación lineal (PL) y la programación entera mixta (PEM) en la resolución de estos problemas. Estas técnicas permitieron la incorporación de restricciones adicionales y más complejas, como las preferencias horarias de los estudiantes, la asignación de salones y la duración de los exámenes.

Por ejemplo, la programación lineal y entera mixta puede utilizarse para asignar exámenes a horarios de manera óptima, minimizando costos y maximizando la utilización de recursos disponibles tal como ejemplifica la [Figura II](#). En dicha figura, se explicitan 2 variables, x_1 y x_2 , las cuales deben asignarse de manera tal que se maximice la función objetivo dada por la sumatoria de ambas. Asimismo, se tienen restricciones duras modeladas como rectas en el intervalo de interés, por ejemplo x_1 debe ser mayor a 2 (recta vertical) y x_2 mayor a 1 (recta horizontal). De igual modo, se tienen 2 posibles valores objetivos para el conjunto de variables, dependiendo de si estas son de naturaleza real o entera, y dichos valores corresponden a alguno de los vértices de la figura conformada por las rectas de restricción.

Notar que este enfoque no es recomendable para la asignación en turnos específicos ya que generalmente involucra decisiones binarias. La programación entera mixta, por su parte, permite abordar restricciones más complejas, como la asignación de horarios específicos a ciertos exámenes o la consideración de preferencias horarias de los estudiantes (Taha, 2017).

Desafortunadamente en estos modelos, el número de variables puede ser exponencial en algunos problemas y, por lo tanto, la búsqueda sería enorme.

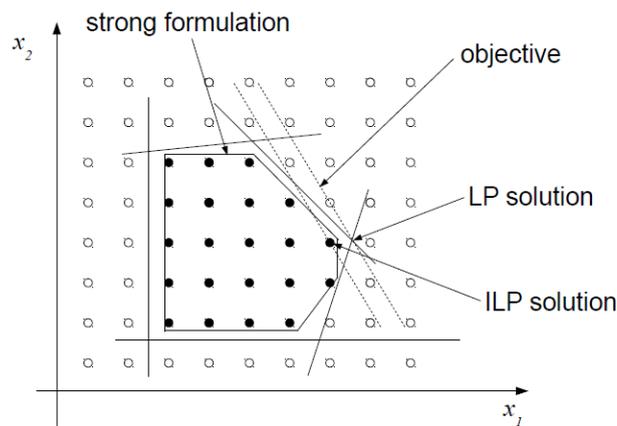


Figura II: ejemplo de Programación Entera Mixta (Taha, 2014)

2.3.4 Métodos heurísticos y metaheurísticos

Inicialmente, la planificación de horarios de exámenes se realizaba manualmente o mediante métodos heurísticos básicos. En estas etapas tempranas, el enfoque principal era minimizar la superposición de horarios para evitar conflictos en la programación. Estas técnicas tempranas, aunque funcionales, carecían de la sofisticación y la eficiencia de los métodos posteriores.

En la práctica, los algoritmos heurísticos suelen ser suficientes para encontrar soluciones que sean satisfactorias para la mayoría de los casos para este tipo de problemas. La heurística refiere a algoritmos que no garantizan la solución óptima como resultado, pero que suelen encontrar soluciones muy buenas en un tiempo razonable en base a una serie de pasos y reglas establecidas. Asimismo, su funcionamiento de "caja blanca" permite al usuario comprender en profundidad cómo es el proceso de toma de decisiones, por lo que es fácilmente adaptable a cuestiones cambiantes. La distinción entre "caja blanca" y "caja negra" en algoritmos se refiere al nivel de conocimiento sobre el funcionamiento interno de un sistema. En el caso de la "caja blanca", se busca una comprensión completa, detallada y transparente del algoritmo, incluyendo su estructura, lógica y toma de decisiones. Por otro lado, la "caja negra" implica un enfoque en la funcionalidad y los resultados, sin revelar la implementación interna. En este caso, solo se observan las entradas y salidas del sistema, sin necesidad de conocer los detalles internos del proceso (Peng Zhang, 2010).

Se presentan dos ejemplos ilustrativos del empleo de algoritmos heurísticos en la asignación de recursos.

La aplicación de algoritmos heurísticos en la asignación de recursos no se limita al ámbito académico; también se extiende a otros contextos, como el empresarial y el hospitalario. En el ámbito empresarial, se puede implementar un algoritmo heurístico con el propósito de asignar tareas a los empleados, buscando maximizar la eficiencia operativa. Este enfoque busca optimizar la distribución de responsabilidades entre el personal de manera que se alcancen niveles establecidos de productividad y rendimiento. Específicamente, se puede construir un algoritmo heurístico en el que se comience identificando todas las tareas

pendientes y los recursos disponibles, incluyendo a los empleados con sus habilidades y cargas de trabajo actuales. Luego, se establecen criterios de prioridad para las tareas en función de su importancia y urgencia, y se asignan inicialmente las tareas a los empleados según estos criterios y las capacidades identificadas. A lo largo del tiempo, se realizaría una reevaluación continua del rendimiento y se ajustan las asignaciones según sea necesario, considerando la carga de trabajo total y buscando una distribución equitativa entre los empleados (Gasparotti, 2011).

Por otro lado, en un entorno hospitalario, se puede aplicar un algoritmo heurístico para la asignación de pacientes a habitaciones con el objetivo de disminuir las interrupciones y optimizar el flujo de atención médica. Esta estrategia implica una asignación cuidadosa de pacientes a habitaciones de manera que se reduzcan al mínimo las interrupciones en los procesos médicos, asegurando así una atención fluida y eficaz. Dicho algoritmo podría comenzar evaluando la gravedad y necesidades médicas de cada paciente, clasificándolos según el tipo de atención requerida. Consecuentemente, se evalúa la disponibilidad de habitaciones en función de la infraestructura y recursos hospitalarios, asignando inicialmente pacientes a habitaciones disponibles. A través de un reajuste iterativo de asignaciones, se busca minimizar las interrupciones, considerando la proximidad de las habitaciones y asegurando una distribución equitativa de recursos. El modelo puede construirse a su vez de naturaleza adaptable a cambios dinámicos en el estado de los pacientes o la disponibilidad de habitaciones, realizando ajustes continuos para optimizar la asignación en tiempo real (Martino, 2023).

En ambos casos, los algoritmos heurísticos sirven como herramientas valiosas para la toma de decisiones en la asignación de recursos, adaptándose a situaciones específicas con el fin de lograr objetivos predefinidos, ya sea aumentar la eficiencia en el entorno laboral o disminuir las interrupciones en un entorno hospitalario.

Por otro lado, las metaheurísticas (Blum y Roli, 2003) son algoritmos más elaborados y representan una gran parte de las técnicas utilizadas para resolver la mayoría de los COPs (Problemas de Optimización Combinatoria) desde el 2000 en adelante (Islam, 2008).

Las técnicas basadas en búsqueda local por ejemplo, búsqueda tabú, recocido simulado y sus variantes a menudo se clasifican como metaheurísticas (Burke y Kendall, 2005). Las técnicas de búsqueda local, en general, abordan la resolución de problemas iniciando desde una solución existente y explorando las soluciones adyacentes del "vecindario" (Islam et al, 2008).

Su concepción proviene de diversas fuentes de inspiración. Algunas se realizan por analogía con otros campos científicos como la metalurgia (recocido simulado), la biología (algoritmos de colonia de hormigas y evolutivos), la neurología (búsqueda tabú) y la sociología (algoritmos meméticos, optimización por enjambre de partículas y sistemas multiagente) (Coello, 2007).

Se clasifican estos algoritmos en dos clases: algoritmos basados en soluciones y algoritmos basados en poblaciones.

2.3.4.1. Optimización por colonia de hormigas

La optimización por colonia de hormigas es una técnica inspirada en el comportamiento de las hormigas. En este enfoque, se simula el comportamiento de las hormigas al buscar caminos óptimos entre fuentes de alimento, aplicando feromonas artificiales para guiar la búsqueda. En la planificación de horarios de exámenes, la optimización por colonia de hormigas puede utilizarse para encontrar horarios óptimos al simular el comportamiento de múltiples "hormigas" que exploran diferentes soluciones en paralelo (Alba, 2005).

2.3.4.2. Búsqueda Tabú

La búsqueda tabú y el recocido simulado son técnicas de búsqueda local utilizadas para explorar soluciones en espacios de búsqueda complejos. Estas metodologías son especialmente útiles en problemas donde es necesario explorar un gran número de posibles soluciones. La búsqueda tabú y el recocido simulado permiten encontrar soluciones de alta calidad mediante la exploración iterativa del espacio de búsqueda y la aplicación de criterios de búsqueda eficientes (Potvin, 2005).

La búsqueda tabú (Gendreau y Potvin, 2005) explora el espacio de búsqueda evitando volver a visitar una lista de movimientos recientes, los cuales son mantenidos -como indica su nombre- en una *lista tabú* según [Figura III](#). Dicha figura describe un pseudocódigo del algoritmo de búsqueda tabú. El algoritmo comienza generando una posible solución de manera aleatoria y con una lista tabú vacía. Posteriormente, se establece un umbral de búsqueda cercano a la solución inicial y se evalúan los valores de las soluciones vecinas. Si alguna de estas soluciones es mejor que la solución actual y no está en la lista tabú, se toma como nueva solución tentativa. Además, el movimiento necesario para llegar a esta nueva solución se incluye en la lista tabú, para evitar ciclos y explorar nuevas áreas del espacio de búsqueda. Este proceso se repite hasta que se cumpla un criterio de terminación, como alcanzar un número máximo de iteraciones o encontrar una solución suficientemente buena.

```

Input : TabuListsize
Output : Sbest
1. Sbest ← ConstructInitialSolution();
2. TabuList ←  $\phi$ ;
3. while  $\neg$  StopCondition() do
4.   CandidateList ←  $\phi$ ;
5.   for Scandidate  $\in$  Sbestneighbourhood do
6.     if  $\neg$  ContainsAnyFeatures (Scandidate, TabuList) then;
7.       CandidateList ← Scandidate;
8.     end
9.   end
10.  Scandidate ← LocateBestCandidate(CandidateList);
11.  if Cost(Scandidate)  $\leq$  Cost(Sbest) then
12.    Sbest ← Scandidate;
13.    TabuList ← FeatureDifferences(Scandidate, Sbest);
14.    while TabuList > TabuListsize do
15.      DeleteFeature(TabuList);
16.    end
17.  end
18. end
19. Sbest;

```

Figura III: Pseudocódigo búsqueda Tabú (Islam et al, 2016)

2.3.4.3. Algoritmos genéticos y meméticos

Los algoritmos genéticos son técnicas de optimización inspiradas en la evolución natural. Estos algoritmos emplean conceptos de selección, cruce y mutación para explorar y mejorar soluciones en un espacio de búsqueda. En el contexto de la planificación de horarios de exámenes, los algoritmos genéticos pueden utilizarse para generar horarios óptimos que satisfagan múltiples objetivos, como la minimización de la superposición de exámenes y la distribución equitativa de horarios entre los estudiantes (Kennedy, 2005). Se ejemplifica su funcionamiento en la [Figura IV](#).

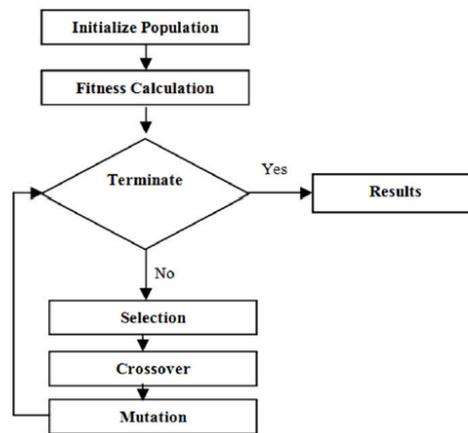


Figura IV: Principios de algoritmos genéticos (Burke et al, s.f)

Por otro lado, el algoritmo memético intenta mejorar el rendimiento de un algoritmo genético mediante la incorporación de una búsqueda local en el vecindario. La idea principal del algoritmo memético es explorar el vecindario de las soluciones obtenidas por un algoritmo genético y dirigir la búsqueda hacia los óptimos locales (para cada solución) antes de regresar al algoritmo genético y continuar el proceso (Burke et al., 2002).

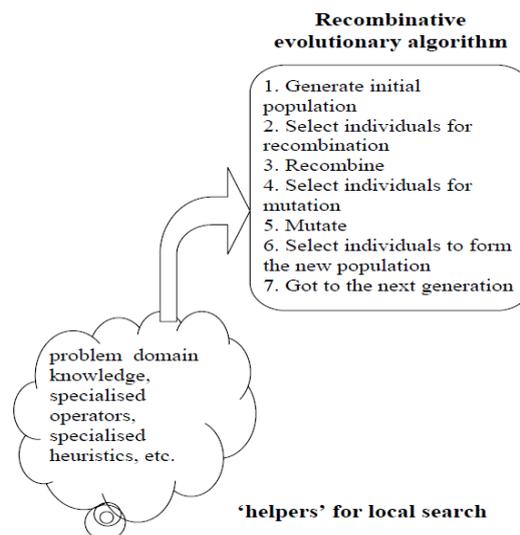


Figura V: Principios de algoritmos meméticos (Burke et al, s.f)

2.3.5. Otros métodos

2.3.5.1. Algoritmos de aprendizaje automático

Los algoritmos de aprendizaje automático, o machine learning, representan herramientas robustas para optimizar la calidad de las soluciones. Estos algoritmos pueden utilizar datos históricos de horarios pasados para identificar patrones y tendencias, y predecir la viabilidad de horarios propuestos. Por ejemplo, un modelo de aprendizaje automático puede entrenarse con datos de horarios pasados para identificar la distribución óptima de

exámenes que minimice la superposición y maximice la equidad entre los estudiantes (Khan Academy, n.d.).

Paralelamente, se implementan sistemas apoyados en inteligencia artificial, como los algoritmos de aprendizaje automático, para incrementar la calidad de las soluciones. Dichos algoritmos utilizan datos históricos de horarios de parciales y evalúan su efectividad, para aprender a identificar qué configuraciones de horario funcionan mejor. Por ejemplo, un algoritmo de clasificación podría ser entrenado con datos históricos para predecir la viabilidad de un horario propuesto, basado en criterios como la disponibilidad de salones, la distribución equitativa de exámenes y la minimización de conflictos de horarios (Kenekayoro, 2019).

Resolver problemas de programación de horarios con el uso de técnicas de aprendizaje supervisado permite encontrar funciones alternativas menos costosas para una función de evaluación computacionalmente más costosa para algoritmos heurísticos como el recocido simulado o el algoritmo genético (Kenekayoro, 2019).

El uso de algoritmos de aprendizaje profundo combinados con enfoques de optimización combinatoria ha generado mejoras sustanciales en la calidad de las soluciones. Estos avances han permitido abordar el problema de planificación de horarios con una precisión y eficacia sin precedentes, adaptándose a las necesidades y desafíos cada vez más complejos del entorno académico (Alba, 2019).

2.3.5.2. Enfoque multicriterio

Algunos algoritmos de programación de horarios son relativamente simples y abordan sólo un subconjunto de las restricciones, logrando un costo computacional razonable a expensas de la "completitud". Para superar esta desventaja, el *Automated Scheduling, Optimisation and Planning Research Group* (ASAP) ha considerado los problemas de programación de horarios como problemas de decisión multicriterio (Burke et al., 2000). Se asume que existen soluciones que satisfacen restricciones estrictas, entonces la calidad de las soluciones puede evaluarse en función de qué tan bien satisfacen las restricciones flexibles. La restricción estricta común a todas las universidades y por ende a la mayoría de los casos, es que los eventos que requieren los mismos recursos (estudiantes, salones o docentes) no deben programarse en el mismo período de tiempo. En consecuencia, se han definido varios criterios con respecto a las otras restricciones, expresando la medida de las violaciones de la restricción correspondiente (Burke et al., 2002).

Por ejemplo, uno de los criterios utilizados por este enfoque en el planteo del grupo ASAP es la proximidad de exámenes, es decir: mediante diferentes criterios se analiza el número de conflictos donde los estudiantes tienen dos exámenes en períodos adyacentes, en un mismo día y en días adyacentes.

Por lo general los criterios son de naturaleza diferente y son incompatibles debido a sus diferentes unidades de medida y/o diferentes escalas. Además, los criterios pueden ser parcial o totalmente conflictivos. Por ejemplo, dos exámenes que deberían programarse inmediatamente antes/después uno del otro pueden tener estudiantes comunes, lo que hace que los criterios y sean conflictivos (Burke et al., 2002).

En estos casos, las ponderaciones de los criterios son definidos subjetivamente por el responsable del armado del calendario y reflejan diferentes regulaciones y requisitos de las universidades.

2.3.5.3. Aplicación del Razonamiento Basado en Casos

Se analiza también un enfoque sobre el uso de calendarios anteriores para la construcción de un nuevo calendario, realizando la menor cantidad de cambios posible. Esto aplicaría para aquellos casos donde hay pocos cambios en el problema (como las tendencias de inscripciones, los cursos o eventos son los mismos) de un año a otro. El *case-based reasoning (CBR)* se ha aplicado con éxito a varios problemas de planificación, incluida la planificación y programación de operaciones de transporte aéreo a gran escala, la programación dinámica de talleres, problemas de reparación en la programación de talleres y problemas de planificación y control de la producción (Burke et al., 2002).

2.3.6. Recientes investigaciones y desarrollo del área de trabajo

Una conclusión general obtenida de la revisión de los diferentes enfoques y evolución del estado del arte, es que hay beneficios considerables que se pueden obtener al descomponer problemas grandes en problemas más pequeños y al hibridar enfoques. Particularmente, Burke considera que la combinación más beneficiosa con antecedentes es la de enfoques metaheurísticos, heurísticos y de búsqueda local, para producir métodos de búsqueda avanzados que son mayores que la suma de sus partes individuales (Burke et al., 2002).

Durante los últimos veinte años, se ha discutido e investigado sobre la complejidad y los modelos utilizados para abordar los problemas de programación de horarios. Sin embargo, hasta ahora, aún no hay modelos completos universalmente aceptados (Qu et al., 2009).

2.3.6.1 Sistemas, lenguajes y herramientas de programación de horarios

Desde 1995 se han desarrollado diferentes sistemas, lenguajes y herramientas específicas para la calendarización de horarios. Los equipos de investigación y académicos han empleado algunos paquetes o librerías como ECLIPSe para la programación lógica con restricciones y construir sistemas de programación de horarios (Qu et al., 2009).

Algunos ejemplos son:

- TTL, lenguaje específico presentado por Cooper y Kingston (1996)
- *UniLang*, lenguaje específico presentado por Reis y Oliveira (2001)
- *EASYLOCAL++*, software presentada por Di Gaspero and Schaerf (2003)

2.3.6.2 PATAT

El PATAT o "International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling", es una conferencia internacional dedicada a la práctica y teoría de la programación automatizada de horarios. El origen del PATAT se remonta a su primera edición en 1995, cuando la conferencia inaugural se llevó a cabo en Edimburgo, Escocia. Surge como un espacio de divulgación y presentación del trabajo llevado adelante por el *EURO Working Group on Automated Timetabling (EWG-PATAT)*.

Desde entonces, el PATAT se ha convertido en el mayor evento en el campo de la programación automatizada de horarios. Se celebra regularmente cada dos o tres años en diferentes ubicaciones alrededor del mundo, y atrae a investigadores, profesionales y académicos interesados en compartir sus investigaciones, avances y experiencias en el campo. La última edición fue la décimo tercera y se celebró en Bélgica en 2022 (Borzová, 2019).

En cada edición del PATAT, se presentan ponencias, talleres y sesiones plenarias sobre una amplia gama de temas relacionados con la programación automatizada de horarios, que van desde algoritmos y técnicas de optimización hasta aplicaciones prácticas en diferentes sectores como la educación, el transporte y la industria (PATAT, 2022).

El PATAT ha sido fundamental para fomentar la colaboración entre investigadores y profesionales de diferentes países y disciplinas, promoviendo el intercambio de ideas y el avance del conocimiento en el campo de la programación automatizada de horarios. Su impacto se refleja en la continua expansión y evolución del campo, así como en la mejora de la eficiencia y la efectividad de la gestión del tiempo en diversos contextos (Bulck, 2020).

De hecho a partir de esta iniciativa han surgido numerosos grupos de trabajo en diferentes contextos académicos como es el caso de *Automated Scheduling, Optimisation and Planning Research Group* (ASAP) de la Universidad de Nottingham el cual es integrado por el Profesor E. K. Burke uno de los autores principales en la literatura del tema.

2.3.6.3. Desarrollo de un benchmark

El alto nivel de interés investigativo en la programación de exámenes ha llevado al establecimiento de una variedad de problemas de referencia diferentes que han sido ampliamente estudiados (Qu et al, 2009). La creación de benchmarks resulta fundamental para evaluar y comparar la efectividad de diferentes algoritmos en áreas de estudio específicas. Al desarrollar un conjunto de instancias de prueba, que reflejan tanto escenarios comunes como retos particulares encontrados en aplicaciones reales, se facilita la medición de rendimiento de diversas soluciones. Estas pruebas permiten analizar no solo la eficiencia y calidad de los algoritmos, sino también su capacidad para escalar y adaptarse a diferentes tamaños y complejidades de problemas. Los benchmarks establecidos, con variantes de medidas definidas estándar, han proporcionado un mecanismo para realizar comparaciones científicas significativas y facilitar el intercambio de logros de investigación (Qu et al, 2009).

Carter (1996) introdujo un conjunto de 13 problemas reales de programación de exámenes de tres escuelas secundarias canadienses, cinco universidades canadienses, una universidad estadounidense, una universidad británica y una universidad en Arabia Saudita, que fueron ampliamente utilizados como bancos de pruebas en la investigación de programación de exámenes (Qu et al, 2009).

Como ejemplo se describe el enfoque del benchmark utilizado por la Universidad de Toronto. Para indicar la densidad de los exámenes de cada problema y por ende determinar su complejidad, se determina una *Matriz de Conflicto* C donde cada elemento $c_{ij} = 1$ si el examen i entra en conflicto con el examen j (es decir que tienen estudiantes en común), o

$c_{ij} = 0$ de lo contrario. La Densidad de Conflictos representa la proporción entre el número de elementos de valor "1" y el número total de elementos en la matriz de conflictos.

En función a ello, se definen dos objetivos en el conjunto de datos original: por un lado, minimizar el número de intervalos de tiempo necesarios para el problema y por otro, minimizar el costo promedio por estudiante. Para el primer objetivo, se busca encontrar horarios factibles en el período de tiempo más corto posible, mientras para el segundo, se definió una función de evaluación para calcular el costo de los horarios generados (Qu et al, 2009).

3. Definición del Problema

Cada año, se observa un crecimiento significativo en la cantidad de estudiantes que se matriculan en carreras de ingeniería. La Universidad de la República constituye la institución educativa que presenta el mayor número de los ingresos de estudiantes en carreras de grado en Uruguay, con un 54% del total, en base a los registros de la CUTI de 2021.

En 2021, un total de 2.593 estudiantes se matricularon en la FIng. En el año siguiente, dicho número alcanzó la suma de 2.868 estudiantes, representando un crecimiento de un 10%. La [Tabla I](#) indica el historial de ingresos y egresos de la FIng.

Tabla I: Ingresos y egresos estudiantes a Facultad de Ingeniería por año

Año	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Ingresos	2.054	2.183	2.366	2.212	2.593	2.868
Egresos	364	404	345	363	396	351

Además, la diversidad de unidades curriculares ofrecidas y la especialización de cada estudiante también han aumentado considerablemente. Estos factores han dado lugar a un problema cada vez más complejo en la planificación de las evaluaciones semestrales y anuales. La complejidad del problema depende en gran medida de la cantidad de libertad que tienen los estudiantes en la elección de UC. En general, una mayor libertad de elección aumenta la dificultad de producir un horario de exámenes que se ajuste a un intervalo de tiempo limitado sin crear conflictos de horario para algunos estudiantes (Laporte, 1984). Asimismo, el problema se diversifica considerando variables como la disponibilidad locativa visibilizando el crecimiento anual sostenido de la matrícula.

En este proyecto de grado se pretende confeccionar un calendario que satisfaga las necesidades académicas de los estudiantes, de modo tal que el resultado evite la desmatriculación o un pobre rendimiento de los mismos por cuestiones de planificación temporal.

3.1. Planes de estudio y calendario lectivo FING

Desde su surgimiento en 1915 a la fecha, la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República presenta una oferta de 16 carreras de grado y 7 formaciones técnicas. En total, se dictan más de 290 unidades curriculares correspondientes a las carreras de grado de carácter semestral a más de 13.000 estudiantes.

Las unidades curriculares presentan diferentes métodos de evaluación, pero dada la alta matrícula, en más del 70% de los casos el método de evaluación consiste en dos pruebas parciales por semestre durante los períodos establecidos por el calendario lectivo y luego tres períodos de exámenes anuales en diciembre, febrero y julio, respectivamente.

Las pruebas parciales se definen como una prueba que evalúa parcialmente el contenido de una UC. La sumatoria lineal o ponderada de los puntajes obtenidos en las pruebas

parciales, adicionado o no a otras evaluaciones, dan como resultado el recursado de la UC, aprobación del curso o exoneración, en caso de aplicar, del examen.

A modo de ejemplo, se presentan las fechas de inicio y finalización de los calendarios de parciales, aprobados por el consejo, correspondientes al año 2023 en la [Tabla II](#).

Tabla II: Fechas de períodos de parciales

Parciales	Fecha inicio del período	Fecha de fin del período
Primer Semestre	22.04.2023	03.05.2023 + 06.05.2023
	24.06.2023	08.07.2023
Segundo Semestre	16.09.2023	27.09.2023 + 30.09.2023
	18.11.2023	02.12.2023

Por otro lado, los exámenes se definen como una prueba que evalúa todo el contenido de una UC. Existen UC que tienen exámenes obligatorios como requisito para su aprobación, sin embargo, en la mayoría de los casos el examen es una instancia de evaluación que aplica en el escenario en el que el resultado obtenido del curso sea suficiente como para aprobar pero insuficiente para exonerar la UC. El resultado del examen es definitorio y se evalúa generalmente de manera aislada: aprobado o no aprobado. En la mayoría de los casos, se requiere de un calificación del 60% para conseguir la aprobación del examen y por consiguiente de la UC en cuestión.

Más de 50 parciales y 200 exámenes deben programarse por período considerando las UC de las carreras de grado.

Los planes de estudio y las currículas sugeridas de cada carrera se encuentran elaboradas por las Comisiones de Carreras y aprobadas por el Consejo. Las comisiones se encuentran conformadas por el Director de Carrera correspondiente y miembros de los órdenes docentes, egresados y estudiantes, quienes tienen como cometido principal detectar debilidades y fortalezas de la implementación de las diferentes carreras, así como velar por las condiciones para su correcto funcionamiento.

Los planes de estudio de las distintas carreras de Ingeniería de la Fing están fuertemente interconectados al compartir UC del tronco común denominado. Por lo tanto, el problema de programación de horarios de parciales o exámenes es complejo de resolver.

3.2. Descripción método actual

El proceso de armado del calendario de parciales y exámenes en la Facultad de Ingeniería es un trabajo que se lleva a cabo de forma integrada entre docentes y asistentes académicos. Los asistentes académicos suelen ser estudiantes, por lo cual comprenden las motivaciones intrínsecas de los usuarios finales.

Al comienzo del semestre, los asistentes académicos responsables de esta tarea realizan un calendario preliminar de manera manual, el cual se comparte con los docentes

responsables de los cursos. Luego de su aprobación inicial, se publica en la página de la Facultad de Ingeniería como calendario tentativo, siendo revisado nuevamente sobre la fecha de los primeros y segundos parciales respectivamente y publicando el calendario definitivo aproximadamente 2 semanas antes del comienzo del período.

Por lo general, el proceso de calendarización comienza al establecer las fechas de inicio y final del período de parciales a planificar. Luego, se realiza una copia del calendario anterior equivalente, es decir, el de la misma instancia y semestre del año anterior, y se hacen los ajustes pertinentes en cuanto al período referido.

Si bien no existe una metodología rigurosa en el proceso de armado del calendario tentativo, existen ciertos lineamientos y reglas que son tenidas en cuenta. En primer lugar, a partir del calendario base, se comienza asignando aquellas UC de mayor "jerarquía". Con jerarquía, se hace referencia a atributos como la cantidad de estudiantes inscriptos, la exigencia que requiere la preparación por parte del estudiante para rendir el día del parcial y la cantidad de créditos que otorga, entre otros aspectos. Entre estas UC se encuentran por ejemplo Geometría y Álgebra Lineal 1 (1030), Cálculo Diferencial e Integral en una Variable (1061), Física 1 (1151) y Matemática Discreta (1220). Éstas UC se asignan preferentemente en los últimos días del calendario, separadas en un intervalo de al menos 3 días corridos en caso de existir estudiantes cursando conjuntamente las UC implicadas, de modo que el mismo disponga de un intervalo de tiempo significativo entre una prueba parcial y otra para rendir de manera adecuada. Asimismo, se intenta asignar alguna de estas asignaturas de mayor jerarquía en algún sábado, ya que se asegura la disponibilidad del aulario, edificio polifuncional compartido con otras facultades, dado que por lo general son las UC con mayor número de inscriptos, tratándose en algunos casos de más de 2.000 estudiantes.

Para cada turno en donde ya se haya asignado alguna UC, se busca asignar las UC de las cuales el examen de la UC previamente asignada es previa. De este modo, se garantiza que en este turno, no hayan estudiantes que deban rendir ambos parciales de manera simultánea. Se recuerda que Bedelías desinscribe de forma automática a los estudiantes inscriptos en cualquier UC para la cual no se cumpla con las previas estipuladas por la comisión de la carrera.

En tercer lugar, se asignan las UC restantes en los turnos con menor ocupación. Por último, para cada turno del calendario se calcula la sumatoria aproximada de inscriptos en todas las UC asignadas en el mismo y se compara con la capacidad de los salones de la Facultad. En caso de excederse, se desasigna la o las primeras UC con menos inscriptos, de forma tal que la capacidad no se exceda, y se reasigna a otro turno. Se repiten estos procesos de forma iterativa hasta llegar a un resultado factible.

Desde el día de publicación del calendario tentativo, y hasta alrededor de 2 semanas previo a la divulgación del calendario definitivo, el asistente académico admite la recepción de solicitudes de modificación realizadas por los estudiantes y docentes, las cuales serán objeto de análisis con el propósito de efectuar eventuales ajustes en un plazo no superior a cinco días laborables previos a la publicación del calendario definitivo.

La asistente académica reporta que en lugar de empezar el proceso desde 0 se basa en un calendario análogo (mismo semestre y mismo período) perteneciente al año anterior. Para que un calendario sea utilizable año tras año, debe ser lo suficientemente robusto como

para que, ante cualquier cambio en los datos de entrada, solo sea necesaria una pequeña alteración para adaptarlo. La posibilidad de utilizar el calendario del año anterior depende de la robustez del mismo y de cuánto cambien los datos de los calendarios de un año a otro. Una universidad que cuenta con un sistema automatizado informa que tiene "datos altamente confiables". Esto implica que construir un calendario completamente nuevo es la mejor opción para esa universidad. Otras universidades indican que, en lugar de reprogramar completamente, parte del antiguo calendario se reutiliza, mientras que otra parte se reconstruye. Las asignaciones, obviamente, mostrarán similitudes de un año a otro, ya que el factor determinante, la combinación de cursos ofrecidos a los estudiantes, se mantendrá en muchos casos, si no en la mayoría (Merlot, 2006).

3.3. Descripción del caso

3.3.1. Elementos del problema

Se recuerda que, de acuerdo a la definición de Edmund K. Burke (2004), el problema de calendarización de parciales presenta cuatro parámetros principales a considerar:

- T, un conjunto finito de horarios disponibles
- R, un conjunto finito de recursos
- M, un conjunto finito de parciales a asignar
- C, un conjunto finito de restricciones

En virtud de estos parámetros y el caso de estudio de la Fing, se procede a determinar los elementos específicos del problema.

3.3.1.1 Horarios disponibles

De acuerdo a los antecedentes históricos reportados por la asistente académica y los calendarios publicados en los últimos 2 años, se visualiza que las instancias de los parciales comienzan a las 8:00, 9:00, 13:00, 14:00 o 18:00 horas. Esto permite determinar claramente 3 turnos:

- Turno matutino: comprende los parciales que inician a las 8:00 o 9:00 horas
- Turno vespertino: comprende los parciales que inician a las 13:00 o 14:00 horas
- Turno nocturno: comprende los parciales que inician a las 18:00 horas

Los parciales tienen una duración aproximada de entre 2 a 4 horas, por lo cual se debe contemplar que la duración mínima de un turno sea de 4 horas.

En conversaciones con la asistente académica, se reporta que intenta asociar los turnos nocturnos a las instancias de las UC sugeridas del 5to semestre de las carreras en adelante, mientras que se busca alocar los parciales de las UC de los 4 semestres iniciales en los turnos matutinos o vespertinos. Esto se debe principalmente a que los estudiantes avanzados suelen trabajar en la tarde y/o mañana y por ende tienen preferencia por los turnos nocturnos. Por otro lado, los estudiantes novatos que residen en el interior tienen mayor disponibilidad de transporte interdepartamental durante el día, por lo que se busca

facilitar la disponibilidad del mismo para permitir el retorno a sus hogares luego de las evaluaciones.

3.3.1.2 Recursos disponibles

En la primera entrevista con la asistente académica se identificó un problema que debió ser tomado en consideración a la hora del modelado: no se conoce con certeza la disponibilidad locativa de la facultad. Esto se debe principalmente a que el uso del Edificio Polifuncional José Luis Massera, sede de diversas instancias de parciales, es compartido con otras facultades de la UdelaR tales como Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo (FADU) y Facultad de Ciencias Económicas y Administración (FCEA). Por lo general, los períodos de parciales de estas facultades no coinciden necesariamente con los de la FIng, por lo cual suele haber clases de FADU y FCEA durante el período de parciales de la FIng.

Bajo esta premisa la asistente académica intenta ubicar los parciales de las UC con mayor matrícula los sábados o incluso establece 2 turnos si la cantidad de estudiantes supera los 2.000 inscritos. Esto le asegura mayor disponibilidad dado que las otras dependencias no tienen clases los sábados.

Por otro lado, se encuentra la infraestructura requerida dentro del espacio asignado: mesas, o pupitre con mesa lateral y eventualmente incluso computadora para algunas UC. Las condiciones del mobiliario varían según los salones y por ende la capacidad real de cada salón puede verse disminuida. Es por ello que resulta muy difícil distinguir la asociación de la asignación de parciales por UC con salones. Por lo general, la asistente académica suele hacerlo posteriormente al calendario, una vez que éste ya está definido y validado con todas las contrapartes, con ayuda de otros colaboradores de la Unidad de Enseñanza.

Se opta entonces como simplificación modelar la capacidad de la FIng como un único escalar asociado a cada turno, definiendo su capacidad máxima así como un umbral de uso. El umbral de uso considera casos donde no se podría alcanzar la capacidad máxima teórica debido a que existen bancos rotos, ausencia de mobiliario completo o subutilización de la capacidad de los mismos, entre otras causas propias del mantenimiento del edificio. Es posible calcular la capacidad real multiplicando la capacidad teórica por el umbral y tomar ese dato como referencia por turno para la asignación de instancias de evaluación, considerando que todos los inscriptos asisten al parcial.

Se encuentran también los docentes y el personal de apoyo como un recurso disponible a considerar. Tanto en el modelado del calendario manual como para la definición del problema, se toma que los docentes responsables de las UC y sus equipos estarán disponibles en todo momento salvo que manifiesten lo contrario. De hecho, por lo general el calendario inicial manual se modela bajo esta premisa y luego en las sucesivas interacciones con los docentes G3 responsables se valida su disponibilidad o se analizan casos de fuerza mayor como enfermedad, imposibilidad por superposición con otros trabajos, viajes o mismo otras UC de facultad, dado que son casos muy específicos. La coordinación y distribución de los roles en cada instancia de evaluación parcial es de gestión interna de cada Instituto y responsable de UC.

3.3.1.3 Conjunto de unidades curriculares

El tamaño del problema se encuentra estrechamente relacionado con el número de eventos a asignar (Graham, 1995). Este conjunto representa toda UC que deba ser asignada en el calendario de parciales. Si bien no todas las UC de las carreras tienen como método de evaluación pruebas parciales, son la mayoría de los casos. En la FING, los estudiantes suelen tener de 2 a incluso 6 parciales por período en función de las currículas sugeridas, y muchas veces de manera simultánea con entregas de trabajos obligatorios para las UC que no tienen parciales.

A lo largo de la evolución del presente trabajo se utilizan conjuntos de datos de entradas con diferentes dimensiones en virtud de los modelos a validar. Además, se subraya que las UC que integren el modelo deben contar con información actualizada sobre su respectivo:

- Identificador
- Código Unidad Curricular
- Nombre
- Créditos
- Semestre correspondiente
- Cantidad de inscriptos

3.3.1.4 Restricciones

Por lo general este tipo de problemas presentan restricciones duras o *hard*, que deben cumplirse para considerar válida la solución del problema. Las restricciones blandas o *soft* pueden ser violadas y se utilizan para evaluar la calidad de la solución (Arbaoui, 2014).

Ejemplos de restricciones *hard* o duras ampliamente encontradas en la literatura son las siguientes:

- Los estudiantes no pueden presentarse a dos exámenes al mismo tiempo.
- Cada examen debe ser asignado a un período y al menos a una sala.
- Las capacidades de las salas siempre deben respetarse en cualquier período.

Ejemplos de restricciones *soft* o blandas que se recogen comúnmente de la investigación son las siguientes (Qu, 2008):

- Distribuir los exámenes conflictivos de manera lo más uniforme posible, o no en x espacios de tiempo o días consecutivos.
 - Grupos de exámenes que deben tener lugar al mismo tiempo, en el mismo día o en un mismo lugar.
 - Exámenes que deben ser consecutivos.
 - Programar todos los exámenes, o los exámenes más grandes, lo antes posible.
 - Se debe satisfacer un ordenamiento (precedencia) de exámenes.
 - Número limitado de estudiantes y/o exámenes en cualquier espacio de tiempo.
 - Requisitos de tiempo (por ejemplo, exámenes que no deben estar en ciertos espacios de tiempo).
 - Los exámenes pueden dividirse en ubicaciones similares.
-

- Solo los exámenes de la misma duración pueden asignarse a la misma sala.
- Requisitos de recursos (por ejemplo, instalaciones de la sala).

En base a las sucesivas interacciones con la asistente académica, el tutor y los integrantes de la unidad de enseñanza se definen un conjunto de restricciones base que guían el diseño del modelo. En la [Tabla III](#) se ejemplifican con su respectiva fórmula matemática y tipo de restricción. A pesar de que en un escenario ideal se buscaría que todas las restricciones sean de tipo *hard* u obligatorias, se define para mayor factibilidad del problema algunas de tipo *soft* o deseables.

Tabla III: Tipos de restricciones

Restricción	Tipo	Descripción
$C_t > \sum_{k=1}^n (\text{estudiantes_UC_k})$	<i>Hard</i>	Capacidad máxima segregada en turnos
$x \geq \sum_{k=1}^n (\text{instancias_k})$	<i>Hard</i>	Máximo de instancias de parciales por turno
$3 \leq d_j - d_i$	<i>Soft</i>	Distancia mínima deseada de 3 días entre los parciales de UC <i>i</i> y UC <i>j</i> con conflicto
$T < t_j$	<i>Soft</i>	Preferencia de primeros turnos si UC <i>j</i> es de semestre ≤ 4
$T = t_j$	<i>Soft</i>	Preferencia de último turno si UC <i>j</i> es de semestre > 4

3.4. Importancia de calendarios en los estudiantes: Resultados de la encuesta

Con el objetivo de conocer la importancia de la planificación de los parciales y su vínculo con el avance académico, se realizó una encuesta a una muestra de 69 estudiantes de Ingeniería cuya caracterización según carrera es la correspondiente a la [Figura VI](#).

Dicha encuesta tuvo lugar entre el 17 y el 22 de julio del 2023 y fue difundida principalmente en grupos de Ingeniería de Producción de la Fing y grupos de UCs obligatorias para la carrera. Este sesgo se debe a que el modelado inicialmente se enfocó en estudiantes de IP, y por ende en las UCs correspondientes a la misma.

Al inicio, se recaban datos para caracterizar la muestra, tales como edad, género, año de ingreso y semestre en curso. Se percibe que el 75,4% se corresponde con estudiantes de Ingeniería de Producción, seguido por un 14,5% de Ingeniería Química. También existen porcentajes menores de estudiantes de Ingeniería de Alimentos, Sistemas de Comunicación, Eléctrica e Industrial Mecánica.

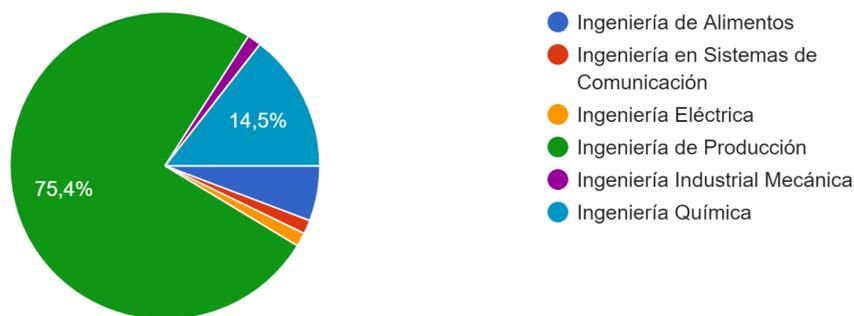


Figura VI: Distribución de la muestra por carrera

En cuanto a la caracterización de la muestra de los 69 estudiantes: su edad varía entre 19 y 37 años, con un promedio de edad de 22 años, de los cuales 60,9% son mujeres.

Con respecto al año de ingreso, el 50% de los estudiantes de la muestra ingresó entre 2018 y 2020, habiendo ingresado en su mayoría en el año 2019 (27,5%) tal como indica la [Figura VII](#).

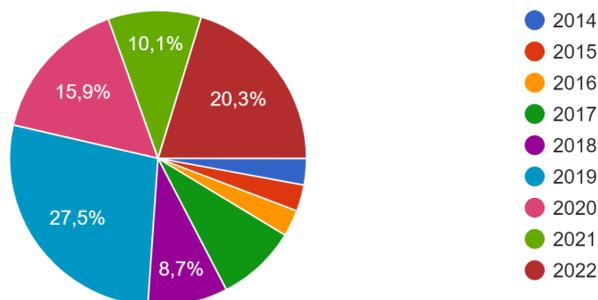


Figura VII: Distribución de año de ingreso Fing

Más del 20% de los estudiantes se encuentra cursando principalmente unidades curriculares del sexto semestre de la carrera como indica la [Figura VIII](#).

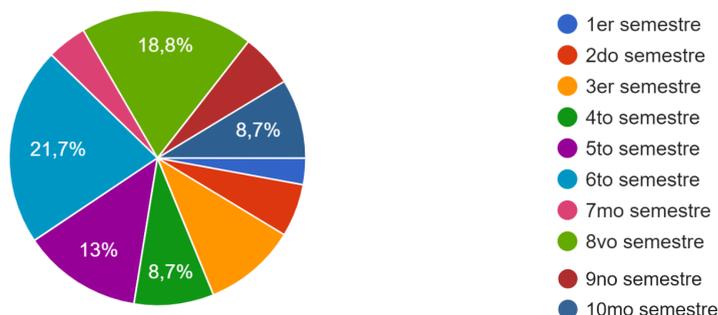


Figura VIII: Distribución de la muestra en semestre en curso

En la segunda sección de la encuesta, se consulta la experiencia y percepción de los estudiantes con respecto a los calendarios de parciales. El 52% de los encuestados

considera que los calendarios tienen una fuerte incidencia en el avance de su carrera, considerando las respuestas que califican como 4 y 5 respectivamente según la [Figura IX](#).

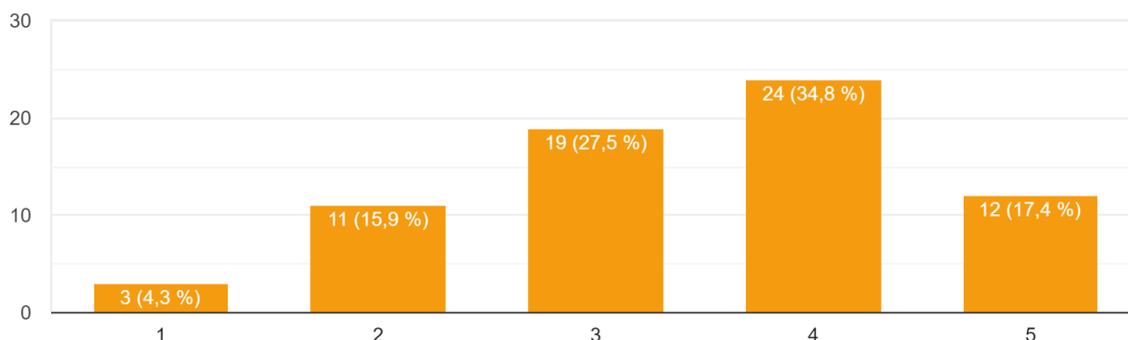


Figura IX: Percepción de incidencia de los calendarios de parciales en el avance de carrera, siendo 1 muy poca incidencia y 5 una alta incidencia

Más del 52% de los encuestados mira ocasionalmente, casi siempre o siempre los calendarios de parciales de años anteriores de acuerdo a la [Figura X](#). Sin embargo, poco más del 50% de los encuestados determina que esto tiene una baja incidencia en la elección de las UC a inscribirse acorde a la [Figura XI](#). En otras palabras: no eligen las UC a inscribirse en virtud de los calendarios.

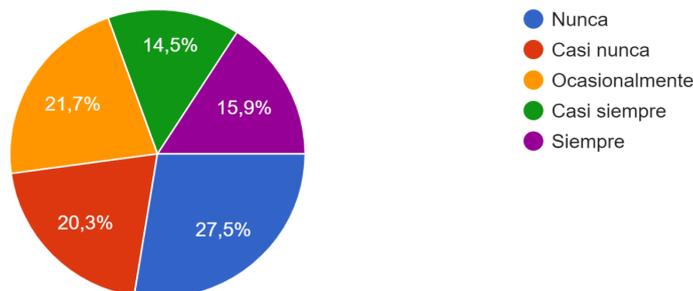


Figura X: Revisión de los calendarios del mismo semestre del año anterior

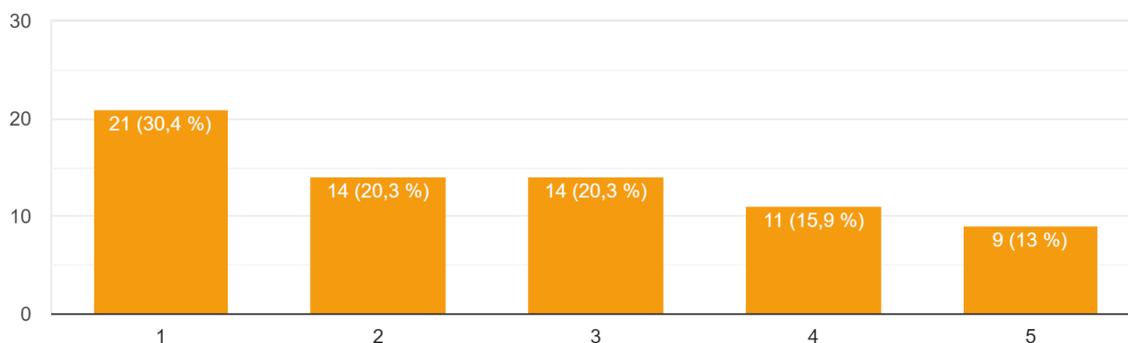


Figura XI: Percepción de influencia de calendario en la elección de las UC a inscribirse, siendo 1 muy poca influencia y 5 una alta influencia

Se constata que los calendarios tentativos son una herramienta de gran utilidad, dado que el 93% de los encuestados consulta los calendarios tentativos según la [Figura XII](#) y cerca de un 32% afirma que estos condicionan fuertemente el abandono de ciertas UC si se considera el nivel 4 y 5 de la [Figura XIII](#).

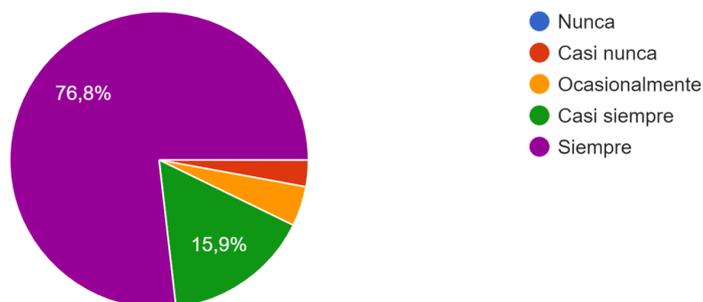


Figura XII: Distribución de nivel de consulta de calendarios tentativos

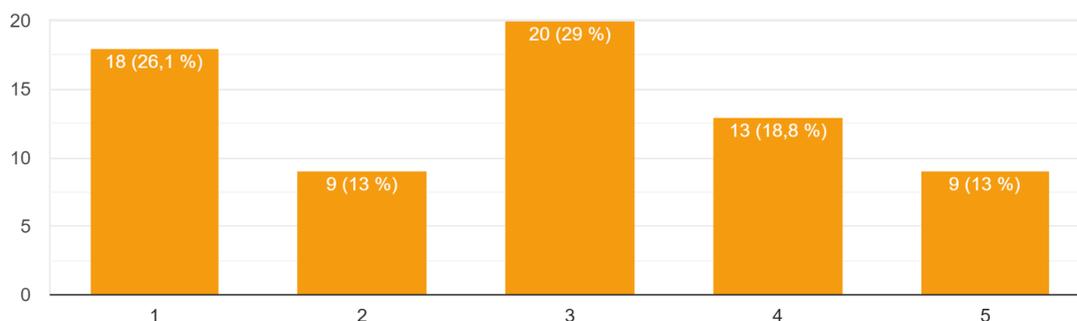


Figura XIII: Percepción de grado de influencia de los calendarios tentativos en el abandono de UCs, siendo 1 muy poca influencia y 5 una alta influencia

Sin embargo casi el 50% de los encuestados afirma nunca haber abandonado una UC en virtud de los calendarios acorde a la [Figura XIV](#).

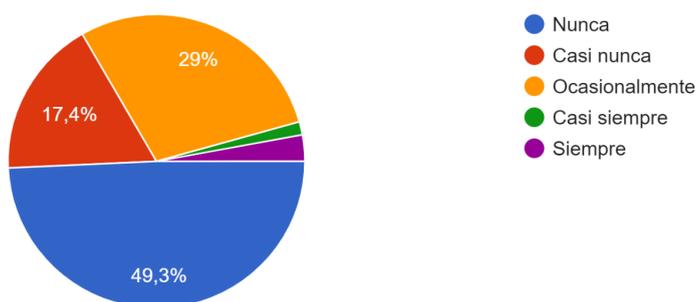


Figura XIV: Abandono de UCs en función de calendario de primeros parciales

Otro punto interesante a relevar se presenta en la [Figura XV](#). El 38% de los encuestados se encuentran totalmente en desacuerdo o en desacuerdo con el hecho de que los parciales de la Fing estén bien organizados, mientras un 40% considera que no está de acuerdo ni en

desacuerdo con la afirmación y sólo un 22% se encuentra de acuerdo y totalmente de acuerdo con la misma.

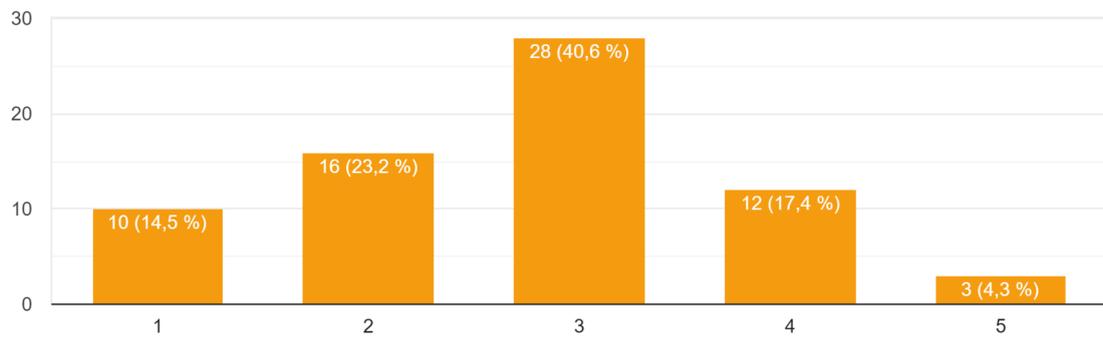


Figura XV: Percepción de nivel de organización de los parciales de Fing, siendo 1 muy bajo nivel de organización y 5 muy alto nivel de organización

Sin embargo, más del 50% afirma no haber solicitado nunca o casi nunca un cambio en el calendario de parciales según la [Figura XVI](#). De los cuales lo solicitaron, 40% afirma que casi nunca o nunca se ha tenido en consideración el cambio planteado según la [Figura XVII](#).

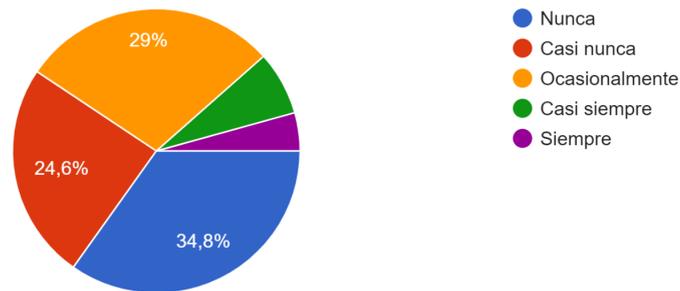


Figura XVI: Solicitud de cambios sobre el calendario definitivo de parciales

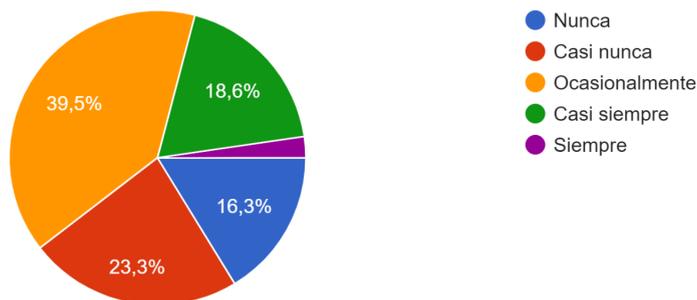


Figura XVII: Consideración de solicitud de cambios del calendario definitivo de parciales

Se consulta a los estudiantes qué aspectos les gustaría que se priorice para la confección del calendario, siendo la más popular la distancia mínima entre parciales de UCs obligatorias, seguida por la consideración de la distancia entre parciales de UCs obligatorias de dos años consecutivos en caso de estar atrasado o adelantado con una materia según la currícula sugerida. En tercer lugar se considera dar preferencia a la ubicación al final del período de las instancias de las UCs con menores tasas de aprobación. En cuanto a la duración hay un consenso general de que el período es relativamente corto y ajustado sobre todo en los primeros períodos, pero hay una distribución bastante equitativa de considerarla tanto en tercer puesto como en cuarto en cuanto a orden de prioridad. Todo esto se visualiza en la [Figura XVIII](#).

Por último, se consulta por la incidencia de tener los calendarios tentativos disponibles durante el período de inscripciones a las UCs como una herramienta para planificar el semestre académico de una manera más eficiente. A partir de la [Figura XIX](#) se identifica que 68% de los estudiantes concluyen que sería muy útil tener disponibles los calendarios y conocer así las fechas con anticipación para organizar su semestre.

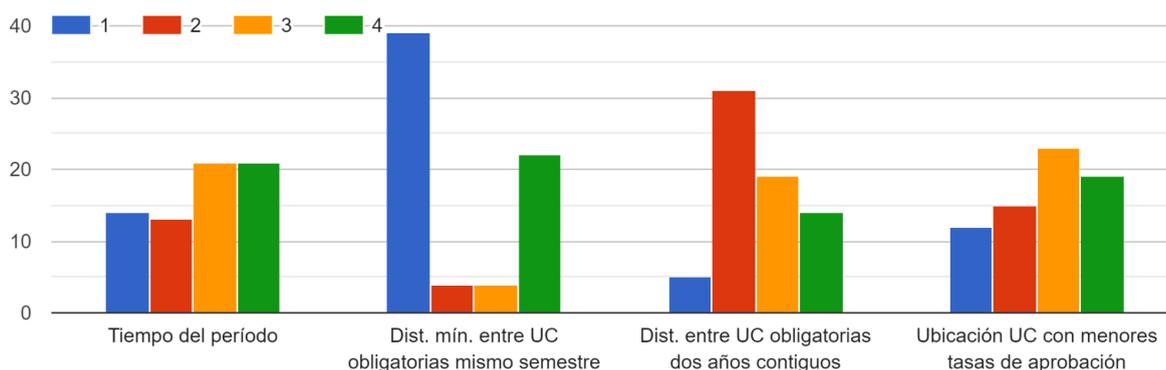


Figura XVIII: Aspectos prioritarios a considerar a la hora de armar el calendario

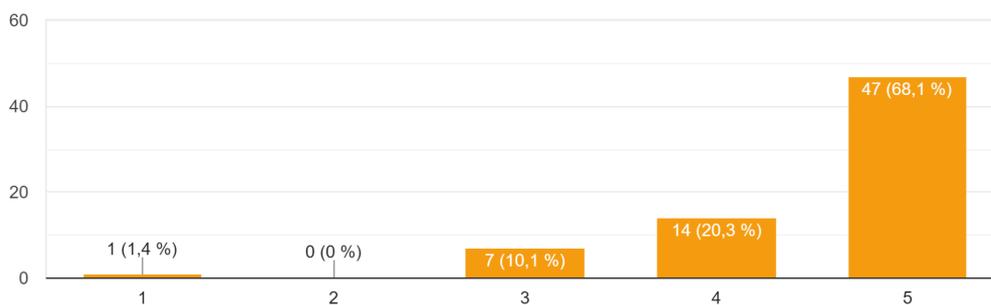


Figura XIX: Importancia de tener calendarios tentativos durante el período de inscripciones a UCs como herramienta para planificar el semestre, siendo 1 muy poco importante y 5 muy importante

Por último, en un campo abierto de sugerencias y comentarios, algunos encuestados dejan sus opiniones u observaciones personales. A continuación se citan y analizan los más destacados.

Existen varios comentarios sobre la consideración de las UC del mismo semestre (par o impar) pero que son sugeridas en diferentes años y que dependiendo del avance de cada estudiante cuál sea la combinación posible. Existe un caso que reporta específicamente que un caso de este tipo le tocaron 2 parciales el mismo día.

“Me parece importante que se considere que la currícula varía según las carreras y según las personas. Hay ciertas unidades curriculares que claramente no puedes cursar en un mismo semestre, por ejemplo CDIVV y CDIV, entonces esas podrían ir en un mismo día. Sin embargo si tenés que recurrir a una unidad curricular del semestre anterior, como no se encuentran recomendadas en un mismo semestre, ya pueden coincidir los parciales, pero es una situación muy normal y que se debería considerar.”

Estudiante de IP, 19 años

“Debí cursar una materia fuera del semestre que está estipulado en la currícula y, desafortunadamente, el primer parcial me coincidió en día, pero no en hora, con otra materia que estaba cursando (esta sí en el semestre que indicaba la currícula)”

Estudiante de IP, 21 años

Por otro lado se hace énfasis en la separación mínima entre parciales de UC obligatorias y el tiempo de corrección de los segundos parciales con respecto a la proximidad a los calendarios de exámenes.

“Importantísimo que las materias de un mismo semestre estén lo más separadas entre sí.”

Estudiante de IP, 23 años

“Apoyo fuertemente que se organicen mejor para dejar más espaciadas las fechas de materias del mismo semestre, estoy por cursar mi cuarto semestre y siempre he tenido los parciales super ajustados entre sí. Generalmente no tuve más de 2 días entre medio de los parciales y realmente a final de semestre es una gran causa de estrés.”

Estudiante de IE, 20 años

“Creo que la organización general de calendarios en cuanto a orden de parciales esta ok, pero existe un tiempo MUY corto entre la entrega de notas de los segundos parciales y la fecha de los exámenes (especialmente en materias en las que se evalúa desarrollo). Han entregado las notas 4 días antes del examen, que no es suficiente tiempo para prepararlo, teniendo que estudiar entonces desde que terminan los parciales hasta obtener las notas por mala organización de la facultad”

Estudiante de IP, 19 años

3.4.1. Conclusiones de la encuesta

En primer lugar, se concluye que los calendarios tienen una gran incidencia en la planificación, desempeño y por ende en el avance académico de los estudiantes en sus carreras. De hecho, en la medida que se encuentra disponible la información, la misma es consultada y considerada para realizar planificaciones estimadas.

Si bien la confirmación de las fechas de los calendarios suele no conllevar al abandono de las UCs, sí se induce a una preferencia o foco de estudio por alguna UC sobre otras (muchas veces las que tienen más créditos o son previas para otras UCs del siguiente semestre), dejando otras UCs de lado por cuestiones de tiempo o disponibilidad. En esta línea, es que se solicita como preferencia una distancia mínima prudente entre parciales de UCs obligatorias del mismo semestre de una carrera.

Actualmente la distancia promedio entre UCs obligatorias del mismo semestres de la misma carrera es de entre 2 y 3 días corridos. Dada la carga de UCs obligatorias de un semestre que en ocasiones llega a 5, en el caso hipotético que todas esas UCs tuvieran parciales y el calendario tuviera entre 13 y 15 días y la distancia entre las instancias de evaluación fuera equidistante, el promedio sería entre 2,6 y 3 días corridos entre parcial y parcial. Se concluye entonces que para lograr una mejor dispersión y espacio entre instancia e instancia se requieren períodos más largos.

Por otro lado se observa que varios estudiantes mencionan el hecho de que no se considera o atiende la casuística de UCs sugeridas para semestres consecutivos (es decir para semestre -2 y +2 respectivamente). Esto es muy difícil de considerar en el modelo manual, porque las probabilidades de conflicto entre UCs aumentan considerablemente. Actualmente el modelo manual es correctivo o reactivo, es decir se diseña lo mejor posible y luego se hacen estos ajustes en base a reclamos o evidencias una vez armado el primer calendario tentativo.

Se perciben asimismo conflictos que aún no han sido subsanados entre el calendario de FIng y de FQuim, que son evidenciados por los estudiantes de la carrera de Ingeniería Química.

3.5. Deserción en la FING

A raíz de los hallazgos de la encuesta, surge la motivación de investigar más sobre el vínculo entre la planificación académica, el desempeño y la deserción en los estudiantes.

Se identifica que uno de los principales factores que inciden en la motivación intrínseca de los estudiantes se vincula con la valoración positiva de las tareas realizadas (Pintrich et al, 1991). Además, los sentimientos o creencias de autoeficacia conciernen a las percepciones de los estudiantes sobre su capacidad para desempeñar las tareas requeridas en el curso (García et al, 1993). Huertas sostiene que:

“la idea que tengamos sobre nuestras propias capacidades influye en las tareas que elegimos, las metas que nos proponemos, la planificación, esfuerzo y persistencia de las acciones encaminadas a dicha meta. En líneas generales, se puede afirmar que al llevar a cabo cualquier actividad, a mayor sensación de competencia, más exigencias, aspiraciones y mayor dedicación se le dará a la misma” (Huertas, 1997, p. 149).

En las últimas décadas, la Facultad de Ingeniería ha llevado a cabo diferentes estudios vinculados a la deserción. En 2011, se realizó un estudio en el que se identificó la población de estudiantes que no ha registrado actividad académica alguna en los 2 últimos años, es decir, aquel que en los dos últimos años no se ha inscripto a ningún curso y/o no ha rendido ningún examen, en las carreras de Ingeniería correspondientes al Plan de Estudios 97. Tomando una ventana de tiempo de 5 años, se concluye que para las generaciones ingresadas entre 1997 y 2006 el promedio de deserción es de 50,2%. A partir del estudio se realiza una caracterización de los desertores, de la cual es posible concluir que del total de la población desertora, el 94,3%, abandona la Fing sin haber superado los créditos correspondientes al primer año de la carrera (0 a 89 créditos), esto implica que abandonan principalmente durante los primeros 4 semestres de la carrera. Además, se constata que el 57,7% de los estudiantes que desertan no obtienen créditos a pesar del intento, es decir, no logran aprobar los cursos por bajos rendimientos en las evaluaciones parciales o exámenes.

Se destaca la existencia de una relación entre la deserción y factores asociados al perfil del propio estudiante, así como a factores endógenos y exógenos de la institución (Boado, 2011).

Según Boado, “en relación con la deserción hay aspectos que hacen al perfil de los estudiantes (inteligencia, motivación, vocación, esfuerzo a largo plazo), hay aspectos que hacen a los factores “endógenos” a la institución (salones, bibliotecas, becas, profesores, horas de clase, horas de consulta, horas de estudio necesario, duración de los planes de estudio), y hay aspectos que hacen a los factores “exógenos” (características de origen social, tendencias del mercado de trabajo)”.

Dentro de los factores endógenos, se encuentra la gestión de las actividades académicas y por ende la planificación de las evaluaciones semestrales. Resulta fundamental entonces priorizar la ubicación y buena distribución de los parciales correspondientes a las UCs de los primeros 2 semestres de manera de permitir mejor organización por parte de los estudiantes.

3.4. Modelado de la realidad

Considerando la complejidad inherente del problema a ser modelado, el cual implica un conjunto amplio de variables y restricciones a tener en cuenta, se ha adoptado un enfoque

de desarrollo en fases para abordar este trabajo. Cada fase se enfocará en asignar a las UC que no han podido ser asignadas adecuadamente en la fase anterior.

En primera instancia, se hará énfasis en un sistema acotado del universo a estudiar, específicamente lo que respecta a las unidades curriculares de carácter obligatorio y electivo, según lo estipulado en los 10 semestres de la currícula sugerida de Ingeniería de Producción (IP). Esto posibilitará la realización de un análisis exhaustivo que no se verá afectado por la magnitud de los datos. Asimismo, el estudio y exhibición de los descubrimientos hará énfasis en el funcionamiento del modelo, sin que se vea afectado su entendimiento por el volumen de información.

Se recuerda que el conjunto de UC mencionadas corresponde en un 60% al tronco común de la mayoría de las ingenierías, por lo que no se tiene pérdida de generalidad.

Luego de validado el modelo inicial, se procederá ejecutando el modelo para un set completo de datos, en el cual no solamente se consideran las UC presentes en Ingeniería de Producción, sino que también se involucra a las Ingenierías restantes presentes en el repertorio de la Fing. Dichas entradas, al ser trabajadas por el algoritmo, provocarán como salida el resultado buscado en este proyecto, el calendario de parciales de la Fing.

Se llevará a cabo un análisis detallado de replanificación utilizando el último conjunto de datos recopilados. Este estudio tiene como objetivo principal evaluar la capacidad del modelo para generar un calendario de parciales completo y funcional a partir de un esquema predefinido suministrado por el usuario. Este proceso implica la implementación y prueba exhaustiva de las funcionalidades del modelo, con el fin de verificar su eficiencia y efectividad en la adaptación y mejora de un calendario inicialmente propuesto por el usuario. La realización de este estudio permitirá no solo validar la robustez del modelo sino también identificar áreas potenciales de mejora, ajuste en su diseño y algoritmos subyacentes.

3.5. Simplificaciones y suposiciones

Para abordar el problema de manera más eficaz y manejable, se implementaron varias suposiciones estratégicas que permitieron su delimitación sin comprometer la eficiencia en relación con el objetivo final.

Inicialmente, se decidió no considerar la restricción de capacidad individual de cada salón en la facultad. En cambio, se asumió que la capacidad total es igual a la suma de los espacios disponibles en todos los salones. Por ejemplo, en una situación donde hay dos salones con una capacidad de 50 alumnos cada uno, el modelo los considera conjuntamente como un solo espacio con capacidad para 100 alumnos. Este enfoque se denomina metafóricamente "*bolsa negra*". Asimismo, se asume que existe disponibilidad de salones suficiente para alocar a las UC de mayor número de inscriptos, sin la necesidad de repartir la misma en 2 instancias de evaluación independientes.

En segundo lugar, se optó por omitir una restricción secundaria relacionada con la disponibilidad de ciertos docentes, los cuales solo pueden asistir a la facultad en turnos específicos. Cabe destacar que algunos docentes podrían experimentar conflictos entre los horarios de sus compromisos extracurriculares y los turnos académicos asignados. Sin

embargo, para fines de este modelo, se presupone la existencia de un número adecuado de docentes para compensar cualquier ausencia potencial.

Respecto a las suposiciones sobre los estudiantes, se asume que todos los alumnos contemplados en los datos de entrada, particularmente en la información detallada en los datos maestros de las unidades curriculares y la matriz de concurrencia (descrita en la sección [4.1.1 Parámetros](#)), asistirán efectivamente a los parciales programados.

Además, se presume que un intervalo de dos días entre dos UC es suficiente para que el estudiante sea capaz de rendir adecuadamente cada uno. Esta suposición se basa en la experiencia y en observaciones previas.

Finalmente, se considera que la disponibilidad de turnos es lo suficientemente amplia como para permitir la asignación de todas las UC sin la necesidad forzosa de programar 2 parciales rendidos por un mismo estudiante en el mismo turno. Estas suposiciones son fundamentales para el funcionamiento eficiente del modelo y contribuyen a su aplicabilidad práctica.

4. Diseño del modelo

La solución propuesta fue implementada en la plataforma en línea conocida como Google Colab, la cual ha sido desarrollada por Google y ofrece un entorno de ejecución gratuito basado en la nube diseñado para la programación en Python. La elección de esta plataforma se sustentó en su accesibilidad y facilidad de uso, permitiendo trabajar de manera colaborativa en un ambiente compartido en línea.

Durante la implementación del modelo, se hizo un uso extensivo de la biblioteca NumPy, que desempeña un papel fundamental en el contexto del lenguaje de programación Python. NumPy se ha concebido específicamente para llevar a cabo cálculos numéricos y operaciones matriciales de manera altamente eficiente. Su finalidad principal consiste en simplificar la manipulación y el procesamiento de datos numéricos en el entorno de Python. Esta biblioteca ofrece una amplia gama de funcionalidades, incluyendo paquetes de optimización, lo que resulta esencial para la resolución de problemas matemáticos complejos y la obtención de resultados precisos en el contexto de la modelización matemática y análisis numérico. La elección de utilizar NumPy se basa en su capacidad probada para agilizar y optimizar los cálculos necesarios en la implementación del modelo propuesto.

4.1. Formulación

A lo largo del modelo, se utilizó la siguiente formulación para definir las variables y parámetros principales:

identificador_ijk

En donde “*identificador*” toma un valor que identifique a la variable o parámetro e “*ijk*” representa el tamaño de cada dimensión del mismo.

4.1.1. Parámetros

El modelo presenta los siguientes parámetros, los cuales deben ser precargados con valores dados por el usuario previo a la ejecución.

T

Cantidad de turnos totales de la jornada.

t

Turno específico, el cual siempre es menor igual a T .

D

Cantidad de días totales del calendario.

d

Día específico, el cual siempre es menor igual a D .

turnos_disponibles_dt

Se trata de un vector bidimensional de tamaño $D \times T$, en donde D es la cantidad de días presentes en el calendario y T la cantidad de turnos presentes en cada día. La celda *turnos_disponibles_dt*[d,t] en un principio fue binaria, donde toma el valor 1 si el turno t del día d está disponible para asignar y 0 en caso de que no.

Por ejemplo, si el séptimo día corresponde al domingo y hay 3 turnos por día ($T = 3$) entonces: *turnos_disponibles_dt*[6,0] = *turnos_disponibles_dt*[6,1] = *turnos_disponibles_dt*[6,2] = 0. Notar que se usa el índice 6 en el día y 0, 1 y 2 en el turno porque Python toma como primer índice el valor 0. Asimismo, el modelo también permite el caso en que solo algunos turnos del día están disponibles, como se ejemplifica en la [Tabla IV](#) a modo de ejemplo.

Tabla IV: Matriz de disponibilidad de turnos binaria a modo de ejemplo

	[0]	[1]	[2]	
[0]	1	1	1	} D
[1]	1	1	1	
[2]	1	1	0	
[3]	0	0	0	
[4]	1	1	1	
	} T			

En el ejemplo, todos los turnos del día 4 y el tercer turno del día 3 no están disponibles.

A sugerencia de la asistente académica de la universidad, se decidió hacer una pequeña modificación al parámetro mencionado, en lugar de que cada celda tome un valor binario, se indica la capacidad de estudiantes para cada turno t y día d del calendario. De esta forma,

es posible caracterizar las capacidades de los turnos de manera independiente, lo cual puede resultar útil en caso de que se disponga del dato de disponibilidad de profesores y/o salones adicionales. La [Tabla V](#) muestra un ejemplo del parámetro *turnos_disponibles_dt*.

Tabla V: Matriz de disponibilidad y capacidad de turnos a modo de ejemplo

	[0]	[1]	[2]
[0]	1.000	2.100	1.500
[1]	2.100	500	1.500
[2]	2.100	1.000	0
[3]	0	0	0
[4]	500	1.000	500

T

D

matriz_concurrencia_mm

Vector bidimensional, simétrico, de tamaño $M*M$, donde M representa la cantidad de unidades curriculares a ser asignadas en el calendario. Se trata de una matriz donde cada columna y cada fila corresponden a las unidades curriculares, cuya diagonal (todos los campos de la forma *matriz_concurrencia_mm[m1,m1]*) toma el valor 0, mientras que en los campos restantes describe la cantidad de estudiantes que rinden tanto la UC correspondiente a la fila i como la UC correspondiente a la columna j .

Esta matriz tiene un valor fundamental en el diseño del modelo porque cruza los datos de los inscriptos por unidad curricular que presenta bedelías con la distribución de esos mismos inscriptos en las UC restantes. Dicha matriz representa un aporte sustancial a la tarea de confección de calendario, porque logra dimensionar la conflictividad entre unidades curriculares en base a datos. Dada la complejidad de los planes de estudio y de la malla de unidades curriculares obligatorias, optativas y electivas para cada carrera y a su vez para cada perfil, resulta muy difícil dimensionar las potenciales combinaciones de conflictos posibles y más aún considerarlo en un modelo manual.

La [Tabla VI](#) expone un ejemplo con 5 unidades curriculares:

Tabla VI: Matriz de concurrencia a modo de ejemplo

	[0]	[1]	[2]	[3]	[4]
[0]	0	4	2	1	5
[1]	4	0	2	1	5
[2]	2	2	0	0	2
[3]	1	1	0	0	1
[4]	5	5	2	1	0

M

M

En este caso, hay 4 estudiantes que rinden tanto la UC A [0] como la UC B [1]. Naturalmente, si el examen de C es previa de D, el campo correspondiente a los estudiantes que rinden tanto C como D es 0.

uc_masterdata_mx

Matriz de 6 columnas que presenta todos los datos maestros necesarios de las UC: identificador, código de la unidad curricular, nombre de la UC, créditos, semestre sugerido e inscriptos.

Tabla VII: Matriz de datos maestros de las unidades curriculares

ID	UC	Nombre	Créditos	Semestre	Inscriptos
[0]	1023	MATEMÁTICA DISCRETA 1	9	6	880
[1]	1025	PROB. Y ESTADÍSTICA	10	3	723
[2]	1030	GEO. Y ALGEBRA LINEAL 1	9	1	2.079
[3]	1031	GEO. Y ALGEBRA LINEAL 2	9	2	586
[4]	1061	CAL. DIF. E INT. EN UNA VAR.	13	1	1.874
[5]	1062	CAL. DIF. E INT. EN VARIAS VAR.	13	2	533

El modelo desglosa dicha matriz en los siguientes vectores para facilitar el entendimiento del programa:

unidad_curricular_m

Vector unidimensional de tamaño M donde cada celda *unidad_curricular_m[m]* toma el código de cada unidad curricular en forma de cadena de texto.

Tabla VIII: Vector de unidades curriculares

ID	UC
[0]	1023
[1]	1025
[2]	1030
[3]	1031
[4]	1061
[5]	1062

} M

uc_nombre_m

Parámetro análogo a *unidad_curricular_m* pero en lugar de tener la celda *m* cargada con el código de la UC, se carga con el nombre de la misma. Dicho parámetro va a ser conveniente para comprender las primeras salidas del modelo.

La [Tabla IX](#) expone un ejemplo de 6 UC.

Tabla IX: Vector de nombres de unidades curriculares

ID	Nombre
[0]	MATEMÁTICA DISCRETA 1
[1]	PROB. Y ESTADÍSTICA
[2]	GEO. Y ALGEBRA LINEAL 1
[3]	GEO. Y ALGEBRA LINEAL 2
[4]	CAL. DIF. E INT. EN UNA VAR.
[5]	CAL. DIF. E INT. EN VARIAS VAR.

} M

inscriptos_m

Vector de inscriptos donde cada campo *inscriptos_m[i]* toma el valor de la cantidad de inscriptos de la unidad curricular *i*.

La [Tabla X](#) presenta un ejemplo de este parámetro.

Notar que el orden de los índices que representan a cada UC en la matriz *matriz_concurrencia_mm* y en la matriz *uc_masterdata_mx* deben coincidir para que el programa actúe como se espera.

Tabla X: Vector de inscriptos por UC

ID	Incriptos
[0]	880
[1]	723
[2]	2.079
[3]	586
[4]	1.874
[5]	533

} M

cantidad_uc_fase1

Escalar que indica la cantidad máxima de UC a ser asignadas en un mismo turno al recorrer la primera fase del modelo. A lo largo del proyecto, comúnmente se establece esta variable en 3.

porcentaje_capacidad

Cota de capacidad suficiente común a todos los turnos, en la cual, al ser alcanzada, el turno deja de estar disponible.

semestre_prefiere_utlimo_turno

Indica el semestre sugerido de cada UC a partir del cual el modelo priorizará los turnos nocturnos sobre los restantes para las asignaciones en el calendario.

metrica_suficiente

Corresponde a un escalar que oficia como uno de los 2 criterios de parada en la tercera y última fase del modelo. Si la métrica del calendario generado supera a dicho valor, el modelo da por terminada la búsqueda de calendarios posteriores.

iteraciones_suficiente

Así como el parámetro anterior, esta entrada también establece un criterio de parada en la tercera fase. Si la cantidad de iteraciones, correspondientes a calendarios completos tentativos generados por el programa, supera dicho escalar, el modelo deja de operar.

4.1.2. Variables

El modelo trabajará con las siguientes variables, que serán dependientes de los parámetros cargados anteriormente.

asignaciones_mdt

Vector tridimensional de tamaño $M \times D \times T$ donde cada celda $[m, d, t]$ es binaria, la cual toma el valor 1 si la UC m está asignada al turno t del día d , y 0 en otro caso. Se trata de la variable de decisión principal de este modelo, del cual se desprende el calendario final. A modo de observación, si se hace la sumatoria en d y t para una unidad curricular m^* fija, el resultado debe ser 1 ya que cada UC debe estar asignada a un único turno.

En el ejemplo de la [Tabla XI](#), la unidad curricular correspondiente al índice 0 está asignada al segundo turno (columna) del primer día (fila).

Tabla XI: Ejemplo vector de asignaciones

UC	Días	Turnos	
		[0]	[1]
[0]	[0]	0	1
	[1]	0	0
	[2]	0	0

diferencia_dias_mm

Matriz cuadrada y simétrica de tamaño $M \times M$, en donde cada campo i, j está cargado con un entero equivalente a la diferencia de días entre la UC i y la UC j , en caso de estar asignadas en el calendario. En caso donde i sea igual a j , o que alguna de las UC no haya sido asignada, la celda correspondiente toma el valor arbitrario de 0.

La [Tabla XII](#) presenta un ejemplo de esta variable.

Tabla XII: Ejemplo matriz de diferencia de días

	[0]	[1]	[2]	[3]	[4]
[0]	0	14	14	9	11
[1]	14	0	0	5	3
[2]	14	0	0	5	3
[3]	9	5	5	0	2
[4]	11	3	3	2	0

diferencia_turnos_mm

Análogo a la variable anterior, las celdas de esa matriz representan la diferencia de turnos entre la UC $[i]$ y la UC $[j]$.

La [Tabla XIII](#) presenta un ejemplo de la variable asociada a la diferencia de turnos.

De forma complementaria, el modelo otorga como salida dichas matrices truncadas para las UC en conflicto, es decir, para aquellas UC que comparten al menos un estudiante, de este modo, se posibilita un análisis focalizado, que permite al usuario evaluar la reasignación de algunas UC. Nótese que se pretende hacer uso de ambas variables para dar noción diferente de “distancia” entre turnos y días.

Tabla XIII: Ejemplo matriz de diferencia de turnos

	[0]	[1]	[2]	[3]	[4]
[0]	0	41	42	28	33
[1]	41	0	1	13	8
[2]	42	1	0	14	9
[3]	28	13	14	0	5
[4]	33	8	9	5	0

Por otro lado, si se tiene que una UC $m1$ está asignada al turno 1 del día 2, y otra UC $m2$ está asignada al turno 2 del día 2, la diferencia de turnos será de 1, similar al primer ejemplo, sin embargo, la diferencia de días es 0, por lo que su distribución temporal es más acotada.

Los modelos matemáticos de asignación de UC en calendario clásico suelen reducir su estudio a una única variable de distancia (turnos), sin embargo, por experiencia se sabe que es más conveniente rendir en turnos consecutivos de días distintos que en turnos consecutivos del mismo día por lo que es pertinente implementar esta variable adicional.

métrica asignaciones

Escalar que se obtiene al realizar la sumatoria de todas las celdas de la matriz resultante del producto celda a celda entre la matriz de conflicto y la matriz de diferencia de días. Cuanto mayor sea este número, mejor será la distribución de las UC en el calendario.

4.2. Evolución del modelo

En el transcurso del desarrollo del modelo, se observó una evolución significativa desde su conceptualización inicial hasta la versión definitiva. Este proceso se vio optimizado gracias a las múltiples pruebas y la retroalimentación de las partes interesadas, incluyendo al tutor y la asistente académica, así como también a las interacciones específicas con el Director actual del INCO Ing. Hector Cancela.

4.2.1. Coloración de grafos

Inicialmente, se propuso un modelo fundamentado en la teoría de grafos, con un enfoque en la asignación de UC sin conflictos de horario. Este modelo se explica en detalle en la sección [2.1.1. Métodos utilizados](#)

Sin embargo, este modelo inicial no incorporaba restricciones adicionales relacionadas con la capacidad de estudiantes por turno o la preferencia por asignar UC en horarios distanciados. Dado que estas limitaciones son críticas para la funcionalidad y eficacia del modelo en un contexto académico real, se decidió descartar esta versión inicial en favor de un enfoque más integral y adaptativo que pudiera incorporar dichas restricciones.

4.2.2. Modelo matemático

Una segunda alternativa contemplada fue la creación de un modelo matemático convencional, caracterizado por una función objetivo específica a ser optimizada bajo un conjunto de restricciones lineales. Este enfoque buscaba la imposición de penalizaciones variables en función de la proximidad temporal entre los turnos y los días. El objetivo principal del modelo consistía en asignar UCs a los distintos turnos del calendario de manera que se minimizaran estas proximidades, siempre respetando la limitación de no sobrepasar la capacidad máxima de los turnos.

Sin embargo, este método fue finalmente descartado porque no representaba el procedimiento actual de los asistentes académicos. El equipo empezó a manifestar un creciente interés por un enfoque heurístico dada su similitud con el modelo manual. Aunque inicialmente este enfoque representaba un mayor desafío en términos de desarrollo, ofrecía la posibilidad de una mejora continua y aplicabilidad en proyectos futuros. La adopción de un modelo heurístico prometía una mayor flexibilidad y adaptabilidad frente a los diversos escenarios y requisitos que pudieran surgir a lo largo del tiempo, convirtiéndolo en una opción más viable y sostenible a largo plazo.

4.2.3. Modelo por fases

Tras descartar el modelo inicial basado en la teoría de coloración de grafos por su insuficiencia para satisfacer los requisitos del proyecto, y el enfoque matemático, dada la complejidad a la hora de cuantificar requisitos específicos, como las necesidades de los estudiantes, así como la necesidad de facilitar al usuario con opciones de replanificación luego de posibles cambios que desestabilicen el calendario inicialmente propuesto y limitaciones computacionales al tratarse de un problema NP-duro, lo cual supone que encontrar una solución óptima es inviable para casos grandes, entre otros, el equipo se orientó hacia una alternativa caracterizada por una metodología de modelo basado en

capas, comúnmente referido como modelo en capas o "jerárquicos" (Demir, 2018). Este paradigma estructura el modelo en diversas etapas secuenciales, cada una de las cuales requiere ser completada satisfactoriamente antes de avanzar a la fase subsiguiente.¹

La primera fase del modelo tuvo como objetivo la asignación de al menos el 50% de las UC contempladas en un calendario de parciales. El método seleccionado para esta fase involucra la aplicación de un conjunto de reglas deterministas. Específicamente, era necesario establecer un criterio de priorización para las UC, de tal manera que aquellas seleccionadas en las etapas iniciales se enfrentaran a un calendario con baja ocupación, incrementando así las posibilidades de ser asignadas a turnos óptimos.

Inicialmente, se contempló la posibilidad de emplear una suma ponderada de varios atributos de las UC, tales como la cantidad de estudiantes en concurrencia, el número de créditos y la cantidad de estudiantes inscriptos para priorizar a las UC sobre otras. No obstante, se identificó que los criterios para determinar los ponderadores podrían resultar ambiguos y subjetivos para los usuarios de la herramienta. En consecuencia, esta aproximación multifactorial fue descartada.

Finalmente, se llegó al consenso de priorizar las UC según la cantidad de estudiantes inscriptos, proporcionando así un criterio más claro y objetivo para la asignación en el calendario. Estas UCs son además las que implican mayor dificultad para los estudiantes novatos y de acuerdo al método manual, son las que análogamente se ubican en primer lugar para garantizar capacidad suficiente y además asegurar un margen de días calendarios para poder ser preparadas de manera adecuada.

Se recalca que, en relación con los parámetros asociados a la estructuración de los turnos dentro del calendario académico, se adoptó como una prioridad fundamental la incorporación de un mecanismo que permitiera la diferenciación entre distintos turnos dentro de cada día. Este enfoque tuvo como objetivo principal omitir selectivamente ciertos turnos o días completos, según las necesidades y circunstancias específicas que surgieran durante la asignación de unidades curriculares.

Esta funcionalidad se consideró esencial para aumentar la flexibilidad y eficiencia del modelo en su capacidad de adaptarse a una variedad de escenarios y requisitos de programación. Esta decisión se fundamentó en gran medida en observaciones empíricas del modelo manual. Específicamente, se destacó la importancia de contemplar intervalos de descanso adecuados entre parciales. Se observó que, por ejemplo, la asignación de una instancia de evaluación en el turno final de un día y la otra en el turno inicial del día subsiguiente, es considerablemente más beneficiosa para el rendimiento estudiantil en comparación con la realización de dos evaluaciones de manera consecutiva en el mismo día. Este enfoque resalta la relevancia de considerar no solo la cantidad de tiempo entre compromisos académicos, sino también la calidad y el impacto psicológico y físico de los periodos de descanso en el desempeño y bienestar de los estudiantes.

¹ Como se verá en la sección [4.4. Excepciones](#), el modelo permite saltarse las primeras fases en caso de replanificación, si el usuario así lo desea.

El modelo inicial planteado para la primera fase tuvo la estructura representada en la [Figura XX](#). Se destaca el hecho de que el calendario comienza ubicando las UC en orden de prioridad desde el último turno t disponible del último día d del calendario.

Aunque los resultados obtenidos con el diagrama inicial no fueron concluyentes, este sirvió como una herramienta fundamental para establecer las bases del programa desarrollado en Python. La complejidad inherente en el análisis de los resultados generados por este primer modelo condujo a la implementación de salidas adicionales. De este modo, se introdujo una tabla de asignaciones en formato Excel que representa al calendario de salida, acompañada de matrices detalladas que reflejaban las diferencias en días y turnos entre las diversas unidades curriculares.

Asimismo, con el propósito de facilitar una evaluación rápida y eficiente del calendario generado por el modelo, se implementó una matriz métrica, complementada por una métrica escalar derivada de la misma. En ese entonces, el enfoque consistió en la creación de una suma ponderada de las matrices de diferencia de días y turnos. En esta suma ponderada, se otorgó una mayor importancia a la matriz de diferencia de días en comparación con la de turnos tomando de forma arbitraria el escalar 5, donde el razonamiento fue que es 5 veces más importante tener un distanciamiento de 1 día que de 1 turno. Posteriormente se realizó el producto de Hadamard², aplicado a la matriz resultante y la matriz de concurrencia, para reflejar de manera más precisa la interacción entre estos dos aspectos. Entonces la métrica escalar, se definió como la suma total de los elementos de la matriz resultante.

Esta métrica escalar proporciona un indicador cuantitativo único que resume la efectividad general del calendario propuesto, lo que permite una rápida valoración de su calidad sin la necesidad de realizar un análisis manual detallado. Este enfoque matemático y sistemático mejora significativamente la capacidad de los usuarios para evaluar y comparar diferentes versiones del calendario, facilitando la toma de decisiones informadas en la optimización y ajuste del modelo. La métrica del modelo se calcula entonces de la siguiente manera:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m a_{ij}, \quad a_{ij} = (5 \times b_{ij} + d_{ij}) \times c_{ij}$$

siendo b_{ij} la diferencia de días en el calendario entre la UC i y la UC j , d_{ij} es la diferencia de turnos y c_{ij} la cantidad de estudiantes que cursan dichas UCs de manera simultánea dada por la matriz de concurrencia.

Como se verá en los capítulos siguientes, el diagrama de decisiones elaborado de forma preliminar exhibe similitudes notables con la versión final, tanto en términos de estructura general como en la intención subyacente. Sin embargo, se identificaron ciertos elementos en este prototipo inicial que resultaron en la generación de resultados inesperados y no deseados. Estas discrepancias se hicieron evidentes durante la fase de pruebas iniciales, donde la implementación del diagrama condujo a salidas que no se alineaban con los objetivos previstos del modelo.

² Operación aplicada a matrices de igual dimensión en la que los elementos ubicados en la misma posición de las matrices son multiplicados entre sí. Es diferente de la multiplicación de matrices tradicional, en la que se realiza una combinación lineal de filas y columnas.

Este hallazgo subrayó la necesidad de realizar ajustes y refinamientos en el diseño del diagrama, con el fin de alinear las salidas más estrechamente con los requisitos y expectativas del proyecto. La detección y corrección temprana de estos aspectos fue crucial para la mejora del modelo y además proporcionó aportes valiosos para el desarrollo y las discusiones con las partes interesadas.

El primer análisis repercutió a su vez en 2 aspectos principales a mejorar.

En primer lugar, en el proceso de asignación de unidades curriculares utilizando el primer diagrama de decisiones, se identificó una tendencia marcada a asignar un número elevado de UC en los turnos finales del calendario. Esta inclinación se debió en parte a la metodología del diagrama de decisión, el cual siempre iniciaba su proceso de búsqueda en estos últimos turnos. Sumado a esto, la ausencia de restricciones adicionales, más allá de la consideración de conflictos y la limitación de la capacidad, resultó en que varias UC con un bajo número de inscriptos, y consecuentemente, una menor probabilidad de concurrencia, terminaban siendo asignadas a los mismos turnos después de pocas iteraciones en el diagrama de decisión. Esto provocaba, en efecto, que los turnos menos analizados habitualmente quedasen desocupados.

Para mitigar esta problemática, se implementó una nueva restricción que limitaba el número máximo de UC que podían ser asignadas a un único turno. Esta restricción se estableció inicialmente en tres UC por turno³, basándose en análisis de calendarios académicos de

³ Posteriormente, el parámetro de máximo de UC por turnos dejó de estar preestablecido, permitiendo al usuario modificarlo

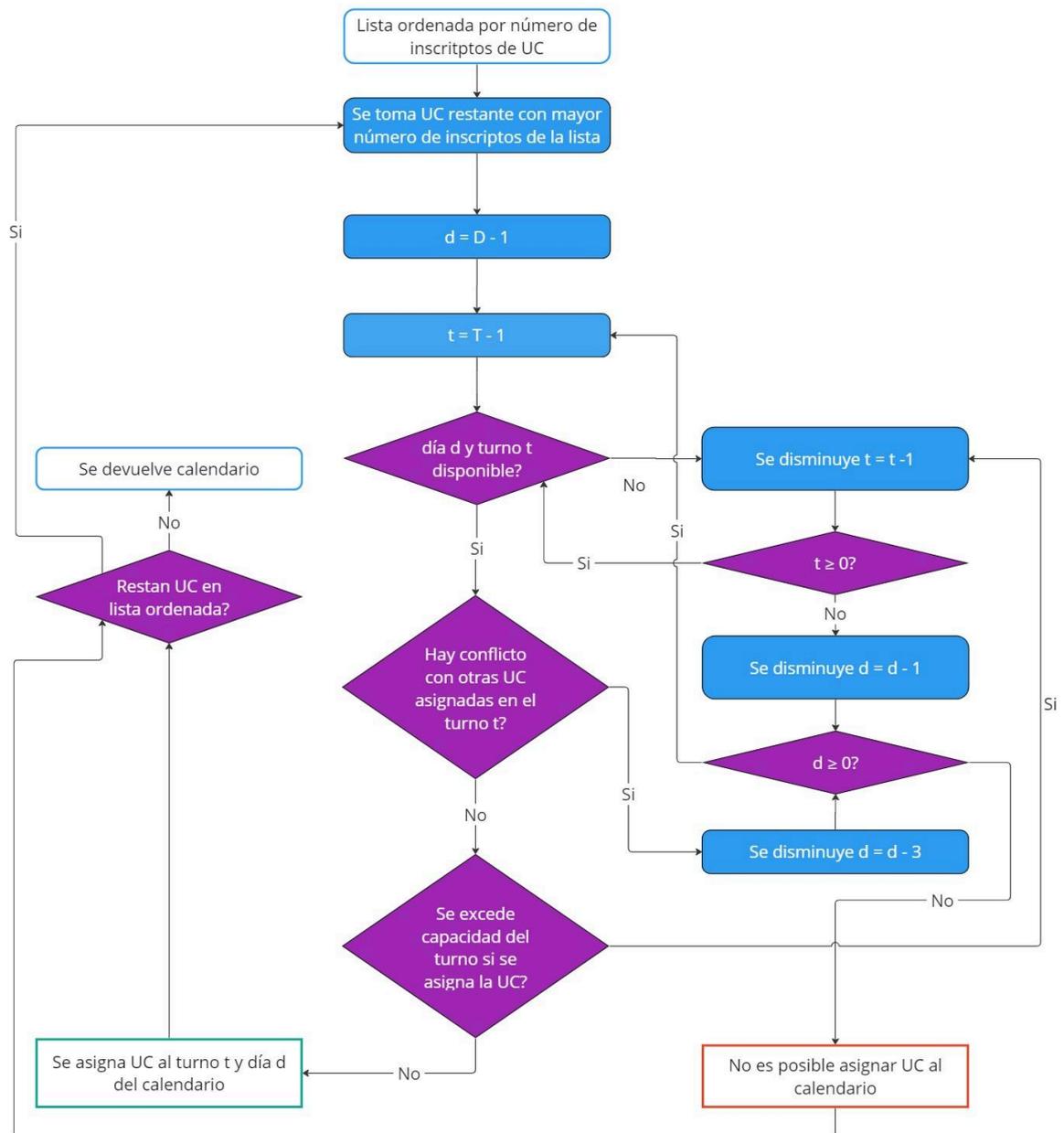


Figura XX: Primer versión del diagrama de decisión de fase 1

referencia. La inclusión de esta restricción tenía como objetivo distribuir de manera más equitativa las UC a lo largo del calendario, evitando la concentración excesiva en turnos específicos y mejorando así la eficiencia y la efectividad del proceso de asignación. Al continuar el análisis, se detectó una problemática que emergía únicamente bajo condiciones de un volumen considerable de datos de entrada. Este desafío se centraba en la validación de conflictos en el entorno de los turnos asignados.

El problema se manifestaba en situaciones donde existían suficientes UC asignadas en los turnos de un día específico. Al intentar asignar una nueva UC, si todos los turnos de ese día están llenos pero no hay conflicto, el modelo se ve obligado a considerar un turno del día anterior. Si dicho turno se encuentra disponible y cumple con las restricciones adicionales,

se asigna la UC al turno. Sin embargo, esta metodología no toma en cuenta la posibilidad de que en algún turno anterior del mismo día, existiera una UC en conflicto.

Para resolver este problema, se implementó una nueva validación que exigía la ausencia de conflictos en todos los turnos de un día completo, en lugar de enfocarse únicamente en el turno específico bajo consideración. En esta etapa inicial del modelo, el objetivo primordial era asegurar una asignación que mantuviera una separación adecuada entre unidades curriculares en conflicto, incluso si ello implicaba la no asignación de algunas UC, por lo que adicionalmente, se introdujo una validación más rigurosa que requería la no conflictividad en un intervalo de dos días. Esta regla adicional engloba la validación anterior pero se ejecuta posteriormente, con el propósito de optimizar la eficiencia del modelo. Este enfoque más exhaustivo y sistemático en la validación de conflictos permitió una asignación más coherente y efectiva de las UC dentro del calendario.

Dichas mejoras del modelo se llevaron a cabo tras una reunión con el experto en Investigación de Operaciones Ing. Héctor Cancela. Esta sesión de trabajo fue crucial y propició la elaboración de un diagrama revisado, concluyendo en las 2 mejoras mencionadas (máximo de UC por turnos y evaluación de conflictividad en el entorno). Este nuevo diagrama refleja las adaptaciones y refinamientos realizados en respuesta a las observaciones y recomendaciones surgidas durante la interacción con Cancela y análisis con datos iniciales, marcando un avance significativo en la evolución del proyecto.

Respecto a la métrica, en el transcurso de la reunión se abordó la importancia de desarrollar una que, por un lado, resultara suficientemente descriptiva para capturar las variables relevantes del modelo, y por otro, fuera comprensible para los usuarios finales. Durante esta discusión, se analizó el enfoque adoptado para la creación de dicha métrica. Se concluyó que la suma ponderada originalmente propuesta, que combinaba la matriz de diferencia de días con la matriz de diferencia de turnos, requería una revisión debido a la naturaleza subjetiva inherente a la elección de los ponderadores. Tras un análisis detallado y considerando la necesidad de simplificar el modelo sin comprometer su integridad analítica, se decidió eliminar la matriz de diferencia de turnos del cálculo de la métrica. Consecuentemente, la métrica final adoptada se basó exclusivamente en el producto Hadamard entre la matriz de diferencia de días y la matriz de concurrencia. Esta decisión se fundamentó en la premisa de que tal enfoque proporciona un balance óptimo entre la precisión descriptiva y la claridad conceptual, facilitando así una interpretación más intuitiva de los resultados por parte de los usuarios. Este ajuste metodológico refleja un esfuerzo por aumentar la accesibilidad y la utilidad práctica del modelo, sin sacrificar su rigor analítico.

La métrica del modelo se calcula entonces de la siguiente manera:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m a_{ij}, \quad a_{ij} = b_{ij} \times c_{ij}$$

La [Figura XXI](#) muestra el diagrama de decisión de la primera fase adaptado a las mejoras descritas.

Paralelamente, el equipo comenzó a esbozar estrategias para abordar las 2 fases subsiguientes del proyecto. El objetivo principal de la fase 2 era asignar aquellas UC que no habían sido efectivamente incorporadas en la primera fase por las restricciones duras. Por

otro lado, el objetivo de la fase 3 consistía en un enfoque similar, pero utilizado primordialmente para la replanificación.

A pesar de haber implementado los cambios descritos en la primera fase, el modelo aún presentaba una distribución ineficiente, caracterizada por una tendencia a asignar unidades curriculares en los últimos días del calendario académico. Con el propósito de evitar la repetición de una secuencia predecible de turnos en el diagrama de decisión, se tomó la decisión de incorporar un elemento de aleatoriedad en el sistema para las fases 2 y 3. Según esta modificación, el modelo seleccionaría aleatoriamente un turno y día y, tras realizar una serie de validaciones detalladas en el capítulo [4.3. Estructura](#), determinaría o no la asignación de la UC en cuestión. Si este turno no resultaba ser el adecuado, el proceso de selección de turnos se repetiría hasta encontrar uno que cumpliera con los criterios establecidos. Adicionalmente, este enfoque tiene como ventaja la obtención de salidas distintas cada vez que se ejecutara el programa, de modo que si el usuario no se encuentra convencido con el calendario, puede volver a ejecutarlo, comparando los resultados y las métricas entre las distintas propuestas.

Durante las fases de revisión y discusión de las fases 2 y 3, se contempló la posibilidad de que el modelo tomara una UC y evaluara todos los turnos disponibles del calendario, reteniendo aquellos sin conflictos. Para cada uno de estos turnos, se calcularía la menor distancia en días respecto a toda otra UC con la que presenta conflicto, asignando finalmente la UC al turno donde esta distancia mínima, resultara máxima.

Sin embargo, esta estrategia fue eventualmente descartada a favor de un enfoque en el que la UC se asignaría al primer turno que cumpliera con un criterio preestablecido de diferencia de días para evitar costo computacional y permitir varias asignaciones posibles.

Esta diferencia de días mínima permisible comienza siendo alta, por ende restrictiva, y se relaja progresivamente para cada UC que no haya podido ser asignada en el calendario, en caso de que ningún turno cumpliera con la condición de presentar una diferencia de días con otras UC en conflicto indicada por el criterio preestablecido. Esta última metodología fue seleccionada por su mayor simplicidad de programación y porque implica un menor número de iteraciones y comparaciones. La adopción de este enfoque busca optimizar el equilibrio entre la eficiencia computacional del modelo y la efectividad en la distribución de las UC a lo largo del calendario.

Subsecuentemente a las modificaciones implementadas en la primera fase y el desarrollo de la segunda y tercera fase del modelo, se realiza una reunión con la asistente académica con el propósito de analizar y discutir los avances alcanzados. El objetivo principal de este encuentro consistió en identificar continuas oportunidades de mejora y detectar posibles errores residuales en el modelo. Como resultado de la reunión, se identificaron nuevamente dos nuevas áreas clave para implementar mejoras adicionales en la primera fase del modelo.

La primera mejora propuesta se centra en la evaluación preliminar del semestre académico sugerido para cada unidad curricular que va a ser asignada. Se plantea que el modelo inicie su análisis desde el último turno del día para UC correspondientes a semestres avanzados, mientras que para los semestres iniciales, se consideraría el penúltimo turno como punto de partida.

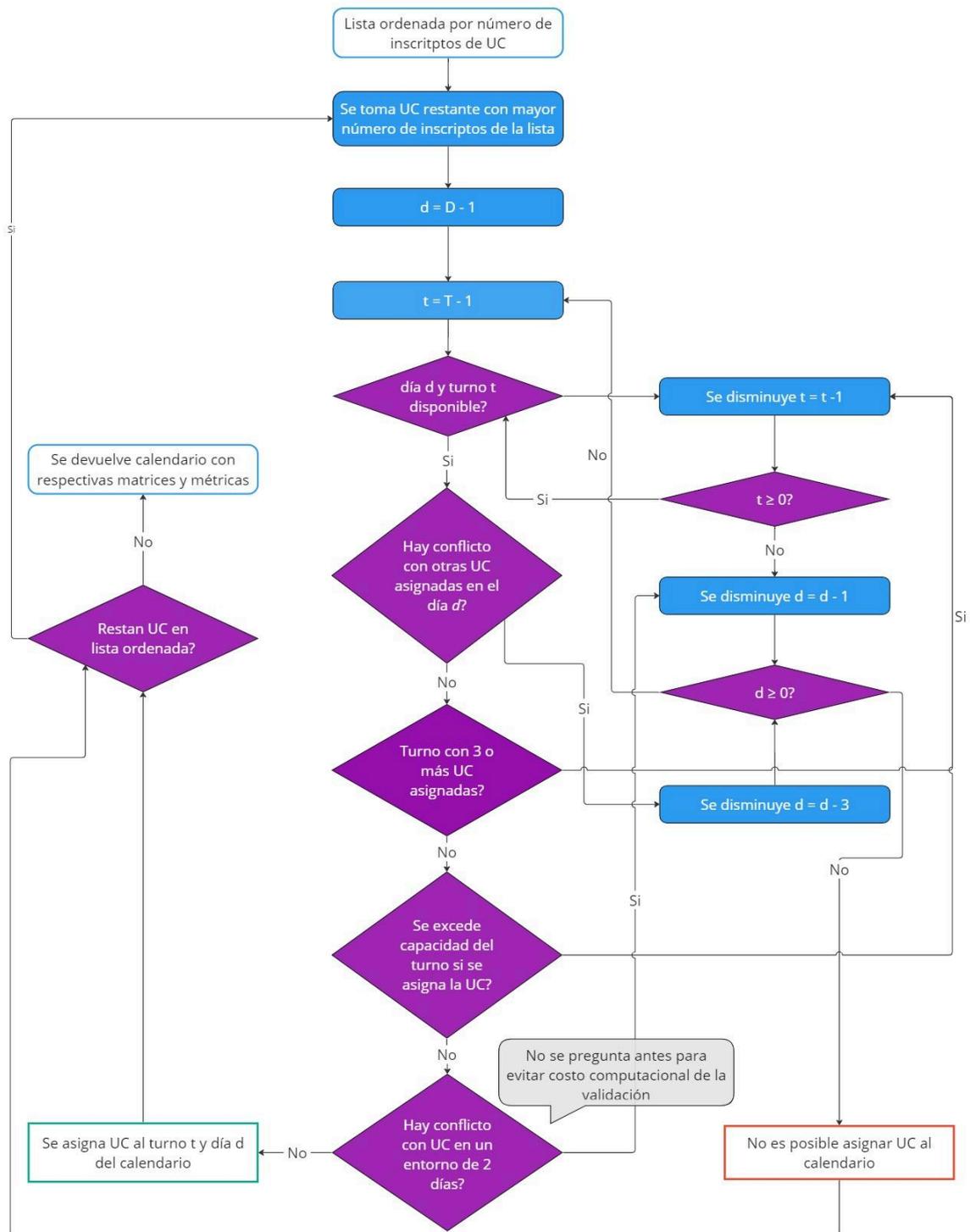


Figura XXI: Segunda versión del diagrama de decisión de fase 1

Este enfoque busca optimizar la asignación de UC en función de la disponibilidad horaria de los estudiantes, además de evitar la asignación concentrada en los últimos turnos del día.

Se establece un semestre divisorio que permite conocer si existe o no cierta preferencia por el turno más tardío. Este input puede ser definido por el usuario y comúnmente se toma al 5to semestre como semestre bisagra para diferenciar las UC de los primeros 2 años y las

que corresponden al tercer año de la carrera en adelante. Este criterio permite al modelo a tender a asignar UC de semestres avanzados a los últimos turnos del día, de modo que los estudiantes que trabajan puedan rendir el parcial sin la necesidad de faltar al trabajo. Adicionalmente, para los semestres iniciales, se busca que la asignación no sea en el último turno del día dado que muchos estudiantes viven en el interior y optan por viajar de vuelta a su hogar a la salida del parcial.

La segunda mejora propuesta se relaciona con el parámetro de capacidad de los turnos. Inicialmente, se había asumido una capacidad constante y uniforme para todos los turnos. No obstante, en la práctica, se observó que la capacidad de los turnos varía dependiendo de la disponibilidad de aulas o salones adicionales. Por lo tanto, se ajustó el modelo para que refleje esta variabilidad en la capacidad de los turnos, lo cual permite una asignación de UC más alineada con las condiciones reales y las limitaciones de infraestructura de la institución educativa. Estos ajustes buscan incrementar la precisión y la aplicabilidad del modelo en el contexto real.

Posterior a los cambios implementados, y con el propósito de refinar el modelo, el equipo se dedicó a la conceptualización de métodos para mejorar la métrica de la salida en la tercera fase del proceso. Esta fase, cuya estructura se describe con detalle en la sección [4.3 Estructura](#), presenta similitudes sustanciales con la segunda fase, con la diferencia primordial de permitir la introducción manual de un calendario preestablecido.

Dentro de esta tercera y última fase del modelo, se exploró la utilidad potencial de iterar sobre aleatoriedad en la generación de resultados. Se logró que el modelo almacene cada conjunto de datos resultantes, compuestos por el calendario y la métrica correspondiente, que surgieran de la aplicación del diagrama de decisión para las UC no asignadas. El modelo repite entonces este proceso de generación de calendarios de manera iterativa, y se detiene en caso de cumplir con uno de los siguientes dos criterios de parada: alcanzar un número máximo predefinido de iteraciones o lograr una métrica considerada como óptima o suficiente. Esta metodología permitiría al modelo presentar como resultado final el calendario que exhibiera la métrica más alta entre todos los generados.

Otra implementación, centrada en facilitar el análisis de la calidad del calendario de salida, involucró la incorporación de matrices que representan la diferencia de días y turnos entre unidades curriculares en situación de conflicto. Cabe destacar que el modelo previamente generaba matrices indicando la diferencia de días y turnos entre todas las UC; sin embargo, para los propósitos del análisis en cuestión, la mayoría de estos valores resultaban ser irrelevantes. Por contraste, las matrices recientemente integradas facilitan un enfoque más dirigido y detallado en el estudio de las interacciones entre las UC en conflicto. Es decir, estas matrices permiten análisis más enfocados en aquellos casos donde el distanciamiento entre UC puede no ser deseado. Naturalmente, las mismas mantienen el mismo tamaño que las matrices de diferencia de días y turnos originales, la modificación principal consiste en que las celdas representativas de la diferencia de días o turnos entre UC que no presentan conflicto se expresarán con un valor de 0. Esta adaptación mejora significativamente la legibilidad y la utilidad de las matrices al reducir la carga de información, destacando las áreas de interés específicas, facilitando así un análisis más eficiente y dirigido.

La última modificación en las salidas resultó en la inclusión de gráficas que, para las fases 1 y 2, indican la cantidad de pasos acumulados necesarios para recorrer el diagrama de decisión, resultando o no en la asignación de la UC en el calendario.

En lo que respecta al elemento central del modelo, específicamente los diagramas de decisión, se llevó a cabo la implementación de una propuesta inicialmente planteada en las etapas tempranas del proyecto: la introducción de un umbral de capacidad. Este umbral, una vez alcanzado, actuaría como un criterio suficiente para considerar un turno como completo, impidiendo así la asignación adicional de unidades curriculares en dicho turno. Este mecanismo fue diseñado para prevenir la asignación de UC con un bajo número de inscritos en turnos que ya cuentan con una carga significativa.

La implementación de este umbral de capacidad aborda directamente la problemática logística asociada a la gestión de los salones y el enfoque de bolsa negra utilizada en el modelo. Se distingue entre la situación de tener pocas UC con gran número de inscritos, que ocupen la totalidad de la capacidad de cada salón, y el escenario donde varias UC con pocos inscritos ocupan el espacio. Este último caso representa un uso ineficiente de los recursos disponibles, ya que se subutiliza la capacidad de cada salón al estar ocupados por múltiples UC con baja asistencia.

La adopción de un umbral de capacidad contribuye a una gestión más eficiente del espacio físico, optimizando la asignación de los salones y asegurando una utilización más efectiva de los recursos. Esto no solo mejora la logística de los espacios físicos, sino que también refuerza la coherencia y eficiencia general del modelo de asignación de UC.

4.3. Estructura

Como se discutió brevemente en varios capítulos previos del informe, el programa se estructura en tres etapas (o fases), distribuidas en dos modelos independientes. El primer modelo ejecuta las dos primeras etapas de manera secuencial, mientras que el segundo lleva a cabo la tercera etapa. En cada fase, el modelo sigue una serie de pasos y reglas específicos que determinan de manera ordenada la conveniencia de asignar la UC seleccionada en un turno y día del calendario.

A grandes rasgos, la arquitectura del programa tiene la forma presentada en la [Figura XXII](#).

Las fases 1 y 2, presentes en el modelo 1, dan como resultado una posible asignación completa de UC en el calendario, posteriormente, tras una posible reasignación forzosa y/o desasignación de UC realizada por el usuario, se ejecuta el modelo 2 (fase 3) con el objetivo de obtener un nuevo calendario, potencialmente definitivo.

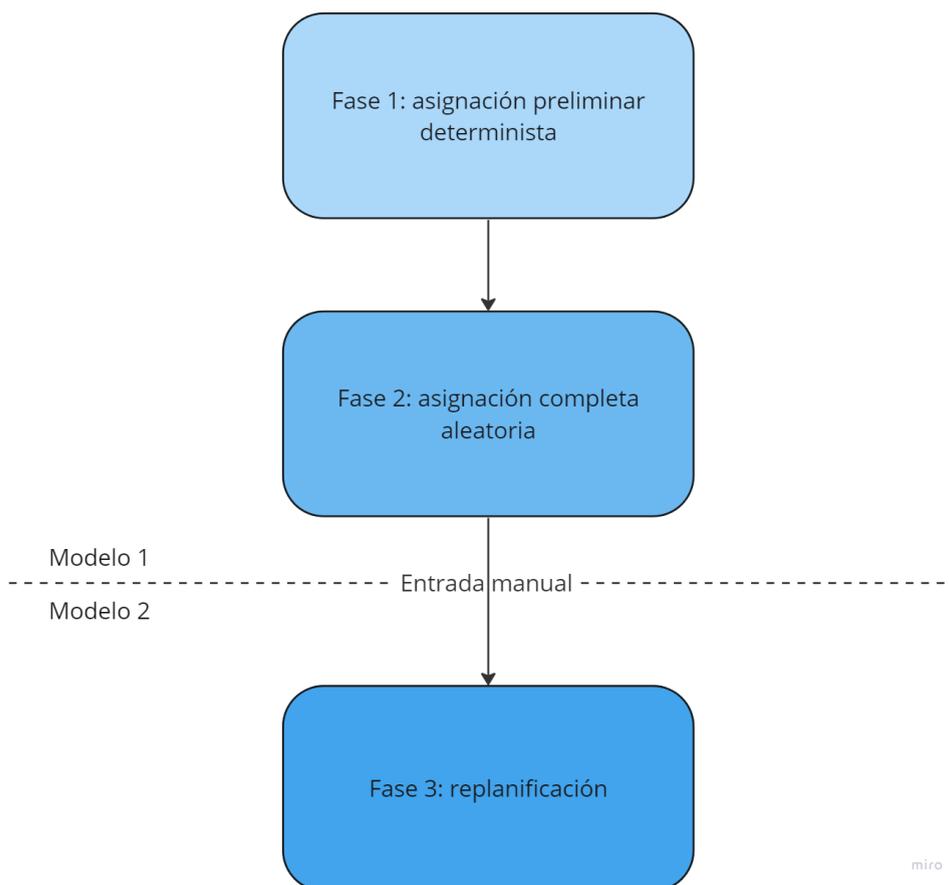


Figura XXII: Diagrama de arquitectura del programa (fases 1, 2 y 3)

El diagrama de decisión pretende entonces automatizar y enriquecer el procedimiento manual que realiza la asistente académica actualmente para el armado del calendarios de parciales y exámenes.

4.3.1. Fase 1

La primera fase comienza al ordenar las UC según la cantidad de estudiantes inscriptos en ella y realiza, para cada una de ellas, el flujo representado en la [Figura XXIII](#).

La fase selecciona de forma secuencial a la primera UC de la lista (UC con más inscriptos del conjunto) y comienza la búsqueda de asignación por el último día del período de parciales. Se pregunta entonces si el semestre sugerido de la UC tomada es mayor o igual al semestre bisagra brindado por el usuario, en caso afirmativo, el modelo toma el último turno del día y en caso contrario, toma el penúltimo. Cabe destacar que una UC puede estar sujeta a varios semestres sugeridos, en caso de estar presente en distintas carreras de grado. De ser así, el usuario tiene la potestad de elegir uno de ellos, por ejemplo, aquel semestre sugerido correspondiente a la ingeniería que más inscriptos tiene la UC en cuestión.

En caso de que el turno esté disponible, según el parámetro *turnos_disponibles_dt*, se realiza una verificación para determinar si la asignación de una UC en ese turno generaría conflictos con otras UC previamente asignadas en el mismo día. La ausencia de conflicto se establece cuando el campo de la matriz de concurrencia, representada por el parámetro

$matriz_conurrencia_mm[i,j]$, es nulo para todas las unidades curriculares asignadas en todos los turnos del día seleccionado.

Si no hay conflicto, se procede a verificar que no se hayan asignado previamente tres UC en ese turno. Esta restricción tiene como objetivo distribuir de manera equitativa las UC en todos los turnos del calendario. Si se cumple esta condición, es decir, si en el turno al que se desea asignar la UC hay 0, 1 o 2 UC previamente asignadas, el proceso continúa verificando que la capacidad del turno no se vea excedida al agregar la nueva UC.

Finalmente, en caso de cumplir con las condiciones anteriores, el modelo extiende su análisis a un entorno de dos días hacia adelante y hacia atrás y se realiza una verificación para determinar si, en ese intervalo, la UC entraría en conflicto con alguna otra UC. En ausencia de los mismos, el modelo procede a asignar la UC en el turno y día seleccionado. Este enfoque asegura que cualquier UC asignada mantenga una distancia adecuada con otras en las que se comparta concurrencia.

Se repite el proceso con la siguiente UC de la lista ordenada por inscriptos hasta que dicha lista esté vacía.

Ahora bien, pueden darse los siguientes casos:

- **El día y turno seleccionado no está disponible**

En este caso, el modelo disminuye el turno al anterior inmediato y verifica que este turno sea mayor o igual al límite inferior establecido (turno de la mañana). En caso de que sí, retoma con el flujo mencionado. En otro caso, también vuelve al flujo mencionado tras disminuir el día al anterior inmediato y asignar la variable de turno al último o penúltimo turno del día, dependiendo del semestre de la UC.

- **Existe conflicto en el día seleccionado al intentar asignar la UC**

En este caso, se decrece la cantidad de días en 3 y, si el día se encuentra dentro de los límites del calendario, se vuelve a repetir el flujo mencionado tomando el último o penúltimo turno dependiendo del semestre de la UC. La razón por la cual se decrece 3 días es poder brindar al estudiante suficiente tiempo para descansar y repasar entre los parciales a rendir. Si al decrecer los 3 días el índice de días d toma valor negativo, el algoritmo indicará al usuario que no ha podido asignar dicha UC y procederá a tomar la siguiente del listado ordenado.

- **El turno al cual se quiere asignar la UC ya dispone de 3 UC o la capacidad del turno se excede si se asigna UC en el mismo**

En este caso, el modelo se comporta de igual manera que si el día y turno seleccionado no estuviera disponible. Al término de la fase inicial, se logra la asignación de un conjunto parcial o completo de UC, dicha asignación se refleja en la variable $asignaciones_mdt$. Dada la aplicación de múltiples restricciones en esta etapa inaugural del modelo, es factible que varias UC no satisfagan dichas restricciones y, consecuentemente, no sean asignadas a ningún turno y día.

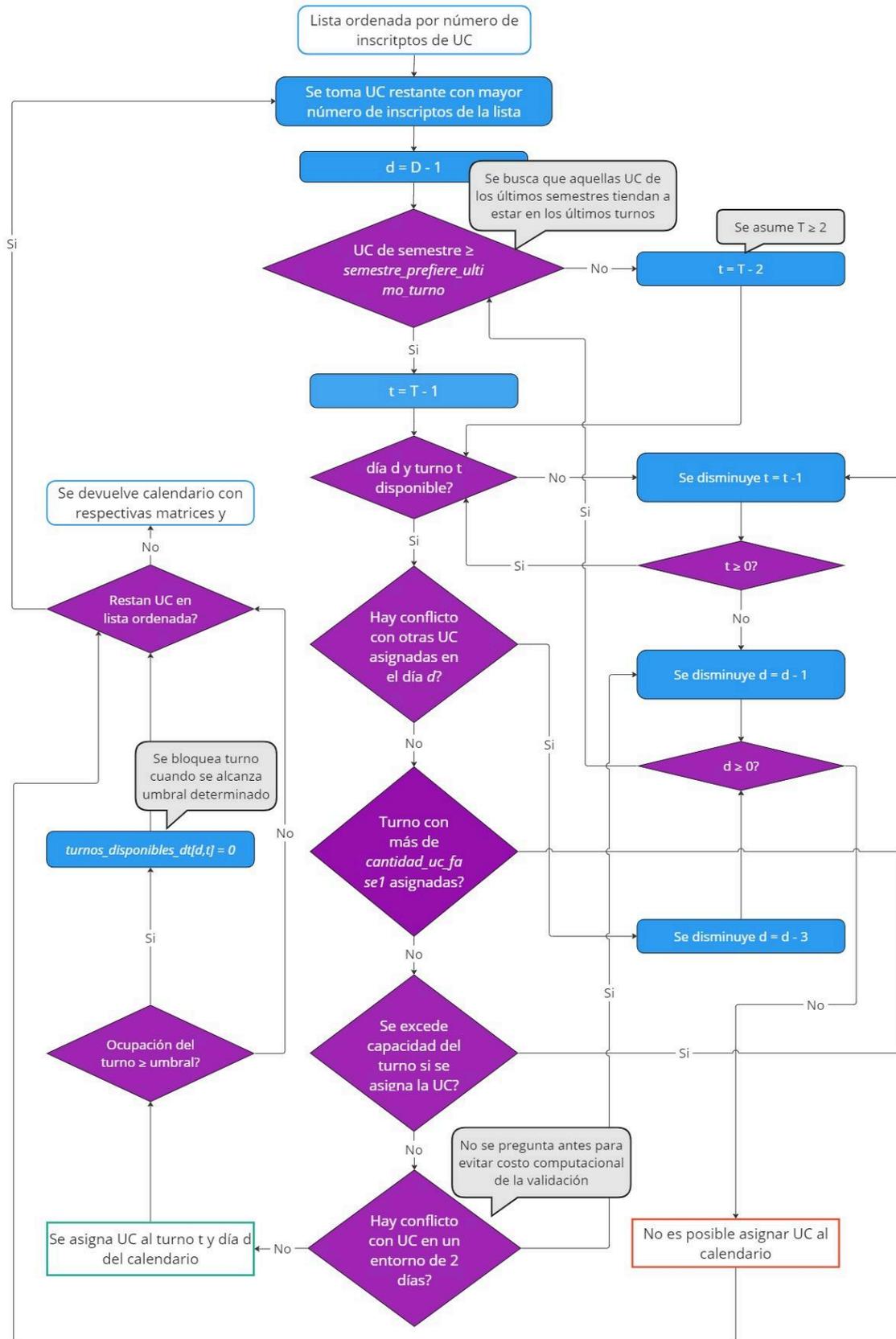


Figura XXIII: Diagrama de decisión definitivo de primera fase

La segunda fase, detallada en la siguiente sección, propone asignar todas aquellas UC que no pudieron ser asignadas en la primera iteración, flexibilizando progresivamente las restricciones impuestas.

Como representación del calendario, la herramienta genera una tabla que consta de tres columnas: el nombre de la UC, el día, y el turno asignado en el calendario, si corresponde. Esta tabla proporciona información sobre la asignación de cada materia, indicando el turno y día correspondiente. La disposición de la lista se organiza de manera ascendente por días, facilitando su lectura. Adicionalmente, aquellas UC que no lograron ser asignadas en la primera iteración se presentan al final de la tabla, con los campos de día y turno vacíos.

La [Tabla XIV](#) muestra un ejemplo reducido a 4 unidades curriculares.

Tabla XIV: Representación del calendario de salida

ID	Nombre	Día	Turno
[1]	FÍSICA 1	1	2
[3]	CALCULO VECTORIAL	1	3
[2]	MECÁNICA NEWTONIANA	2	3
[0]	MATEMÁTICA DISCRETA 1	-	-

Nótese que no se explicita al usuario la variable *asignaciones_mdt* propiamente dicha dado su extenso tamaño y la dificultad que exige su interpretación.

Luego de realizada la asignación preliminar, resultado de la primera fase, se obtienen 5 matrices, correspondientes por un lado a la diferencia de días y turnos entre todas las UC, y por otro lado enfocado a aquellas que se encuentran en conflicto, así como también la matriz métrica y métrica escalar obtenida a partir de esta, que valoriza al calendario.

4.3.2. Fase 2

La segunda fase del modelo propone asignar aquellas unidades curriculares que, por diversas razones, no pudieron ser asignadas en la fase inicial previamente delineada. Se recuerda que, con el objetivo de lograr una distribución uniforme de las UC restantes en el calendario, se adoptó una metodología distinta a la empleada en la primera fase. Esta última, al ser determinista y comenzar la iteración desde el final del calendario hacia el principio, tiende a asignar las UC sobre el final del periodo. En esta segunda etapa, se vuelve a tomar las UC ordenadas por el número de inscriptos que no fueron asignadas en la primera fase y para cada una de ellas, se ejecutan diversas validaciones con la finalidad de poder ser asignadas en un turno y día viable. La [Figura XXIV](#) expone los pasos seguidos por la fase 2.

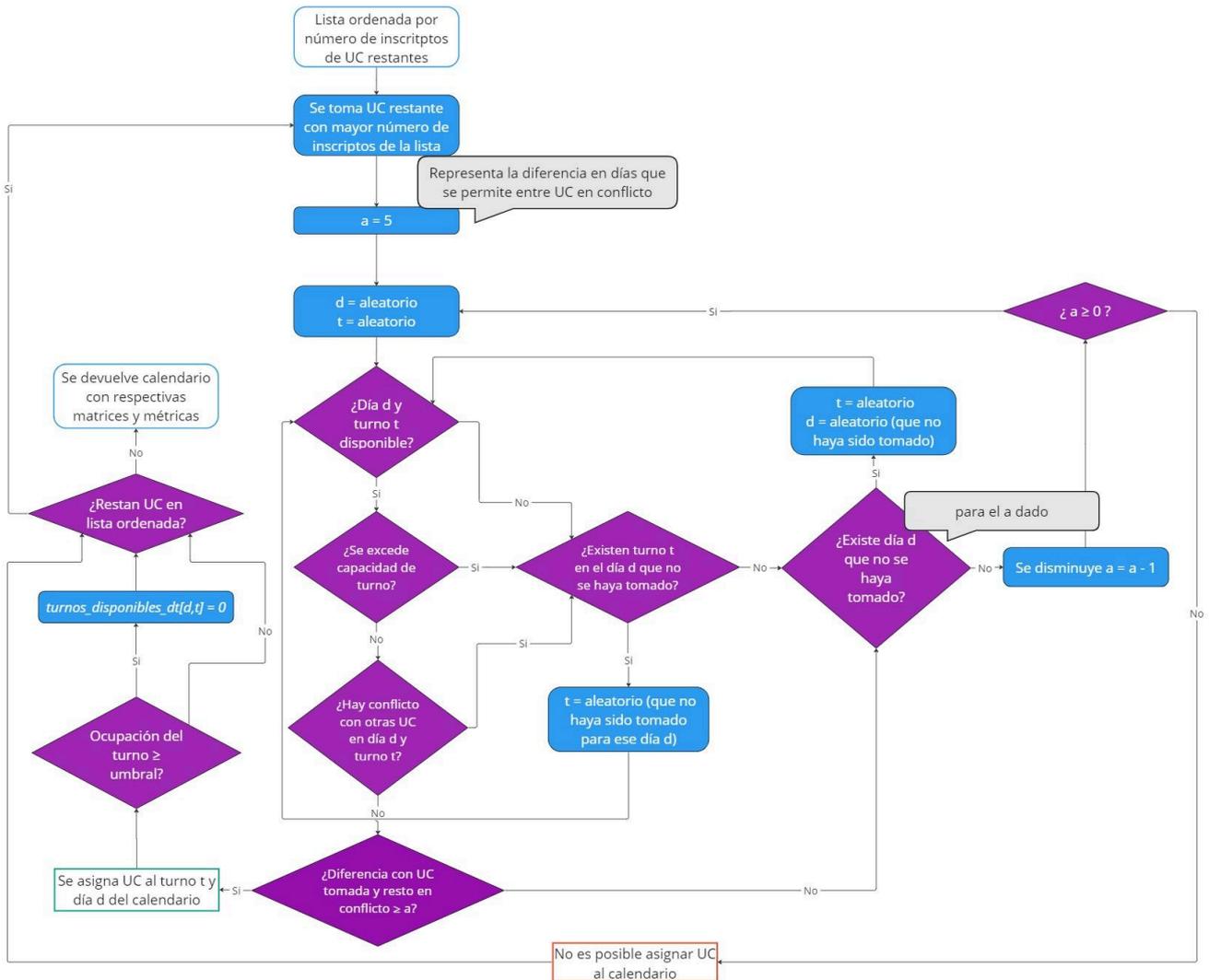


Figura XXIV: Diagrama de decisión definitivo de Fase 2

En primer lugar, se inicializa una variable de condición a , un entero no negativo, que representa la mínima diferencia en días entre UC en conflicto que se permite para asignar la UC al calendario. Por ejemplo, si se tiene la distribución de calendario de la [Tabla XV](#), donde la UC coloreada en verde es la que se está estudiando y en amarillo aquellas en donde hay conflicto con la UC de estudio:

Tabla XV: Representación del calendario de salida

Nombre	Día	Turno
TIEMPOS Y METODOS	1	2
TALLER A	1	3
MATEMATICA DISCRETA	2	3
ECONOMIA	5	1

Entonces la distancia mínima de conflicto en días de “TIEMPOS Y MÉTODOS” es 1, ya que corresponde a la diferencia de días con la UC más cercana con la cual se tenga conflicto, en este caso “MATEMÁTICA DISCRETA 1”.

Cuanto mayor sea el valor de la variable de condición de diferencia de días, más restringido será el repositorio de días en los cuales la UC asignada cumple con la condición. Por ejemplo, si a es 4, entonces la iteración de la segunda fase solo asignará a la UC en un turno y día en donde la distancia entre dicha UC y las restantes en las cuales esté en conflicto sea mayor o igual a 4.

Se inicializa la variable a en 5 para cada UC sometida al diagrama de decisión de la fase 2 de manera arbitraria, pero a su vez razonada. Si dicho valor es alto, la posibilidad de asignación se verá reducida, asimismo, dado que las UC se verán forzadas a recorrer todos los días del calendario buscando una posible asignación, se decidió no llevar este valor a un número de diferencia mayor a 5 para evitar esfuerzo computacional innecesario. A su vez, si este valor es bajo, es decir, si se relaja, la tendencia a asignar se verá aumentada, sin embargo, se pierde la oportunidad de asignar UC en conflicto de manera más espaciada.

Entonces, el diagrama de decisión adopta un enfoque que implica la exploración aleatoria de los días y turnos disponibles, con el fin de llevar a cabo la asignación de la UC. Dicha asignación se da en el primer turno y día que satisface las siguientes tres condiciones fundamentales:

1. El turno y día está disponible
2. La asignación de la UC no sobrepasa la capacidad en ningún turno establecido
3. La diferencia en días entre la UC en consideración y aquellas que se hallan en conflicto es igual o superior al umbral de separación a previamente especificado

La restricción del umbral de capacidad se encuentra implícito en la primera condición, correspondiente al turno y día disponible, dado que de alcanzarse el umbral de la capacidad especificado, el modelo fija en 0 el valor *turnos_disponibles_dt* del turno correspondiente.

En caso de que no se cumplan ni la primera ni la segunda condición, se procede a evaluar las condiciones restantes en los turnos disponibles para el mismo día en el que se encuentra actualmente el proceso. Este ciclo se repite hasta que se satisfagan todas las condiciones o hasta que no queden más turnos en el día en consideración para su análisis, en cuyo caso se procede a seleccionar aleatoriamente otro día y se repite el proceso de razonamiento.

Además, si la tercera condición no se cumple, es decir, si la diferencia en días entre la UC que se está asignando y aquellas en conflicto para el día específico es menor que el umbral de separación establecido, se procede de manera similar. Se elige de forma aleatoria otro día y se repite el proceso de razonamiento hasta que se encuentre un día que cumpla con todas las condiciones estipuladas para la asignación de la UC.

Si después de agotar todos los turnos y días disponibles no es posible satisfacer las necesidades sin violar esta restricción, se toma una medida de relajación. Esta medida implica reducir el valor del a en 1. Esta relajación puede resultar en la posibilidad de asignar las UC en conflicto en potenciales días y turnos que pasan a cumplir con la condición de

separación requerida. Se continúa reduciendo el valor del umbral hasta que finalmente sea posible asignar la UC a un turno sin infringir la restricción.

Sin embargo, en situaciones en las que una UC en conflicto presenta conflicto con varias UC que ya han sido asignadas, y el calendario no dispone de días vacíos adicionales, podría ocurrir que el umbral para esa UC termine siendo igual a 0. Esto significa que no es posible encontrar un día en el cual exista separación de días entre la UC y las demás UC en conflicto. En este escenario, el modelo aplica una restricción dura que prohíbe que la UC se asigne en el mismo turno que otra UC en conflicto, ya que esto implica que un estudiante se vea obligado a ausentarse a uno de los parciales correspondientes a las UC en conflicto. En resumen: se puede dar el escenario donde la variable a es nula, en esta situación el modelo busca asignar entonces la UC en el primer turno y día disponible donde no haya situación de conflicto y donde no se exceda la capacidad disponible, pudiendo existir el caso donde se alojan 2 parciales de UCs en conflicto en el mismo día pero en diferentes turnos.

Al culminar con esta segunda fase, se vuelve a obtener como resultado el vector de asignaciones binario *asignaciones_mdt*, la tabla que expresa el calendario de una forma más amigable, las matrices de diferencia de días y turnos entre UC, la matriz métrica y métrica escalar. Dada la naturaleza aleatoria de la segunda fase, dichas salidas varían cada vez que se ejecuta el programa.

4.3.3. Fase 3

La figura [Figura XXV](#) ilustra el diagrama de decisión correspondiente a la tercera y última fase del modelo, el cual se ejecuta de manera independiente a las primeras 2 fases del mismo.

Esta fase posee como atributo diferencial la inclusión de una entrada adicional correspondiente al calendario predefinido por el usuario. Dichas asignaciones se utilizarán como base y se verán inalteradas al correr el modelo. En resumen, a partir de asignaciones parciales dadas por el usuario, el objetivo de la tercera fase resulta entonces en asignar todas las UC restantes en el calendario. El flujo de decisiones presenta similitudes con la fase 2, con la excepción de que en este contexto se aprovecha la aleatoriedad inherente en la salida. Se repite el procedimiento con el objetivo de explorar diversas posibilidades y así determinar el calendario que maximice la métrica considerando las restricciones.

El proceso de toma de decisiones inicia estableciendo dos condiciones de parada: una iteración máxima de 40 y un umbral admisible de métrica dado por el usuario. Si alguna de estas dos condiciones se cumple, el modelo concluye la ejecución del algoritmo. Además, dado que al principio no se dispone de ningún calendario completo provisional, se inicia la variable *asignaciones_mdt* tentativa, así como la métrica correspondiente, como nula.

A continuación, se repite un proceso análogo al de la fase 2 para todas las UC que no han sido asignadas según el calendario proporcionado por el usuario. Posteriormente, se obtiene un calendario provisional; en caso de que dicho calendario tenga una métrica superior a la máxima previamente obtenida, se actualiza el calendario final utilizando la variable *asignaciones_mdt* obtenida en la iteración.

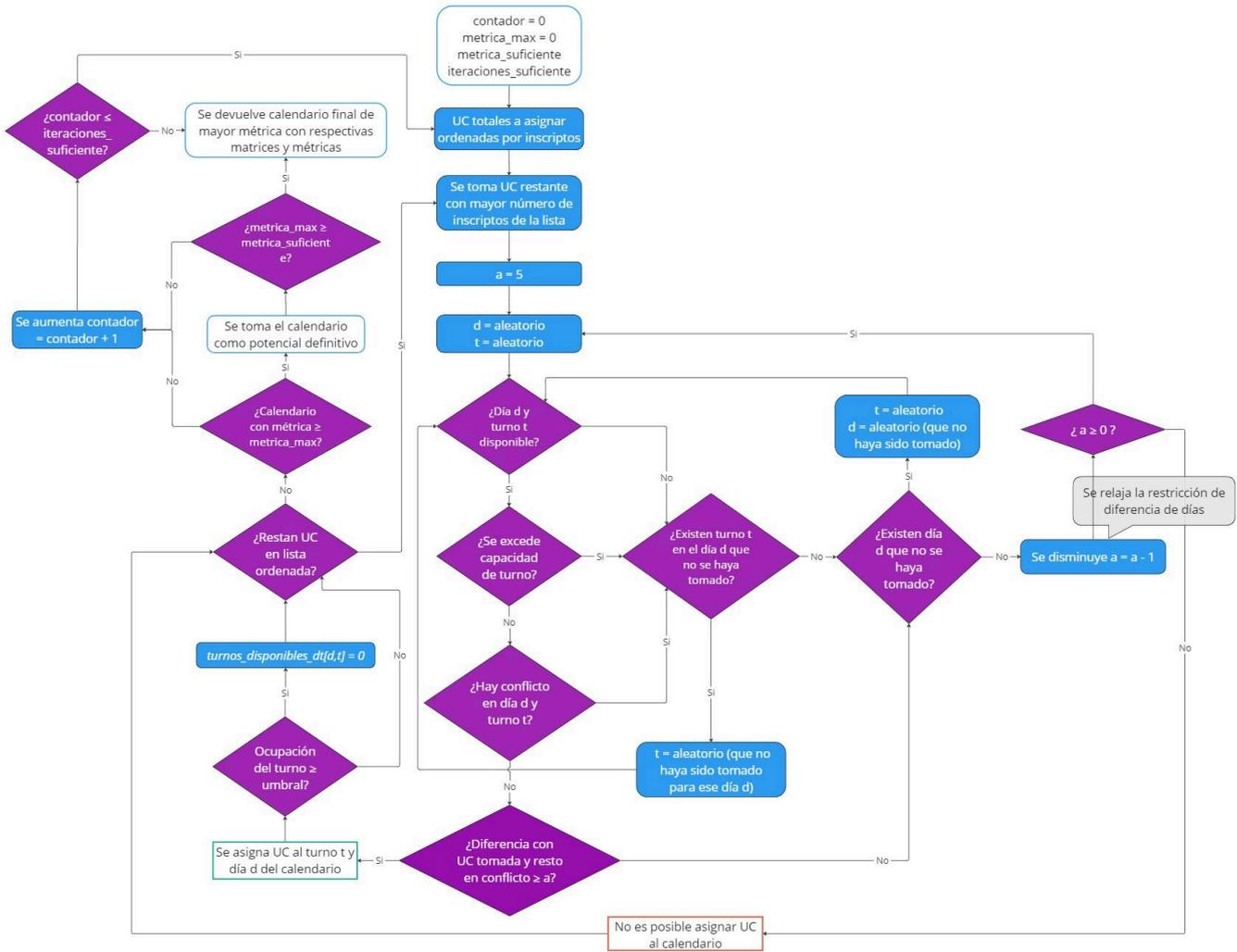


Figura XXV: Diagrama de decisión definitivo de tercera fase

La fase progresa mediante iteraciones hasta alcanzar el número máximo de iteraciones establecido o hasta obtener un posible calendario final con una métrica que supere el umbral definido como suficiente.

Al concluir, la fase 3 devuelve las mismas salidas de la fase 1 y 2 correspondientes para el calendario con mayor métrica obtenido: la tabla de asignaciones, la matriz de diferencia de días y turnos entre UC, la matriz métrica y la métrica escalar.

4.4. Excepciones

En la etapa de análisis y definición del problema, la asistente académica reafirmó que el armado de parciales es un proceso iterativo que presenta muchas variables y disponibilidades en juego, tantas como personas involucradas, lo que conlleva a una cuota de entradas manuales sujetas a una confección casi artesanal. Se dan casos donde es necesario definir bajo solicitud el día de un parcial ante pedido del responsable de la UC por enfermedad, licencia de docentes, tiempos de corrección o incluso superposición de docentes en diferentes UCs. Además se plantea la necesidad de la replanificación con el calendario en curso, ante cualquier inconveniente de fuerza mayor y de origen por lo

general exógeno, como pueden ser paros de transportes, huelgas y advertencias climáticas, entre otras. Para ello se desarrolla la fase 3 que contempla los casos donde parte del calendario ya esté dado, es decir, algunas unidades curriculares ya fueron asignadas a turnos y días por el usuario, y se quiera asignar el resto de UC.

Se supone el siguiente caso, donde se tiene el calendario de la [Tabla XVI](#), el cual puede ser resultado del programa o no.

En el contexto de un evento inesperado, el décimo día del calendario se ve afectado en términos de su disponibilidad. En este día, previamente programado, se había realizado la asignación de las unidades curriculares "CÁLCULO DIFERENCIAL E INTEGRAL EN VARIAS VARIABLES" y "CÁLCULO VECTORIAL". Sin embargo, debido a las circunstancias imprevistas, se hace necesario llevar a cabo una nueva asignación de estas unidades curriculares.

Es importante resaltar que en este punto temporal, los estudiantes se encuentran adentrados en el período de parciales (línea punteada en [Tabla XVII](#)), lo que implica que adelantar la realización de los exámenes parciales correspondientes a estas dos asignaturas no representa una opción viable. Esta restricción se basa en la consideración de que los estudiantes que cursan dichas unidades curriculares pueden carecer de la flexibilidad necesaria para reorganizar sus horarios de estudio de manera inmediata.

Por lo tanto, se enfrenta el desafío de llevar a cabo una nueva asignación de las unidades curriculares afectadas, teniendo en cuenta las restricciones de tiempo y las limitaciones en la disponibilidad de los estudiantes para realizar cambios sustanciales en sus agendas de estudio.

El problema se reduce entonces a intentar asignar estas unidades curriculares entre el día 11 y 15.

En esta situación, el usuario puede hacer uso de la fase 3 del modelo, el cual toma como entrada un calendario predefinido, así con días y turnos disponibles, no necesariamente iguales a los imputados en las primeras 2 fases, con el objetivo de obtener una buena salida en términos de métrica, asegurando la no conflictividad.

Dado que no se quiere que se asignen UC en días anteriores al día 10 (afectado por un evento inesperado), todos estos días se cargan como no disponibles, por ende el parámetro de *turnos_disponibles_dt* queda con la forma:

- $0 \forall d / d \leq 10$
- $0 \text{ si } (d, t) \in [(13, 1), (13, 2), (14, 1), (14, 2), (15, 3)]$
- La capacidad del turno en otro caso

Tabla XVI: Calendario a ser modificado⁴

	1	2	3
1	FISICA 1	MECANICA NEWTONIANA	
2			
3		GEO. Y ALGEBRA LINEAL 1	GEO. Y ALGEBRA LINEAL 2 INT A LAS CIENCIAS DE MAT.
4	ELECTROTÉNICA 1	COMP. MECANICO MAT.	
5			PPIOS. QUIMICA GRAL. INT. PREV. RIESGOS LAB.
6	CÁL. DIF. E INT. EN UNA VAR.		PROB. Y ESTADISTICA INT. INVES. OPERACIONES ADMIN. DE OPERACIONES
7			
8	GESTIÓN DE MANT. ADMIN. GRAL. PARA ING.		
9			
10	CÁL. DIF. E INT. VARIAS VAR.	CALCULO VECTORIAL	
11			
12		PROGRAMACIÓN 2	TALLER GRÁFICO A FUND. DE ROB. IND. FEN. DE TRANSPORTE
13			FÍSICA 2 ELEMENTOS GEST. LOG. INSTR. INDUSTRIAL
14			FÍSICA EXPERIMENTAL 1 GESTIÓN RRHH.
15		PROGRAMACIÓN 2 ELEMENTOS MEC. FLUIDOS ING. REAC. QUIMICAS	

⁴ En verde, las unidades curriculares con semestre sugerido menor a 5 y en naranja, las restantes. Esta misma nomenclatura se utiliza a lo largo de todo el informe.

Tabla XVII: Calendario con día a modificar

	1	2	3
1	FISICA 1	MECANICA NEWTONIANA	
2			
3		GEO. Y ALGEBRA LINEAL 1	GEO. Y ALGEBRA LINEAL 2 INT A LAS CIENCIAS DE MAT.
4	ELECTROTÉCNICA 1	COMP. MECANICO MAT.	
5			PPIOS. QUIMICA GRAL. INT. PREV. RIESGOS LAB.
6	CÁL. DIF. E INT. EN UNA VAR.		PROB. Y ESTADISTICA INT. INVES. OPERACIONES ADMIN. DE OPERACIONES
7			
8	GESTIÓN DE MANT. ADMIN. GRAL. PARA ING.		
9			
10	CÁL. DIF. E INT. VARIAS VAR.	CALCULO VECTORIAL	
11			
12		PROGRAMACIÓN 2	TALLER GRÁFICO A FUND. DE ROB. IND. FEN. DE TRANSPORTE
13			FÍSICA 2 ELEMENTOS GEST. LOG. INSTR. INDUSTRIAL
14			FÍSICA EXPERIMENTAL 1 GESTIÓN RRHH.
15		PROGRAMACIÓN 2 ELEMENTOS MEC. FLUIDOS ING. REAC. QUIMICAS	

En términos matriciales, el parámetro tiene la forma de la [Tabla XVIII](#).

Se hace un estudio de las excepciones aplicado a un conjunto de datos completo en el subcapítulo [6.3. Análisis complementarios](#).

Tabla XVIII : *turnos_disponibles_dt* modificado para tratar excepción

	1	2	3
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	0	0
11	1.500	2.100	2.100
12	1.500	2.100	2.100
13	0	0	0
14	0	0	0
15	2.100	2.100	0

4.5. Validación del modelo

Con el objetivo de validar el correcto comportamiento del modelo, se tomó un conjunto de datos reducidos en tamaño, de forma que su comportamiento y resultados sean más sencillos de analizar. Específicamente, se decidió utilizar como entradas a las unidades curriculares de Ingeniería de Producción obligatorias y electivas, dictadas en el semestre impar. Asimismo, la matriz que especifica la disponibilidad y capacidad de los turnos en el calendario, *turnos_disponibles_dt*, fue adaptada a partir del calendario del primer semestre del 2023.

Los datos de entrada para la validación del modelo son los siguientes:

- Cantidad de unidades curriculares (M): 37
- Cantidad de días (D): 15
- Cantidad de turnos por día (T): 3
- Capacidad por turno: entre 1000 y 2100
- Disponibilidad de turnos: Se consideran todos los turnos disponibles salvo:
 - el tercer turno del día 1
 - todos los turnos del día 2
 - el segundo turno del día 5
 - todos los turnos del día 7

- el tercer turno del día 8
- los primeros dos turnos del día 13 y 14
- el último turno del día 15

Las excepciones en los turnos disponibles se establecieron de manera arbitraria, basados en calendarios reales.

El set de datos se encuentra presente en el capítulo [10. Anexos](#).

Al correr la primera fase del algoritmo, se obtiene como salida el calendario ilustrado en la [Tabla XIX](#).

Se concluye que el algoritmo responde a la primera fase de forma esperada, se destacan los siguientes puntos:

1. Ninguna unidad curricular se asignó a turnos no disponibles
2. Se asignaron 21 de 37 unidades curriculares (57% de UC y 76% de inscriptos)
3. Ningún par de UC con estudiantes en común se asignaron en un mismo turno, de hecho, tampoco se asignaron en un mismo día
4. De las UC asignadas, 17 tienen una diferencia mínima de 3 días entre otras UC en conflicto, mientras que 4 tienen una diferencia mínima de 2 días, la cual es la distancia mínima que permite esta primera fase
5. En promedio, la diferencia de días entre UC en conflicto es de 5,7 días
6. No se excede capacidad de estudiante en ningún turno
7. La distribución de UC fue equitativa
8. El tiempo de cómputo fue en promedio de 5 segundos⁵

A grandes rasgos, el resultado de esta primera fase fue positivo, pues dio como salida una primera asignación factible de unidades curriculares. Ahora bien, partiendo de este lote de UC asignadas en el calendario, se tiene como objetivo encontrar turnos para aquellas a las que no se le ha podido otorgar un turno en la primera fase, al ejecutar la fase 2 del modelo.

Se obtiene el resultado de la [Tabla XX](#), el cual toma como base las asignaciones anteriores. Se recuerda que las UCs asignadas en fase 2 varían la asignación correspondiente cada vez que se corre el programa dada la naturaleza aleatoria de la fase. Puede resultar útil visualizar el resultado como se ilustra en la [Tabla XXI](#) en modalidad calendario.

⁵ Los tiempos de cómputo en Google Colab no dependen de las especificaciones de la PC, ya que se ejecutan en los servidores en la nube de Google. La velocidad de conexión a internet puede influir en la carga y descarga de datos, pero no en la ejecución del programa.

Tabla XIX: Calendario de salida de la primera fase

ID	Nombre	Día	Turno
[14]	PROGRAMACIÓN 2	3	1
[12]	TALLER GRÁFICO A	3	2
[32]	INT. A LA PREVENCIÓN RIESGOS	3	3
[13]	TALLER GRÁFICO B	6	2
[15]	PROGRAMACIÓN 1	6	2
[7]	MECÁNICA NEWTONIANA	9	1
[8]	FÍSICA 1	9	2
[22]	FUNDAMENTOS ROB. INDUSTRIAL	9	3
[33]	FEN. DE TRANSP. EN ING. PROC.	9	3
[5]	CÁLCULO DIF. E INT. EN VARIAS VAR.	12	1
[6]	CÁLCULO VECTORIAL	12	1
[4]	CÁLCULO DIF. E INT. EN UNA VAR.	12	2
[23]	ELEMENTOS DE MEC. DE FLUIDOS	12	3
[25]	GESTIÓN DE MANTENIMIENTO	12	3
[34]	TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA	12	3
[19]	OPTIMIZACIÓN BAJO INCERTIDUMBRE	14	3
[36]	DINÁMICA Y CONTROL DE PROCESOS	14	3
[1]	PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA	15	1
[17]	INT. A LA INVEST. DE OPERACIONES	15	1
[35]	ING. DE LAS REACCIONES QUÍMICAS	15	1
[2]	GEOMETRÍA Y ÁLGEBRA LINEAL 1	15	2
[0]	MATEMÁTICA DISCRETA 1	-	-
[3]	GEOMETRÍA Y ÁLGEBRA LINEAL 2	-	-
[9]	FÍSICA 2	-	-
[10]	FÍSICA 3	-	-
[11]	FÍSICA EXPERIMENTAL 1	-	-
[16]	GESTIÓN DE RECURSOS HUMANOS	-	-
[18]	PRINCIPIOS DE LA QUÍMICA GENERAL	-	-
[20]	INT. CIENCIA DE LOS MATERIALES	-	-
[21]	COMPORTAMIENTO MECÁNICO	-	-
[24]	ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES	-	-
[26]	ADMINISTRACIÓN GRAL. PARA ING.	-	-
[27]	GESTIÓN DE CALIDAD	-	-
[28]	ELECTROTÉCNICA I	-	-
[29]	ELEMENTOS DE LA GESTIÓN LOGÍSTICA	-	-
[30]	INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL	-	-
[31]	FUNDAMENTOS DE LA ING. SOFTWARE	-	-

Tabla XX: Calendario de salida de la segunda fase

ID	Nombre	Día	Turno
[0]	MATEMÁTICA DISCRETA 1	1	1
[27]	GESTIÓN DE CALIDAD	1	2
[31]	FUNDAMENTOS DE LA ING. SOFTWARE	1	2
[14]	PROGRAMACIÓN 2	3	1
[12]	TALLER GRÁFICO A	3	2
[32]	INT. A LA PREVENCIÓN RIESGOS	3	3
[11]	FÍSICA EXPERIMENTAL 1	4	2
[29]	ELEMENTOS DE LA GESTIÓN LOGÍSTICA	4	3
[24]	ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES	5	1
[18]	PRINCIPIOS DE LA QUÍMICA GENERAL	5	3
[13]	TALLER GRÁFICO B	6	2
[15]	PROGRAMACIÓN 1	6	2
[3]	GEOMETRÍA Y ÁLGEBRA LINEAL 2	8	1
[20]	INT. CIENCIA DE LOS MATERIALES	8	1
[7]	MECÁNICA NEWTONIANA	9	1
[8]	FÍSICA 1	9	2
[22]	FUNDAMENTOS ROB. INDUSTRIAL	9	3
[33]	FEN. DE TRANSP. EN ING. PROC.	9	3
[21]	COMPORTAMIENTO MECÁNICO	10	2
[30]	INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL	10	2
[28]	ELECTROTÉCNICA I	11	1
[9]	FÍSICA 2	11	3
[5]	CÁLCULO DIF. E INT. EN VARIAS VAR.	12	1
[6]	CÁLCULO VECTORIAL	12	1
[4]	CÁLCULO DIF. E INT. EN UNA VAR.	12	2
[23]	ELEMENTOS DE MEC. DE FLUIDOS	12	3
[25]	GESTIÓN DE MANTENIMIENTO	12	3
[34]	TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA	12	3
[16]	GESTIÓN DE RECURSOS HUMANOS	13	3
[26]	ADMINISTRACIÓN GRAL. PARA ING.	13	3
[10]	FÍSICA 3	14	3
[19]	OPTIMIZACIÓN BAJO INCERTIDUMBRE	14	3
[36]	DINÁMICA Y CONTROL DE PROCESOS	14	3
[1]	PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA	15	1
[17]	INT. A LA INVEST. DE OPERACIONES	15	1
[35]	ING. DE LAS REACCIONES QUÍMICAS	15	1
[2]	GEOMETRÍA Y ÁLGEBRA LINEAL 1	15	2

Tabla XXI: Resultado visual de asignaciones tras primeras 2 fases⁶

	1	2	3
1	MATEMÁTICA DISCRETA 1	GESTIÓN DE CALIDAD FISO	
2			
3	PROGRAMACIÓN 2	TALLER GRÁFICO A	IPRL
4		FÍSICA EXP. 1	ELEMENTOS DE GEST. LOG.
5	ADM. DE OPERACIONES		PPIOS. QUIMICA GRAL.
6		TALLER GRÁFICO B PROGRAMACIÓN 1	
7			
8	GEO. Y ALG. LINEAL 2 INT. A LA CIENCIA DE MAT.		
9	MECÁNICA NEWTONIANA	FÍSICA 1	FUND. DE ROBÓTICA IND. FEN. DE TRA. EN ING. DE PRO.
10		CMM1 INDUMENTACIÓN IND.	
11	ELECTROTÉCNICA 1		FÍSICA 2
12	CÁLCULO DIVV CÁLCULO VECTORIAL	CÁLCULO DIV	EL. DE MEC. DE LOS FLUIDOS GESTIÓN DE MANT. TRAN. DE CALOR Y MASA 2
13			G. D. L. RRHH EN LA P. DE B. Y S. ADM. GRAL. PARA ING.
14			FÍSICA 3 OPT. BAJO INC. DINÁMICA Y CONTROL DE PROC.
15	PROB. Y ESTADÍSTICA INT. A LA INV. DE OPERACIONES ING. DE LAS REAC. QUÍMICAS 1	GEO. Y ALG. LINEAL 1	

⁶ Dicha visualización se expondrá en las siguientes salidas del proyecto, para facilitar la comprensión.

Como era de esperarse, el set completo de unidades curriculares logró ser asignado. Asimismo, ningún turno se vio excedido en capacidad. La [Tabla XXII](#) muestra el número de estudiantes asignados por turno:

Tabla XXII: Cantidad de estudiantes asignados por turno

	1	2	3
1	880	428	0
2	0	0	0
3	603	1.000	36
4	0	270	47
5	31	0	192
6	0	1.800	0
7	0	0	0
8	754	0	0
9	478	1.741	316
10	0	209	0
11	245	0	272
12	956	1.874	402
13	0	0	473
14	0	0	532
15	1.456	2.079	0

Se desprende entonces la [Tabla XXIII](#), que indica el porcentaje de utilización para cada turno mediante un mapa de calor, donde verde significa muy baja ocupación (0 a 19%), baja ocupación (20 a 50%), rojo ocupación media (51 a 80%) y violeta ocupación alta (81 a 100%):

Tabla XXIII: Porcentaje de ocupación por turno

	1	2	3
1	42%	20%	
2			
3	60%	100%	4%
4	0%	27%	5%
5	1%		9%
6	0%	86%	0%
7			
8	36%	0%	
9	23%	83%	15%
10	0%	14%	0%
11	16%	0%	18%
12	46%	89%	19%
13			23%
14			25%
15	69%	99%	

Asimismo, respecto al distanciamiento de las unidades curriculares en conflicto, se infieren los siguientes datos:

1. Ninguna UC tiene distancia menor a 1 día entre otras UC en conflicto, es decir, ningún estudiante debe rendir 2 parciales en un mismo día.
2. En promedio, la diferencia de días entre UC en conflicto es de 5,5.
3. Para las UC que presentan una distancia mínima de 1 día con otra en conflicto, se tiene un promedio de 20 estudiantes que se encuentran en esta situación.
4. El máximo número de estudiantes que rinden UC en conflicto con una diferencia de 1 día es de 108, y se da entre FÍSICA 1 y GEOMETRIA Y ALGEBRA LINEAL 2, presentando particularmente una diferencia de 4 turnos. Se destaca que dichas UC no corresponden al mismo semestre sugerido en ninguna currícula sugerida de las carreras de grado.

5. Relevamiento y generación de datos

La herramienta propuesta requiere la incorporación de múltiples datos esenciales para su adecuado funcionamiento. Estos datos incluyen, pero no se limitan a, la matriz de concurrencia y a la información de las unidades curriculares tal como sus respectivos códigos, nombres, créditos asociados y la cantidad de estudiantes inscriptos en cada una de ellas. Además, se hace necesario incluir detalles sobre la estructura temporal, como el número total de días en el calendario académico, así como la cantidad de turnos disponibles en cada día y la disponibilidad específica de dichos turnos. Estos datos, en su conjunto, conforman una base sólida para la ejecución y validación del modelo en cuestión, permitiendo así su aplicación efectiva en el ámbito académico.

5.1. Metodología

El procedimiento empleado para llevar a cabo el relevamiento y la recopilación de datos académicos se caracterizó por una colaboración continua con el tutor del proyecto Adrián Ferrari, quien desempeñó un rol fundamental como orientador. Además se destacan los intercambios con la unidad de enseñanza y la asistente académica, así como las consultas realizadas a los referentes de bedelías. También se recurre a la consulta y revisión de los recursos de información disponibles en el Entorno Virtual de Aprendizaje (EVA) de la Fing, así como en la página web oficial. Este enfoque mixto de recopilación de datos permitió obtener información relevante para el desarrollo de la investigación de manera fluida a lo largo de todo el proceso.

Por otro lado se trabajó en la investigación de los estudiantes como usuarios de la solución a través de una encuesta que brindó datos significativos para el diseño del modelo y además visualizó conflictos e inconsistencias de los calendarios históricos.

5.2. Datos obtenidos

La matriz de concurrencia, tal como se mencionó en el subcapítulo [4.1.1 Parámetros](#), hace referencia a los estudiantes que cursan varias unidades curriculares de forma simultánea en un mismo semestre. Esta matriz fue diseñada especialmente para el desarrollo del modelo computacional cuyos datos fueron solicitados al equipo de Unidad de Enseñanza, específicamente a Daniel Alessandri.

Respecto a cada unidad curricular, el nombre, código y créditos se obtuvo de la currícula sugerida de cada una de las carreras de Ingeniería consideradas para este proyecto:

- Ingeniería Civil
- Ingeniería de Producción
- Ingeniería Eléctrica
- Ingeniería en Computación
- Ingeniería en Sistemas de Comunicación
- Ingeniería Industrial Mecánica
- Ingeniería Naval
- Ingeniería Química

La cantidad de días y turnos disponibles en el calendario de parciales considerado en el modelo fue brindado por Ema Soboredo, asistente en el área de enseñanza de grado.

5.3. Dificultades encontradas

En el proceso de recopilación de datos para la presente investigación, se identificaron dos dificultades principales a destacar. La primera de ellas refiere a la obtención de la matriz de concurrencia, la cual representa un elemento fundamental en la construcción del modelo. Esta matriz se compone de datos relativos a la inscripción de estudiantes en diversas UC, desglosados por cada estudiante. Sin embargo, esta metodología de recolección de datos planteó ciertas consideraciones éticas y legales en relación con la privacidad de los datos personales de los estudiantes, en consonancia con lo dispuesto en la Ley de Protección de Datos Personales (N° 18331), que establece la protección de dichos datos. En este sentido, se reconoció que es innecesario conocer la identidad específica de los estudiantes, y en su lugar, se solicitó que se proporcione un identificador único que permitiera la elaboración de la matriz sin revelar información confidencial. Sin embargo, se logró superar esta dificultad gracias a la colaboración de la contraparte, que llevó a cabo los cálculos requeridos y proporcionó la matriz de concurrencia final, garantizando así el cumplimiento de las normativas de privacidad de datos (Los datos personales y su protección, 2012).

Sin embargo, para el armado de esta matriz de concurrencia o conflicto fue necesario suministrarle al equipo de Bedelías los códigos de cada unidad curricular. Los mismos fueron recopilados de la página del SGAE de Bedelías UdelaR, EVA y el sitio oficial de la FIng a partir de las currículas sugeridas. En ciertos casos, dichas fuentes presentaron códigos diferentes para una misma UC, por lo cual no fue posible obtener códigos actualizados correspondientes a todas las UC en cuestión. Esto generó que algunas UC con menos de 100 inscriptos no pudieran ser incluidas en la matriz de concurrencia y por ende, no pudieran ser consideradas a la hora de realizar los análisis y comparaciones. Como contingencia, se sustituyó ante estos casos a las UC con UCs alternativas con cantidad de inscriptos similares, cuyos datos sí pudieron ser proporcionados por Bedelías. En caso de no disponer dato alguno, para ingresarlas en la *matriz_concurrencia_mm* fue necesario buscar en cada currícula sugerida cuáles son las potenciales UC concurrentes en dicho semestre, para todas las carreras, para así insertar en las celdas correspondientes un 50% de los inscriptos que figuran asociados a la UC en cuestión como aproximación razonable.

Como consecuencia de la dificultad anterior y la recopilación de información adicional desde las currículas sugeridas de cada carrera, se identifica que la FIng no tiene centralizadas sus currículas sugeridas como tampoco presenta una sistematización de las mismas o un formato homólogo que permita compararlas con facilidad. En algunos casos se encuentran en EVA, otras en la web de FIng o incluso en sitios webs de cada carrera dentro de su plan de estudios. Fue necesario realizar un único documento con las currículas para la búsqueda de potenciales concurrencias de manera manual.

Con el propósito de determinar las restricciones, se llevó a cabo una encuesta dirigida a los estudiantes, y así identificar los factores que valoran de manera más significativa al enfrentarse a un período de evaluaciones. Esta iniciativa se emprendió para garantizar que el modelo refleje de manera precisa las preferencias y necesidades de los estudiantes.

6. Análisis de resultados

Después de validar el modelo mediante la utilización de un conjunto de datos limitado, se procede a examinar ahora su alcance completo, empleando la totalidad de los datos disponibles y buscando replicar fielmente la situación de uso real, modelando un calendario de parciales completo.

6.1. Análisis del modelo completo

Para el análisis del modelo completo, se pretende modelar un caso real correspondiente a los primeros parciales del semestre impar de todas las UC correspondientes a las carreras de Ingeniería de la FIng. Esto permitirá visualizar todo el potencial del modelo.

6.1.1 Entradas

Para proceder a modelar el calendario se definen inicialmente los datos de entrada. Los mismos se basan en los datos históricos de calendarios reales e información disponibilizada por la Unidad de Enseñanza.

- Cantidad de unidades curriculares (M): 49
- Cantidad de días (D): 15
- Cantidad de turnos por día (T): 3
- Semestre preferencia último turno: 5
- Capacidad por turno: entre 1.500 y 2.100 se inserta de manera variable por cada turno
- Cantidad UC por turno (fase1): 3
- Porcentaje capacidad: 0,8
- Disponibilidad de turnos: Se consideran todos los turnos disponibles salvo:
 - el tercer turno del día 1
 - todos los turnos del día 2, 9, 10, 13 y 14
 - el segundo turno del día 5
 - el último turno del día 8
 - los últimos dos turnos del día 15

Se procede entonces con estos datos a armar las matrices de entrada en formato de valores separados por coma siguiendo las pautas indicadas en el Manual de Usuario que figura en los Anexos.

- *turnos_disponibles_dt*
- *matriz_concurrencia_mm*
- *uc_masterdata_mx*

El set de datos se encuentra presente en el capítulo [10. Anexos](#).

6.1.2 Performance del modelo

Se ejecuta la Versión 8.1 del programa en Colab que contiene Fase 1 y Fase 2 del modelo, obteniendo los resultados en menos de 5 segundos de cómputo. El comportamiento del modelo es el esperado cumpliendo los siguientes puntos:

- Ninguna unidad curricular se asignó a turnos no disponibles
- Ningún par de UC con estudiantes en común se asignaron en un mismo turno
- Únicamente 4 pares de UC con conflicto se asignaron en un mismo día
- En promedio, la diferencia de días entre UC en conflicto es de 2 días
- No se excede capacidad de estudiante en ningún turno
- La distribución de UC fue equitativa

6.1.2.1 Fase 1

El calendario de parciales obtenido como salida del modelo computacional logró asignar 34 de las 49 UC totales en la fase 1, correspondiente a una tasa de asignación de un 71%.

Es posible visualizar que dada la restricción *hard* o dura de fase 1 sobre la distancia de 3 días entre UC en conflicto no se logra encontrar días disponibles para todas las UCs. Las UC pendientes para fase 2 son las siguientes:

- GEOMETRÍA Y ÁLGEBRA LINEAL 2
- CÁLCULO VECTORIAL
- FÍSICA 3
- FÍSICA 2
- ELEMENTOS DE MECÁNICA DE LOS FLUIDOS
- PRINCIPIOS DE QUÍMICA GENERAL
- INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA DE MATERIALES
- COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS MATERIALES 1
- DINÁMICA Y CONTROL DE PROCESOS
- INT. AL CONTROL INDUSTRIAL
- ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES
- ELEMENTOS DE MÁQUINAS
- MECÁNICA ESTRUCTURAL
- INTRO. A LA MECÁNICA DE SUELOS
- METALURGIA DE TRANSFORMACIÓN

Se visualiza en la [Figura XXVI](#) que la cantidad de pasos acumulados en fase 2 se aproxima a una recta, mostrando un número de pasos por UC prácticamente estable. Cada UC conlleva en promedio aproximadamente 60 pasos siendo “i” la cantidad de pasos.

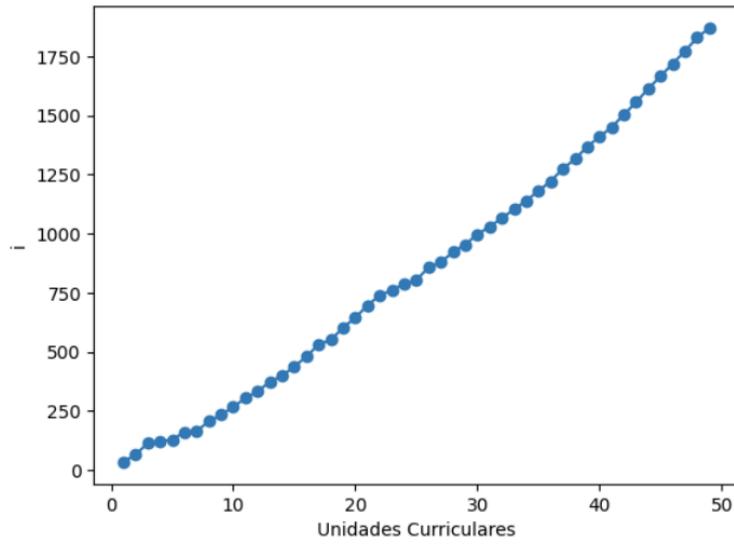


Figura XXVI: Pasos acumulados modelo completo fase 1

El calendario obtenido por fase 1 se ejemplifica en la [Tabla XXIV](#).

Tabla XXIV: Calendario asignación fase 1 modelo completo

	1	2	3
1	MATERIALES Y ENSAYOS	PROGRAMACIÓN 2	
	ESTRUCTURAS DE ACERO	INTRO A LA ING. DE SOFT.	
		ELECTROTÉCNICA 1	
2			
3			
4	FÍSICA 1		
5	MECÁNICA NEWTONIANA		TECNOLOGÍA DE HORMIGÓN
			TRANSFERENCIA DE CALOR 2
			FEN. DE TR. EN ING. DE PROC.
6			
7		HORMIGÓN ESTRUCTURAL 1	TEORÍA DE CIRCUITOS
			REDES DE DATOS 2
			TECNOLOGÍA Y SERV. IND. 1
8	CÁLCULO DIVV	CÁLCULO DIV	
	LÓGICA		
	ADM. GRAL. PARA ING.		
9			
10			
11	GEOMETRÍA Y ALG. LINEAL 1	SUBEST.EN MEDIA TENSIÓN	SEÑALES Y SISTEMAS
			DISEÑO DE PROC. QUÍMICOS
			TE. DE RE. Y SER. DE TELECOM
12	ENERGÍA 1 - COMBUSTIÓN	PROB. Y EST.	TRAN. DE CALOR Y MASA 2
	ELASTICIDAD	TEORÍA DE LENG.	GESTIÓN DE CALIDAD
	ELECTROTÉCNICA DE POT.	ANTENAS Y PROPAGACIÓN	INGENIERÍA BIOQUÍMICA
13			
14			
15	MATEMÁTICA DISCRETA 1		
	INT. A LA INV. DE OPERACIONES		

6.1.2.2 Fase 2

En fase 2 el modelo computacional logró asignar las 15 UC restantes de las 49 UC totales, alcanzando una tasa de asignación de 100%.

Se visualiza en la [Figura XXVII](#) que la cantidad de pasos acumulados en fase 2 también se aproxima a una recta lineal, mostrando un número de pasos por UC prácticamente estable. Sin embargo los pasos por UC son en promedio 366 pasos siendo “i” la cantidad de pasos, es decir: 6 veces más la cantidad de pasos requeridos por la fase 1.

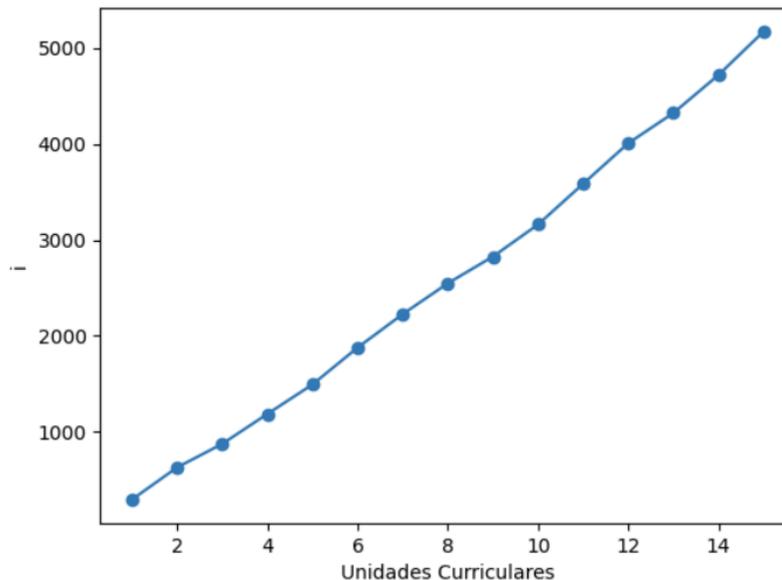


Figura XXVII: Pasos acumulados modelo completo fase 2

6.1.3. Salidas

Como salidas del modelo ejecutado se guardan en Drive 12 matrices descriptivas del proceso, de las cuales las podemos categorizar en matrices principales, matrices de apoyo y matrices de proceso.

- Matrices principales:
 - *Asignaciones_fase2*
- Matrices de apoyo
 - *Matriz_métrica_fase2*
 - *Diferencia_dias_concurrencia_fase2*
 - *Diferencia_turnos_concurrencia_fase2*
- Matrices de proceso
 - *Asignaciones_fase1*
 - *Matriz_métrica_fase1*
 - *Diferencia_dias_fase2*
 - *Diferencia_turnos_fase2*
 - *Diferencia_dias_fase1*

- *Diferencia_dias_concurrencia_fase1*
- *Diferencia_turnos_concurrencia_fase1*
- *Diferencia_turnos_fase1*

La matriz *Asignaciones_fase2* es la matriz principal que representa el calendario mientras las matrices de proceso son matrices de apoyo para comprender la calidad del calendario obtenido. Por otro lado las matrices de proceso buscan dar trazabilidad y transparencia al proceso de ejecución mostrando ciertos indicadores de manera parcial. La principal diferencia es que las matrices de proceso representan avances parciales, es decir: no aportan información sustancial sobre el resultado final sino de las etapas intermedias pudiendo establecer un control y entendimiento de qué sucede o cómo performa cada etapa. Por oposición las matrices de apoyo brindan información sobre el resultado de asignaciones de Fase 1 y 2 en conjunto. El calendario obtenido por las fases 1 y 2 se ejemplifica en la [Tabla XXV](#).

Notar que en el tercer turno del día 11 se encuentran 4 UC asignadas, esto no contradice las reglas de la fase 2 del modelo, dado que la misma no impone un total de UC por turno, como sí lo hace la fase 1.

En este caso la métrica es de 130.144 presentando una buena distribución de las UC asignadas. Las UC en conflicto que son asignadas en un mismo día en diferente turno, involucran en cada caso a menos de 40 estudiantes. A continuación se analizan los pares de UC en conflicto con superposición de día.

- PAR A
 - GEOMETRÍA Y ÁLGEBRA LINEAL 2
 - PRINCIPIOS DE QUÍMICA GENERAL

GEOMETRÍA Y ÁLGEBRA LINEAL 2 es una UC del segundo semestre con opción de cursado a contraturno y en este caso coincide en la currícula sugerida en semestre con PRINCIPIOS DE QUÍMICA GENERAL. Este caso se da para 41 estudiantes.

- PAR B
 - CONTROL INDUSTRIAL
 - INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA DE SOFTWARE

CONTROL INDUSTRIAL es una UC específica de Ingeniería Industrial mecánica del séptimo semestre, mientras INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA DE SOFTWARE es una UC específica de Ingeniería en Computación. Pueden superponerse por ser electivas. Este caso se da para 31 estudiantes.

- PAR C
 - ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES
 - GESTIÓN DE CALIDAD

ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES es una UC específica de Ingeniería de Producción del séptimo semestre, mientras GESTIÓN DE CALIDAD es una UC también de Producción pero del 5to semestre. Este caso se da para 10 estudiantes.

Tabla XXV: Calendario asignación fase 2 modelo completo

	1	2	3
1	MATERIALES Y ENSAYOS	PROGRAMACIÓN 2	
	ESTRUCTURAS DE ACERO	INTRO A LA ING. DE SOFT.	
	INT. AL CONTROL IND.	ELECTROTÉCNICA 1	
2			
3		MECÁNICA ESTR.	FÍSICA 3
			DINÁMICA Y CONTROL DE PROC.
4	FÍSICA 1	FÍSICA 2	COMP. MEC. DE LOS MAT. 1
5	MECÁNICA NEWTONIANA		TECNOLOGÍA DE HORMIGÓN
			TRANSFERENCIA DE CALOR 2
			FEN. DE TR. EN ING. DE PROC.
6	CÁLCULO VECTORIAL	METALURGIA DE TRANSF.	EL. DE MEC. DE LOS FLUIDOS
7	PRINCIPIOS DE QUÍMICA GRAL	HORMIGÓN ESTRUCTURAL 1	TEORÍA DE CIRCUITOS
		GEOMETRÍA Y ALGB LIN. 2	REDES DE DATOS 2
			TECNOLOGÍA Y SERV. IND. 1
8	CÁLCULO DIV	CÁLCULO DIV	ELEMENTOS DE MÁQUINAS
	LÓGICA		
	ADM. GRAL. PARA ING.		
9			
10			
11	GEOMETRÍA Y ALG. LINEAL 1	SUBEST. EN MEDIA TENSIÓN	SEÑALES Y SISTEMAS
		INTRO. A LA CIE. DE LOS MAT.	DISEÑO DE PROC. QUÍMICOS
			INT. A LA MEC. DE LOS SUELOS
			TEC. REDES Y SERV. DE TELECOM.
12	ENERGÍA 1 - COMBUSTIÓN	PROB. Y EST.	TRANS. DE CALOR Y MASA 2
	ELASTICIDAD	TEORÍA DE LENG.	GESTIÓN DE CALIDAD
	ELECTROTÉCNICA DE POT.	ANTENAS Y PROPAGACIÓN	INGENIERÍA BIOQUÍMICA
		ADM. DE OPERACIONES	
13			
14			
15	MATEMÁTICA DISCRETA 1		
	INT. A LA INV. DE OPERACIONES		

Sin considerar los casos mencionados anteriormente, existe un promedio de mínimo 2 días de diferencia entre UC en conflicto siguiendo la distribución del histograma de la [Figura XXVIII](#) que representa la cantidad de casos de UC que tienen entre 1 y 9 días calendario de diferencia con respecto a la UC en conflicto más cercana.

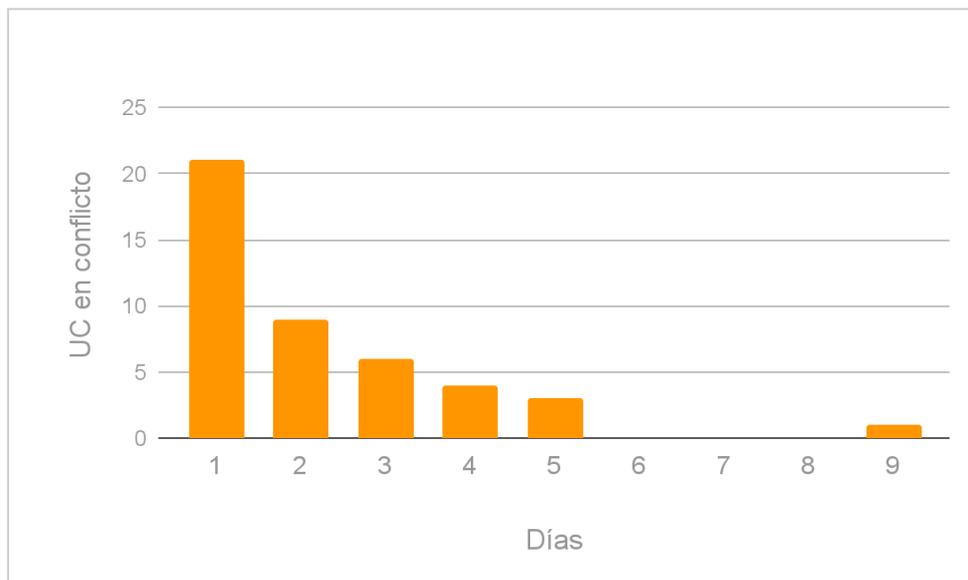


Figura XXVIII: Diferencia mínima para UC en conflicto

Por otro lado, existe un promedio de 8 días de diferencia entre UC en conflicto siguiendo la [Figura XXIX](#) que representa la distribución de los casos de las UCs en conflicto, tomando la UC con mayor distancia calendario.

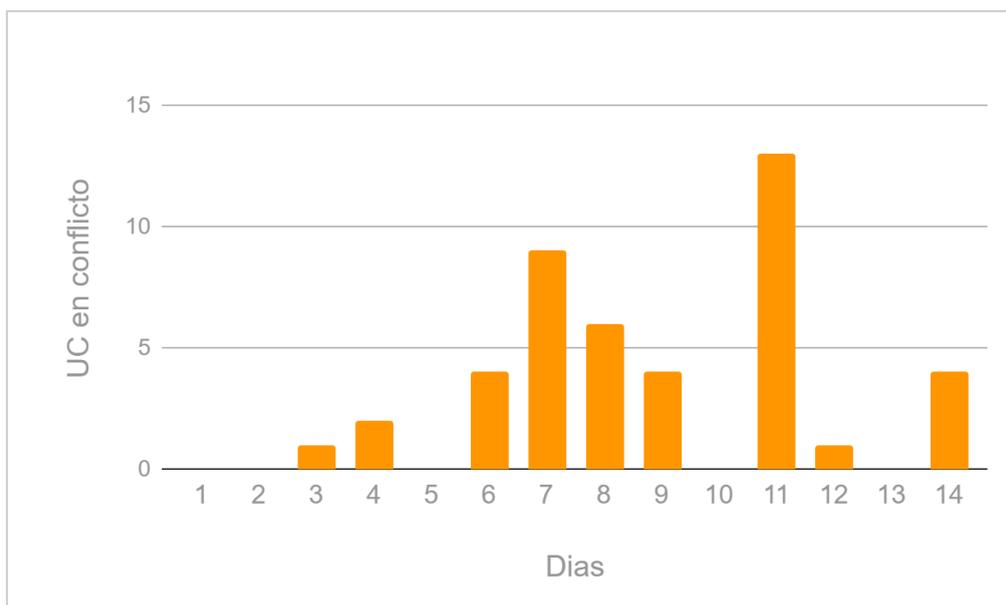


Figura XXIX: Diferencia máxima para UC en conflicto

La tasa de ocupación de los turnos es de un promedio de 37% de acuerdo a la [Tabla XXVI](#) y [Tabla XXVII](#).

Tabla XXVI: Ocupación de estudiantes por turno

	1	2	3
1	82	898	0
2	0	0	0
3	0	18	432
4	1.741	272	132
5	478	0	282
6	423	16	217
7	192	671	379
8	1.420	1.874	0
9	0	0	0
10	0	0	0
11	2.079	182	250
12	320	1.124	649
13	0	0	0
14	0	0	0
15	1.477	0	0

Tabla XXVII: Ocupación por turno en porcentajes

	1	2	3
1	4%	43%	
2			
3		1%	29%
4	83%	18%	9%
5	32%		19%
6	28%	1%	14%
7	13%	45%	
8	68%	80%	
9			
10			
11	99%	12%	17%
12	21%	75%	43%
13			
14			
15	98%		

6.2. Análisis de sensibilidad

Se lleva a cabo un análisis de sensibilidad de la herramienta utilizando como base al modelo completo, correspondiente a los primeros parciales del semestre impar del 2023, con el objetivo de determinar cómo diferentes valores afectan a la salida bajo un conjunto dado de suposiciones. Se busca comprobar la robustez del modelo al perturbar los datos de entrada y analizar su comportamiento bajo el uso de datos atípicos. Se destaca que el

desarrollo de modelos robustos asegura que las decisiones basadas en sus predicciones sean fiables y resilientes ante las incertidumbres inherentes a los datos y a los entornos de aplicación.

Particularmente, se compara la métrica de salida para las primeras 2 fases y porcentaje de UC asignadas en la primera de ellas al realizar variaciones de los siguientes parámetros:

1. porcentaje_capacidad
2. cantidad_uc_fase1
3. semestre_prefiere_utlimo_turno

En el primer set de comparaciones, se fija el parámetro *semestre_prefiere_utlimo_turno* a 5 y se varía *cantidad_uc_fase1* y *porcentaje_capacidad* de la forma que muestra la [Tabla XXVIII](#). Se compara la métrica y la cantidad de UC asignadas en la primera fase al variar umbral de capacidad y cantidad máxima de UC por turno de fase 1.

Tabla XXVIII: Análisis de sensibilidad variando cantidad_UC_fase1 y porcentaje_capacidad

		Cantidad UC a asignar fase 1					
		2		3		4	
		Métrica	UC	Métrica	UC	Métrica	UC
Porcentaje capacidad	1	131.516	33	134.136	34	133.078	34
	0,8	128.468	33	134.622	34	133.524	34
	0,6	132.584	33	133.266	37	135.796	37

Se tiene un promedio de métrica escalar de 132.999 y una desviación estándar asociada de aproximadamente 1.972, dicha desviación indica que existe una variación moderada de los datos, lo cual responde a un modelo robusto. Se destaca que la máxima métrica obtenida se da cuando el umbral de capacidad y la cantidad de unidades curriculares por turno de la primera fase son el mínimo y máximo, correspondientemente, de la comparación. El umbral de capacidad definido por la variable *porcentaje_capacidad* como mínimo en 0,6, permite que las últimas UC en ser asignadas se vean forzadas a alojarse en turnos principalmente vacíos, lo que repercute en una mayor dispersión de UC.

En cuanto a la cantidad de UC asignadas en la primera fase, se tiene un promedio de 34 UC (70% de las 49 totales a asignar), con una desviación estándar de aproximadamente 1,49 UC. Se subraya la tendencia hacia mayores métricas al lograr asignar más unidades curriculares en la primera fase.

Se procede con el análisis de estas mismas salidas al dejar invariado el parámetro de *cantidad_uc_fase1* en 3, mientras se alteran los parámetros de *semestre_prefiere_utlimo_turno* y *porcentaje_capacidad*. Se obtienen los resultados de la [Tabla XXIX](#). Se compara la variación de la métrica y cantidad de UC asignadas en la primera fase, al variar el umbral de capacidad y el semestre que prefiere último turno.

Tabla XXIX: Análisis de sensibilidad variando *semestre_prefiere_último_turno* y *porcentaje_capacidad*

		Semestre a partir del que prefiere último turno					
		4		5		6	
		Métrica	UC	Métrica	UC	Métrica	UC
Porcentaje capacidad	1	131.064	34	132.658	34	129.720	34
	0,8	134.402	34	131.954	34	136.520	34
	0,6	137.022	37	137.844	37	135.466	37

En cuanto a la métrica, se tiene aproximadamente un promedio de 134.072, con una desviación estándar de 2.697, lo que supone una dispersión mayor que en la comparación previa. La menor métrica de los casos testeados, se da cuando se determina el semestre bisagra a partir de *semestre_prefiere_último_turno* correspondiente al 6to semestre y el *porcentaje_capacidad* es máximo. Se identifica que 19 UC son sugeridas del 6to semestre en adelante, lo que deja a 39 UC que efectúan su búsqueda de la primera fase en el penúltimo turno. Asimismo, el porcentaje de capacidad en este caso es máximo, por lo que se promueve la acumulación de UC en pocos turnos, lo cual influye negativamente en la métrica.

Por otro lado, se tiene una clara línea que delimita la asignación de 34 y 37 UC en la primera fase dada en el pasaje de un porcentaje de capacidad de 0,6 a 0,8. Esto es concordante con los análisis anteriores, donde un umbral bajo repercute en una mayor asignación inicial.

Para explicar este comportamiento, se debe hacer énfasis en el funcionamiento de la primera fase y tomar algunos ejemplos de referencia. Supongamos el mínimo umbral posible, es decir 0, en este caso, el modelo asignará exactamente 24 UC dado que evaluará el turno una y solamente una sola vez (considerando que ninguna UC presenta más inscritos que el turno evaluado). Ahora bien, si se considera el umbral máximo, es decir 1, entonces ningún turno será bloqueado forzosamente tras cada asignación hecha por el programa. Considerando el caso límite, donde todas las UC presenten conflicto, se puede demostrar que el modelo asignará solamente 5 UC (la idea de la demostración es dividir el número total de días presentes en el calendario sobre los saltos de días realizados en la primera fase del modelo para las UC en conflicto, 3).

6.3. Análisis complementarios

El objetivo de esta sección es realizar comparaciones profundas entre un calendario de parciales real y el calendario obtenido como salida de la herramienta computacional. El análisis se efectúa para 2 casos reales del 2023.

6.3.1 Comparación calendario manual y computacional semestre impar

Para el análisis del modelo completo, se toma el caso correspondiente a los primeros parciales del semestre impar de 2023, que abarca un total de 49 unidades curriculares. Se

busca comparar el procedimiento del modelo manual con el del modelo computacional. Para ello, se asemejan las condiciones de manera que la comparación sea lo más objetiva posible.

Las condiciones de comparación para ambos modelos son:

- Se considera la misma matriz de concurrencia *matriz_concurrencia_mm*
- Se considera la misma disponibilidad y capacidad por turno en *turnos_disponibles_dt*
- Se consideran mismas UC, en donde 15 casos particulares son ingresados de forma manual en la matriz de concurrencia
- Se considera la misma *uc_masterdata_mx*: mismos inscriptos por UC.

Los datos de entrada para la comparación de los modelos son los siguientes:

- Cantidad de unidades curriculares (*M*): 49
- Cantidad de días (*D*): 15
- Cantidad de turnos por día (*T*): 3
- Capacidad por turno: entre 1500 y 2100
- Disponibilidad de turnos: Se consideran todos los turnos disponibles salvo:
 - todos los turnos del día 2, 9, 10, 13 y 14
 - el segundo turno del día 5 y 15
 - el último turno del día 1, 8 y 15

El set de datos se encuentra presente en el capítulo [10. Anexos](#) y se basa en el caso histórico del semestre impar 2023.

El calendario de parciales realizado de manera manual por la asistente académica del primer semestre del 2023 se exhibe en la [Tabla XXX](#).

El calendario de parciales obtenido como salida del modelo computacional logró a su vez asignar 34 de las 49 UC totales en la fase 1, correspondiente a una tasa de asignación de un 71%, y la totalidad de las mismas en la fase 2, lo que dio como resultado el calendario de la [Tabla XXXI](#).

Se busca ahora tener un escalár de referencia para comparar cualitativamente ambos calendarios: aquel generado por el modelo computacional y el manual. Para lograr obtener la métrica del calendario manual, se corre la fase 3 del programa, de replanificación, pero con el calendario totalmente dado, es decir, ingresando como entrada al calendario de asignaciones manuales. De esta manera, el programa brindará como salida el mismo calendario de entrada, sin embargo, también brindará las matrices de diferencia de días, turnos y métrica correspondiente, útil para la comparación.

Tabla XXX: Calendario modelo manual semestre impar 2023

	1	2	3
1	GEOMETRÍA Y ALG. LINEAL 2	LÓGICA	ENERGÍA 1 - COMBUSTIÓN
		MATERIALES Y ENSAYOS	
		GESTIÓN DE CALIDAD	
		TECNOLOGÍA Y SERV. IND. 1	
2			
3	PROB. Y ESTADÍSTICA	COMP. MEC. DE MAT. 1	INT. AL CONTROL IND.
			ANTENAS Y PROPAGACIÓN
			INGENIERÍA BIOQUÍMICA
			HORMIGÓN ESTRUCTURAL 1 ADM. DE OPERACIONES
4	TEORÍA DE CIRCUITOS	ELASTICIDAD	METALURGIA DE TRANSF.
	GEOMETRÍA Y ALG. LINEAL 1		INTRO. A LA ING. DE SOFT. TEORÍA DE LENGUAJES
5	FÍSICA 3		TEC. DE HORMIGÓN
	INTRO. A LA CIEN. DE LOS MAT.		DINÁMICA Y CONTROL DE PROC.
	FEN. DE TRAN. EN ING. DE PR.		SUB. EN MEDIA TENSIÓN TRAN. DE CALOR 2
6	PROGRAMACIÓN 2	SEÑALES Y SISTEMAS	ESTRUCTURAS DE ACERO
			ELECTRÓNICA DE POTENCIA REDES DE DATOS 2
			ELECTROTÉCNICA 1
7	FÍSICA 1		INT. A LA INV. DE OPERACIONES
	FÍSICA 2		MECÁNICA ESTRUCTURAL ELEMENTOS DE MÁQUINAS
8	MECÁNICA NEWTONIANA		
	MATEMÁTICA DISCRETA 1		
9			
10			
11	CÁLCULO VECTORIAL		INT. A LA MEC. DE LOS SUELOS
	CÁLCULO DIV		DISEÑO DE PROCESOS QU. TRAN. DE CALOR Y MASA 2
			TEC. DE REDES Y SERV. DE TEL.
12	CÁLCULO DIV	ELEM. DE MEC. DE LOS FL.	
	PRINCIPIOS DE QUÍMICA GRAL.		
13			
14			
15	ADM. GRAL. PARA ING.		

Tabla XXXI: Calendario de salida del modelo computacional semestre impar 2023

	1	2	3
1	MATERIALES Y ENSAYOS	PROGRAMACIÓN 2	
	ESTRUCTURAS DE ACERO	INTRO A LA ING. DE SOFT.	
		ELECTROTÉCNICA 1	
2			
3	MECÁNICA ESTR.	FÍSICA 3	
		DINÁMICA Y CONT. DE PROC.	
4	FÍSICA 1	FÍSICA 2	COMP. MEC. DE LOS MAT. 1
			INT. A LA MEC. DE LOS SUELOS
5	MECÁNICA NEWTONIANA		TEC. DE HORMIGÓN
	INT. AL CONT. IND.		TRANSFERENCIA DE CALOR 2
6	EL. DE MEC. DE LOS FLUIDOS	INT. A LA CIENCIA DE LOS MAT.	FEN. DE TR. EN ING. DE PROC.
			GEOMETRÍA Y ALG. LINEAL 2
7		HORMIGÓN EST. 1	TEORÍA DE CIRCUITOS
		ELEMENTOS DE MÁQ.	PRINCIPIOS DE QUÍMICA GRAL.
			TECNOLOGÍA Y SERV. IND.
8	CÁLCULO DIVV	CÁLCULO DIV	REDES DE DATOS 2
	LÓGICA		
	ADM. GRAL. PARA ING.		
9			
10			
11	GEOMETRÍA Y ALG. LINEAL 1	SUBEST. EN MEDIA TENSIÓN	CÁLCULO VECTORIAL
			DISEÑO DE PROCESOS
			METALURGIA DE TRANSF.
			SEÑALES Y SISTEMAS
12	ENERGÍA 1 - COMBUSTIÓN	PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA	TEC. DE REDES Y SER. DE TC
	ELASTICIDAD	TEORÍA DE LENGUAJES	TRAN. DE CALOR Y MASA 2
	ADM. DE OPERACIONES	ANTENAS Y PROPAGACIÓN	GESTIÓN DE CALIDAD
	ELECTRÓNICA DE POTENCIA		INGENIERÍA BIOQUÍMICA
13			
14			
15	MATEMÁTICA DISCRETA 1		
	INT. A LA INV. DE OPERACIONES		

Al ejecutar la fase 3 con el calendario manual, se obtiene una métrica de 124.609, mientras que la métrica correspondiente a las fases 1 y 2, en donde no se le da calendario preasignado alguno, es de 132.994. La métrica en este caso es un 7% superior frente al calendario manual. Dado que la calidad del modelo no solo se representa en base a este escalar, se procede a hacer un análisis más profundo.

Al realizar la sumatoria de todas las celdas de la matriz de diferencia de días, el calendario manual presenta un valor de 9.296 días, mientras que el computacional alcanza los 10.740 días, representando un aumento de 16%. Este valor transmite una idea de dispersión de unidades curriculares en el calendario, independientemente de la conflictividad de las mismas.

En cuanto a las UC en conflicto, el cálculo análogo repercute en 2.479 días para el calendario manual y 2.507 días para el computacional, una mejora del 1%. Este cálculo, a diferencia de la métrica convencional, representa la dispersión de UC en conflicto en el calendario no ponderadas por la cantidad de alumnos en conflicto, expuesto en la matriz de concurrencia.

Análogamente para los turnos, se tiene que la sumatoria de diferencia de turnos para todas las UC en el calendario manual es de 28.352 turnos, mientras que en el computacional es de 32.616 turnos, lo que representa un aumento de un 15%.

Para las UC en conflicto, la diferencia de turnos del calendario manual es de 7.527 turnos y la del calendario computacional es de 7.690 turnos, lo cual supone una mejora de 2%.

Se evidencian estas comparativas en la [Tabla XXXII](#).

Tabla XXXII: Comparación modelos de calendario parciales semestre impar

Comparación calendarios semestre impar			
	Manual	Computacional	Δ modelos
Métrica	124.609	132.994	7%
$\Sigma \Delta$ días	9.296	10.740	16%
$\Sigma \Delta$ días entre UC en conflicto	2.479	2.507	1%
$\Sigma \Delta$ turnos	28.352	32.616	15%
$\Sigma \Delta$ turnos entre UC en conflicto	7.527	7.690	2%

Es interesante estudiar a su vez la distribución de la diferencia de turnos para las unidades curriculares, específicamente la frecuencia de las diferencias mínimas y máximas para cada UC en conflicto. Esto permitirá analizar los peores escenarios a los que se verá enfrentado el estudiante, si se trata de la diferencia mínima, o a los mejores si se considera la diferencia máxima.

Se recuerda que se hace referencia a la diferencia mínima de turnos entre UC en conflicto como el menor número del conjunto de diferencia de turnos entre UC en conflicto. Por ejemplo, si se tiene que la UC 1023 presenta una diferencia de turnos de (4,1,9,5) para las UC (1025,1030,1031,1061) correspondientemente, y existe concurrencia con las UC 1025, 1031 y 1061, entonces la mínima diferencia de turnos entre UC en conflicto es min (4,9,5),

es decir 4. El razonamiento es el inverso para obtener la diferencia de turnos máxima, en el ejemplo es 9. A grandes rasgos, cuanto mayor sea tanto la diferencia de turnos mínima como la máxima para la mayor cantidad de UC posibles, mejor será el calendario.

Para dicho cálculo, se toma el mínimo de cada columna, correspondiente a cada UC, de la matriz de diferencia de turnos para UC en conflicto. La comparación se expone en la [Figura XXX](#).

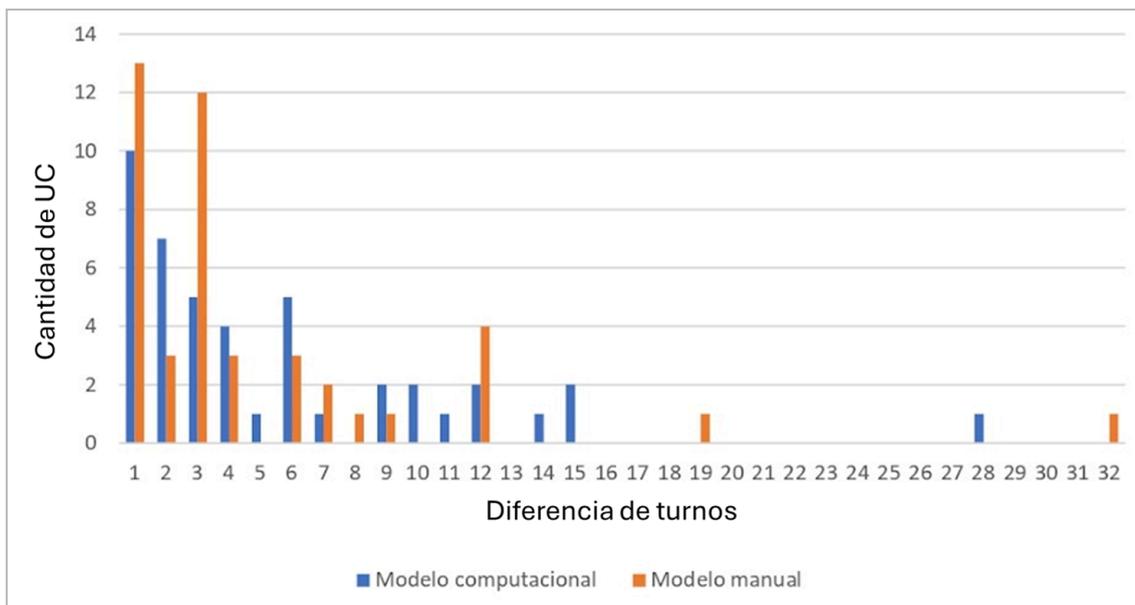


Figura XXX: Diferencia de turnos mínima para UC en conflicto semestre impar

En la [Figura XXX](#) se desprende que para el calendario manual, 13 UC presentan una diferencia de 1 turno entre otra en conflicto (primera barra naranja), mientras que 10 UC presentan esa misma diferencia para el calendario salida del modelo computacional (primera barra azul).

Se infiere que el calendario computacional tiende a presentar una mayor diferencia de turnos mínima entre UC en conflicto dada la mayor dispersión de barras azules contra la derecha del gráfico frente a las barras naranjas. En promedio, se tiene como mínimo 5,5 turnos entre UC en conflicto para el calendario obtenido con el modelo computacional y 4,9 turnos para el modelo manual, lo cual representa una mejor dispersión de los parciales en el calendario computacional. En otras palabras, para este caso de estudio el modelo computacional presenta como mínimo promedio 1 día y medio entre dos parciales de UCs en conflicto. Cabe destacar que este estudio en particular no pondera por la cantidad de estudiantes presentes en esta situación, es decir, el peso de las UC en conflicto es el mismo independientemente de la cantidad de estudiantes que deben rendirlas.

Por otro lado, el escenario optimista indica la diferencia de turnos máxima entre la UC considerada y las restantes con las que se encuentra en conflicto. En este caso se percibe que el modelo computacional presenta una diferencia de turnos promedio máxima de 28,4 y el modelo manual de 28,8 turnos, equivalente a 9 días corridos entre un parcial y otro de UC en conflicto.

Se analiza por otro lado la distribución de las UC en los diferentes turnos (matutino, vespertino y nocturno), específicamente al comparar el grupo de UC sugeridas para semestres iniciales con aquellas sugeridas en semestre más avanzados. Se recuerda que los semestres avanzados tienen una preferencia por los turnos matutinos y nocturnos, dado que en estos semestres suelen encontrarse la mayoría de los estudiantes que trabajan. Por otro lado, los estudiantes pertenecientes a los primeros semestres prefieren evitar los turnos nocturnos, de manera que les sea posible conseguir transporte de regreso a su hogar, en caso de vivir en el interior.

Las figuras [Figura XXXI](#) y [Figura XXXII](#) muestran la distribución de unidades curriculares sugeridas en los semestres 1 al 4 para el calendario real y computacional respectivamente.

Como se puede observar en las figuras anteriores, se tiene que para el calendario real, el 28% de las UC sugeridas en los semestres iniciales fueron asignadas al turno nocturno. En cambio, para el modelo computacional, solo el 17% de las UC de éste índole fueron asignadas al último turno del día.

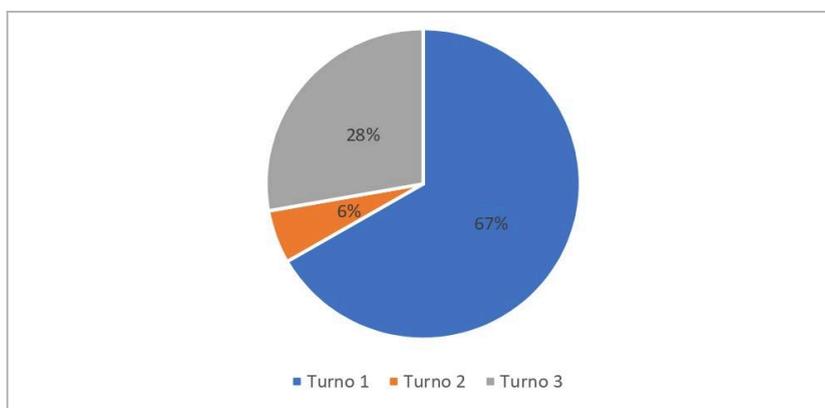


Figura XXXI: Distribución de UC sugeridas para semestres iniciales en modelo manual semestre impar

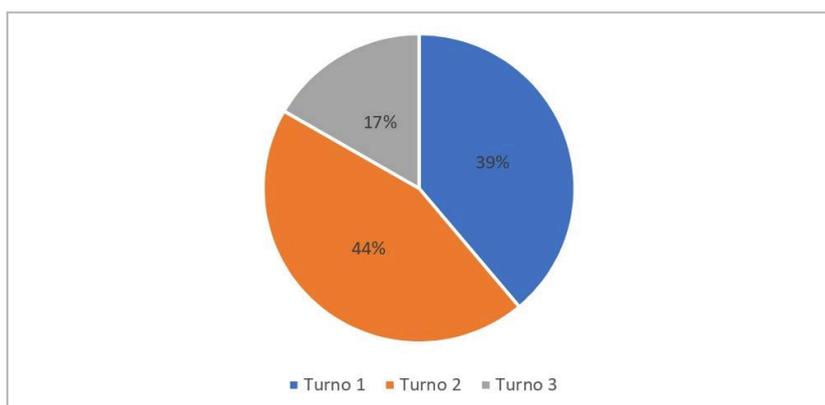


Figura XXXII: Distribución de unidades curriculares sugeridas para semestres iniciales en modelo computacional semestre impar

Para las UC restantes, es decir, para aquellas sugeridas a partir del quinto semestre, se tiene la distribución de turnos dada por las [Figura XXXIII](#) y [Figura XXIV](#).

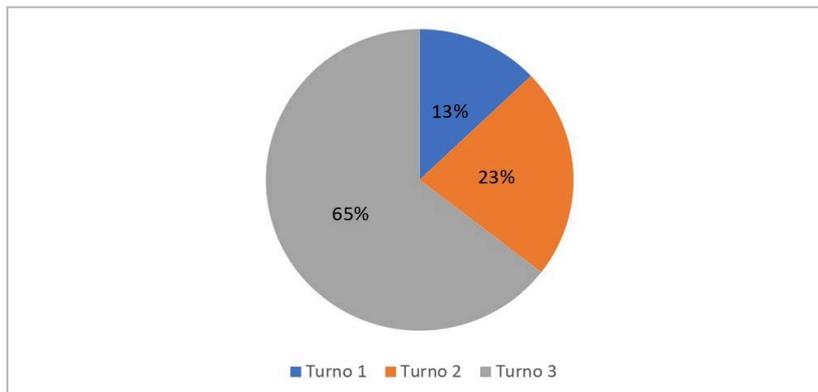


Figura XXXIII: Distribución de UC sugeridas para semestres avanzados en el modelo manual semestre impar

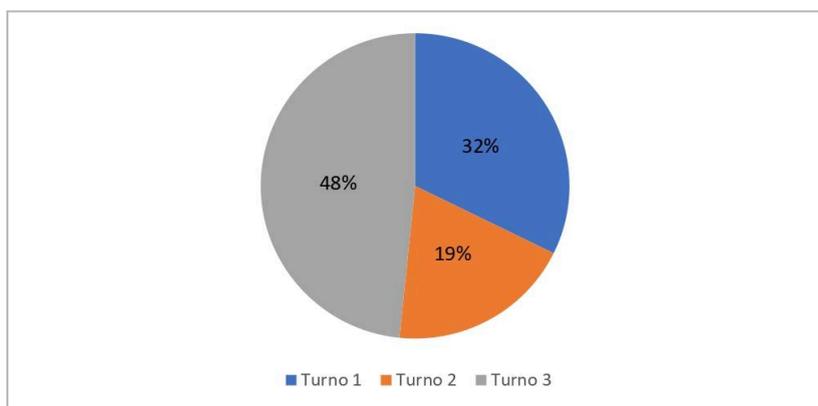


Figura XXXIV: Distribución de UC sugeridas para semestres avanzados en el modelo computacional semestre impar

Para el modelo manual, el 23% de las UC sugeridas en semestres avanzados fueron asignadas al turno vespertino (turno 2), mientras que en el calendario de salida del modelo computacional, este porcentaje desciende al 19%.

6.3.2 Comparación calendario manual y computacional semestre par

Se procede a realizar un análisis comparativo similar al previamente efectuado, no obstante, esta vez se empleará un conjunto de datos distintos. Dicha comparación tomará como base el calendario de los primeros parciales del semestre par de 2023. El calendario abarca un total de 43 unidades curriculares.

Los datos de entrada para la comparación de los modelos son los siguientes:

- Cantidad de unidades curriculares (M): 43
- Cantidad de días (D): 13
- Cantidad de turnos por día (T): 3
- Capacidad por turno: entre 1500 y 2100
- Disponibilidad de turnos: Se consideran todos los turnos disponibles salvo:

- el tercer turno del día 1
- todos los turnos del día 2 y 9
- el segundo turno del día 5
- el tercer turno del día 8
- el primer y segundo turno del día 13

Del mismo modo que en el análisis anterior, el objetivo principal de esta investigación es establecer una comparativa entre el calendario manual y el generado a partir del modelo computacional, con el propósito de identificar y analizar los aspectos más destacados de cada uno de estos calendarios.

El set completo de datos de entrada y salida se encuentra en el capítulo [10. Anexos](#).

El calendario de parciales realizado de manera manual por la asistente académica del segundo semestre del 2023 se exhibe en la [Tabla XXXIII](#).

Por otro lado, el calendario de parciales obtenido como salida del modelo computacional logró asignar 31 de las 43 UC totales en la fase 1 correspondiente a una tasa de asignación de un 72%, y la totalidad de las mismas en la fase 2, resultando en el calendario de la [Tabla XXXIV](#).

Al ejecutar la fase 3 con el calendario manual se obtiene una métrica de 81.550, mientras que la métrica correspondiente a las fases 1 y 2, en donde no se le da calendario preasignado alguno, es de 62.706. A diferencia del estudio anterior, la métrica en este caso disminuye frente al calendario manual en un 23%, lo cual puede resultar sorprendente. Dado que la calidad del modelo no solo se representa en base a este escalar, se procede a hacer un análisis más profundo al utilizar las matrices de diferencia de días y turnos para todas las UC y para las UC únicamente en conflicto.

Al realizar la sumatoria de todas las celdas de la matriz de diferencia de días, el calendario manual presenta un valor de 7.568 días, mientras que el computacional alcanza los 7.480 días, representando una disminución de 1%. Este valor transmite una idea de dispersión de unidades curriculares en el calendario, independientemente de la conflictividad de las mismas.

En cuanto a las UC en conflicto, el cálculo análogo repercute en 2.648 días para el calendario manual y 2.840 días para el computacional, una mejora del 6%. Este cálculo, a diferencia de la métrica convencional, representa la dispersión de UC en conflicto en el calendario no ponderadas por la cantidad de alumnos en conflicto, expuesto en la matriz de concurrencia.

Tabla XXXIII: Calendario manual semestre par 2023

	1	2	3
1	GEOMETRÍA Y ALG. LINEAL 1	SISTEMAS Y CONTROL	
	INT. A LAS EC. DIFERENCIALES		
2			
3		VIBRACIONES Y ONDAS	PROGRAMACIÓN 3
		COMP. MEC. DE LOS MAT.2	COSTOS PARA INGENIERÍA GEOLOGÍA DE INGENIERÍA
4	GEOMETRÍA Y ALG. LINEAL 2	PROGRAMACIÓN 2	F. DE APR. AUT. Y REC. DE PAT.
		COMPUTACIÓN 1	
5	PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA		CONTROL DE CALIDAD
6	TEORÍA DE CIRCUITOS	SEÑALES AL. Y MODULACIÓN	D. DE RED. DE CON. EN ING. SAN.
		INTRO. A LA ING. SANITARIA	SISTEMAS OLEO. Y NEUMÁTICOS
		INTRO. A LA ING. DE PROD.	TEC. DE SERVICIOS AUDIOVIS.
			FLUIDODINÁMICA ING. DE LAS REAC. QUÍMICAS 2
7			
8	CÁLCULO DIV		
	FÍSICA 3		
9			
10	MATEMÁTICA DISCRETA 2	TRANSF. DE CALOR Y MASA 1	REDES DE DATOS 1
	FÍSICA 1		TEC. Y SERVICIOS IND. 2
	FÍSICA 1		
11	FÍSICA TÉRMICA	MAT. DISCRETA 1	DINÁMICA DE MAQ. Y VIBRACIÓN
		FUND. DE BASES DE DATOS	
		INGENIERÍA BIOMÉDICA	
12	CÁLCULOS DIVV	METALURGIA FÍSICA	INSTALACIONES ELÉCTRICAS
	CÁLCULO VECTORIAL	TIEMPOS Y MÉTODOS	MECÁNICA APLICADA (ING. QUÍ.)
13			HIG. Y SER. DE PL. PROC. DE AL.

Tabla XXXIV: Calendario de salida del modelo computacional semestre par 2023

	1	2	3
1	CONTROL DE CALIDAD	INT. A LAS EC. DIFERENCIALES F. DE APR. AUT. Y REC. DE PAT. ING. DE LAS REAC. QUÍMICAS 2	
2			
3	ING. BIOMÉDICA	PROPAGACIÓN 2 PROGRAMACIÓN 3 SISTEMAS OLEOHID. Y NEUM.	
4		FÍSICA TÉRMICA FÍSICA 2	INT. A LA ING. SANITARIA HIG. Y SER. DE PL. PROC. DE AL. MECÁNICA APLICADA (ING. QUÍ.)
5	FÍSICA 1		TEORÍA DE CIRCUITOS INSTALACIONES ELÉCTRICAS
6	METALURGIA FÍSICA	TEC. DE SERV. AUDIOVISUALES TEC. Y SERV. INDUSTRIALES 2	FÍSICA 3
7		VIBRACIONES Y ONDAS DIS. DE REDES EN ING. SAN. INT. A LA ING. DE PRODUCCIÓN	MATEMÁTICA DISCRETA 2 TRAN. DE CALOR Y MASA 1
8	CÁLCULO DIV CÁLCULO VECTORIAL SEÑALES AL. Y MODULACIÓN	CÁLCULO DIV	
9			
10		PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA	TIEMPOS Y MÉTODOS
11	GEOM. Y ÁLGEBRA LINEAL 1	GEOM. Y ÁLGEBRA LINEAL 2 GEOLOGÍA DE INGENIERÍA SISTEMAS Y CONTROL	COMP. MECÁNICO DE MAT. 2 FUND. DE BASES DE DATOS FLUIDIDINÁMICA
12	COSTOS PARA INGENIERÍA	COMPUTACIÓN 1	DINÁMICA DE MÁQ. Y VIBRACIÓN REDES Y DATOS 1
13			MATEMÁTICA DISCRETA 1

Repitiendo esta misma idea para los turnos, se tiene que la sumatoria de diferencia de turnos para todas las UC en el calendario manual es de 22.848 turnos, mientras que en el computacional es de 22.672 turnos, nuevamente se trata de una disminución de 1%.

Para las UC en conflicto, la diferencia de turnos del calendario manual es de 8.030 turnos y la del calendario resultante de las fases 1 y 2 es de 8.570 turnos, lo cual supone una mejora de 7%.

Se evidencian estas comparativas en la [Tabla XXXV](#)

Tabla XXXV: Resumen comparación entre modelo computacional y calendario manual

Comparación calendarios semestre par			
	Manual	Computacional	Δ modelos
Métrica	81.550	62.706	-23%
$\Sigma \Delta$ días	7.568	7.480	-1%
$\Sigma \Delta$ días entre UC en conflicto	2.684	2.840	6%
$\Sigma \Delta$ turnos	22.848	22.672	-1%
$\Sigma \Delta$ turnos entre UC en conflicto	8.030	8.570	7%

Es interesante estudiar a su vez la distribución de la diferencia de turnos para las unidades curriculares en conflicto, específicamente la frecuencia de las diferencias mínimas y máximas para cada UC. Esto permitirá analizar los peores escenarios a los que se verá enfrentado el estudiante, si se trata de la diferencia mínima, o a los mejores si se considera la diferencia máxima.

Para dicho cálculo, se toma el mínimo de cada columna, correspondiente a cada UC, de la matriz de diferencia de turnos para UC en conflicto, y se compara en la gráfica de la [Figura XXXV](#).

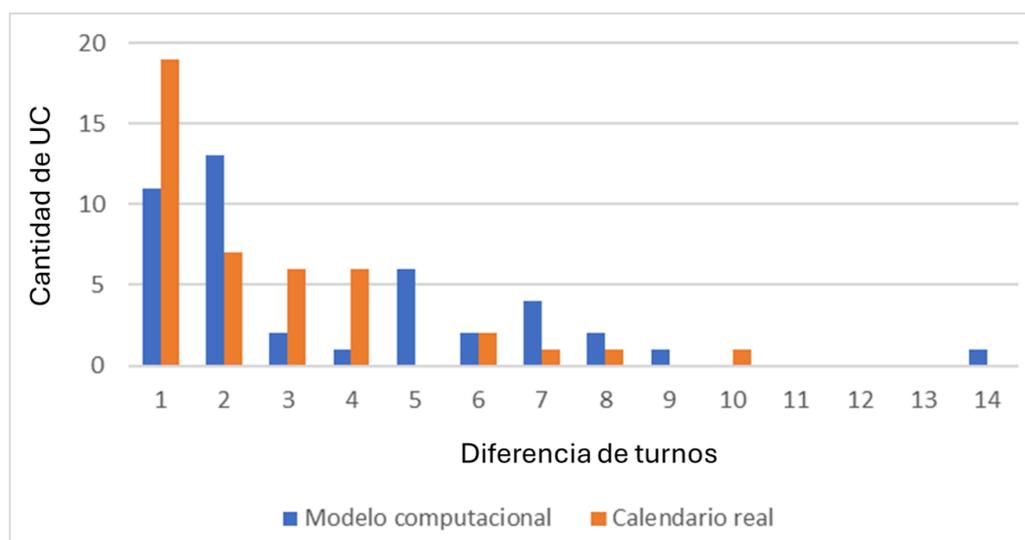


Figura XXXV: Diferencia de turnos mínima para UC en conflicto semestre par

De la [Figura XXXV](#), se infiere que el calendario de salida del modelo computacional presenta 11 UC con una diferencia mínima de 1 turno frente a otras UC en conflicto (primera barra azul), mientras que el calendario manual presenta 19 UC en esta situación (primera barra naranja).

Se desprende a su vez que el calendario computacional tiende a presentar una mayor diferencia de turnos mínima entre UC en conflicto, lo cual significa más tiempo de preparación entre UC a rendir por el estudiante, considerando un escenario pesimista. En promedio, se tiene como mínimo 3,7 turnos entre UC en conflicto para el calendario obtenido con el modelo computacional y 2,6 turnos para el modelo manual. Cabe destacar que este estudio en particular no pondera por la cantidad de estudiantes presentes en esta situación, es decir, el peso de 2 UC en conflicto es el mismo independientemente de la cantidad de estudiantes que deben rendirlas.

Por otro lado, el escenario optimista indica la diferencia de turnos máxima entre la UC considerada y las restantes con las que se encuentra en conflicto. Del mismo modo que en el estudio anterior, cuanto mayor sea esta diferencia, mejor es para el estudiante que se encuentra cursando estas UC en consideración. Asimismo, se vuelve a percibir una ventaja del modelo computacional frente al calendario manual, presentando una diferencia de turnos promedio máxima de 26,6 para el primer caso y de 25,3 para el segundo.

Puede resultar ventajoso analizar también la distribución de las UC en los diferentes turnos (matutino, vespertino y nocturno), específicamente al comparar el grupo de UC sugeridas para semestres iniciales con aquellas sugeridas en semestre más avanzados. Se recuerda que los semestres avanzados tienen una preferencia por los turnos de mañana y noche. Por otro lado, los estudiantes pertenecientes a los primeros semestres prefieren evitar los turnos nocturnos.

Las figuras [Figura XXXVI](#) y [Figura XXXVII](#) muestran la distribución de unidades curriculares sugeridas en los semestres 1 al 4 para el modelo manual y computacional respectivamente.

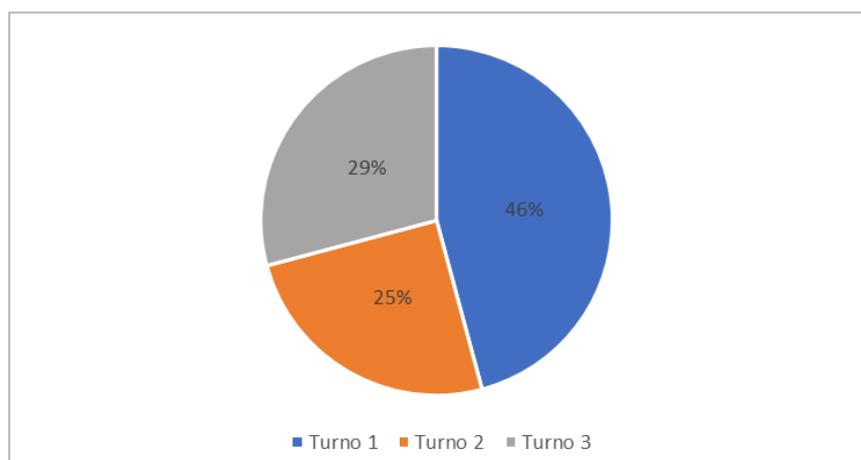


Figura XXXVI: Distribución de UC sugeridas para semestres iniciales en modelo manual semestre par

Como se puede observar en las figuras anteriores, se tiene que para el modelo manual el 29% de las UC sugeridas en los semestres iniciales fueron asignadas al turno nocturno. En cambio, para el modelo computacional, solo el 8% de las UC de éste índole fueron asignadas al último turno del día.

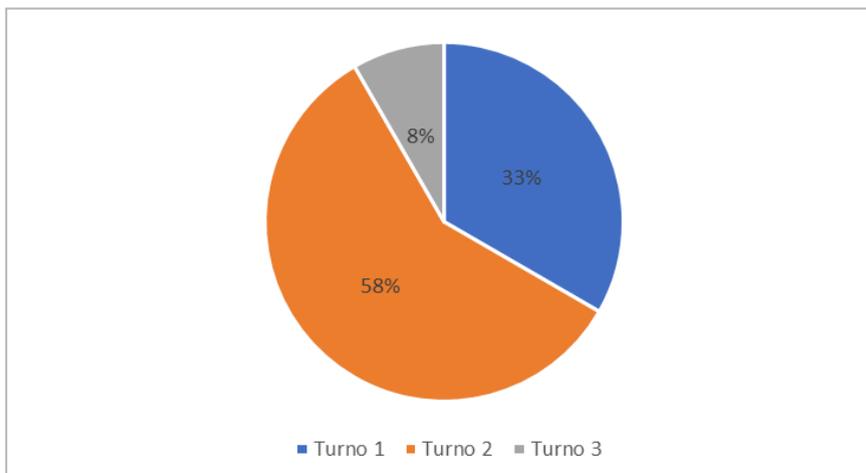


Figura XXXVII: Distribución de UC sugeridas para semestres iniciales en modelo computacional semestre par

Para las UC restantes, es decir, para aquellas sugeridas a partir del quinto semestre, se tiene la distribución de turnos dada por las figuras [Figura XXXVIII](#) y [Figura XXXIX](#).

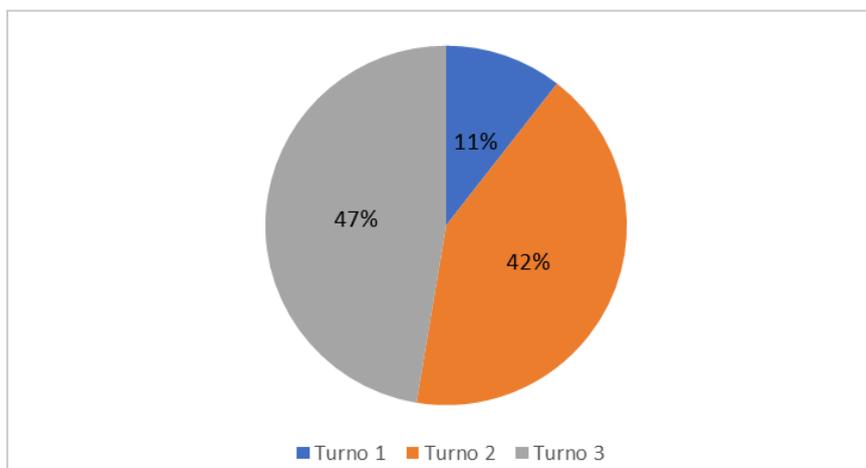


Figura XXXVIII: Distribución de UC sugeridas para semestres avanzados en el modelo manual semestre par

Para el modelo manual, el 42% de las UC sugeridas en semestres avanzados fueron asignadas al turno 2 o vespertino, mientras que en el calendario de salida del modelo computacional, este porcentaje desciende al 26%. Nuevamente, se puede observar una mejora del modelo computacional frente al manual.

Ahora bien, se procede a evaluar los usos de la fase 3 para mejorar el resultado proveniente o no de las fases 1 y 2, tras modificaciones dadas por el usuario. En primer lugar, dado que la métrica resultante del modelo computacional, previamente analizado, resultó ser menor

que la del modelo manual, se corrió la fase 3 sin ningún calendario preasignado, de este modo, aunque no se trate de una función objetivo de maximización, sí es posible obtener métricas mayores que utilizando las fases 1 y 2.

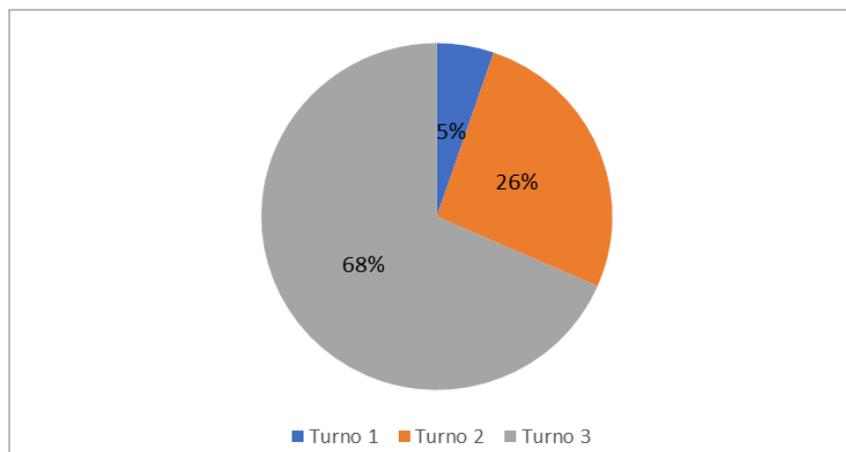


Figura XXXIX: Distribución de UC sugeridas para semestres avanzados en el modelo computacional semestre par

De hecho, la métrica resultó ser de 84.502, superando las métricas del modelo manual y computacional (salida de las fases 1 y 2), en un 4% y 26% respectivamente. Sin embargo, a pesar de haber obtenido un calendario cuya métrica excede a las correspondientes a los calendarios anteriores, no se recomienda utilizar la fase 3 sin calendario prefijado de entrada, ya que se pierde la ventaja de la asignación de las unidades curriculares de mayor jerarquía sobre los días finales del calendario proporcionada por las fases 1 y 2.

Una de las funcionalidades de la fase 3 es su posible utilización en caso de excepciones, a modo de ejemplo, se supone que el día 8 queda inhabilitado, por lo que se elimina manualmente la asignación de las UC previamente asignadas a turnos de dicho día:

- CÁLCULO DIFERENCIAL E INTEGRAL EN VARIAS VARIABLES,
- CÁLCULO VECTORIAL,
- SEÑALES ALEATORIAS Y MODULACIÓN
- CÁLCULO DIFERENCIAL E INTEGRAL EN UNA VARIABLE

Adicionalmente, se disminuye a 0 la capacidad de estos turnos.

Se obtiene entonces la asignación descrita en la [Tabla XXXVI](#) para las UC mencionadas, mientras que las UC restantes no ven variación alguna en el turno asignado.

Tabla XXXVI: Reasignación de UC

ID	Nombre	Día	Turno
[5]	CAL. DIF. E INT. EN UNA VAR.	1	1
[8]	CAL. DIF. E INT. EN VARIAS VAR.	1	2
[36]	CALCULO VECTORIAL	4	3
[10]	SEÑALES ALEATORIAS Y MODULACIÓN	10	2

Se supone que en este escenario existe una cantidad suficiente de días previo al inicio de la instancia de evaluaciones, por lo que es factible reasignar unidades curriculares a turnos anteriores al previamente planificado.

Asimismo, la métrica asciende a 94.572, resultando ser la mayor obtenida hasta el momento con el conjunto de datos estudiados.

Se estudia ahora el escenario donde el mismo día queda inhabilitado, pero ya se está adentrando en el período de parciales, por lo que una replanificación en días anteriores al previsto no es una opción viable para los estudiantes. Asimismo, se agrega el primer turno del día 13 y se aumenta la capacidad de los días posteriores al afectado para promover una asignación de mayor calidad. La matriz de *turnos_disponibles_dt* presenta entonces la siguiente forma:

Tabla XXXVII: *turnos_disponibles_dt* ajustado para replanificación a días posteriores

	1	2	3
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0
7	0	0	0
8	0	0	0
9	2.100	2.100	2.100
10	2.100	2.100	2.100
11	2.100	2.100	2.100
12	2.100	0	2.100

Al ejecutar la tercera fase, de replanificación, se obtiene la asignación expuesta en la [Tabla XXXVIII](#), con una métrica correspondiente de 64.474. Dicha disminución en la métrica frente a la inicial era esperable dado el grado de restricciones adicionales implementados. Sin embargo, independientemente de la misma, se garantiza la no conflictividad de estas UC reubicadas en el calendario con otras UC.

Tabla XXXVIII: Asignación en días posteriores de UC afectadas

ID	Nombre	Día	Turno
[36]	CALCULO VECTORIAL	10	1
[10]	SEÑALES ALEATORIAS Y MODULACIÓN	10	2
[5]	CAL. DIF. E INT. EN UNA VAR.	10	3
[8]	CAL. DIF. E INT. EN VARIAS VAR.	13	2

7. Aplicación en la realidad

La creación de una herramienta de apoyo a la toma de decisiones que logra automatizar gran parte de la generación del calendario de parciales se fundamenta en la consecución de dos objetivos primordiales.

En primer lugar, se persigue la optimización del tiempo empleado en el proceso, en particular, en comparación con la metodología vigente que involucra múltiples iteraciones. Este enfoque apunta a simplificar y agilizar la creación del calendario, reduciendo la carga de trabajo y la complejidad asociada a su diseño manual.

En segundo lugar, el objetivo es lograr un calendario que maximice las expectativas de la población estudiantil en la medida de lo posible. En este contexto, las expectativas se refieren a la capacidad de los estudiantes para afrontar los parciales de manera efectiva, sin que la programación de los mismos se convierta en un obstáculo significativo. La programación de UC en fechas u horarios inconvenientes puede dar lugar a ausencias por parte de los estudiantes, lo cual tiene un impacto adverso tanto en su rendimiento académico como en su desarrollo educativo en general. Además, estas ausencias pueden considerarse un uso ineficiente del tiempo y los recursos, ya que los estudiantes han invertido tiempo y esfuerzo en la preparación de las unidades curriculares a lo largo del semestre.

Por lo tanto, el propósito fundamental de la automatización en la generación del calendario de parciales reside en la mejora de la eficiencia en la gestión del tiempo y en la búsqueda de una mayor adaptación a las necesidades y preferencias de los estudiantes, contribuyendo así a la calidad y efectividad del proceso educativo.

7.1 Herramienta para la toma de decisiones

Se recuerda que la herramienta presenta 3 fases, distribuidas en 2 modelos independientes, en donde el segundo permite como entrada asignaciones preliminares, es decir, un calendario predeterminado al cual se busca completar al asignar las UC restantes.

La herramienta computacional puede accederse a través del programa en línea Google Colab, y se ejecuta en base a las instrucciones presentes en la sección [10. Anexos](#) en el Manual del usuario.

7.2 Recomendaciones

En primer lugar, tal como cualquier programa de software lo estipula, es primordial garantizar la calidad en los datos de entrada, así como el formato correcto de los mismos en valores separados por coma (CSV). Como validaciones fundamentalmente sencillas se recomienda, previo a la ejecución de la herramienta, verificar que el tamaño de los datos de entrada sea el delimitado, y que la matriz de concurrencia sea simétrica de modo que no existan incoherencias en los datos de salida.

Dado que algunas restricciones no fueron consideradas en el modelo, se recomienda utilizar el calendario resultante del mismo como una base sobre la cual se debe seguir iterando,

teniendo en cuenta las necesidades cambiantes de los estudiantes y partes interesantes impactadas, así como situaciones inesperadas, recordando que el modelado computacional es una herramienta de apoyo para la toma de decisiones y no una solución en sí misma que determina el calendario definitivo.

La herramienta resulta especialmente útil para los siguientes 3 casos:

1. Correr el modelo sin ninguna asignación planteada por el usuario, repitiendo el proceso hasta obtener algún calendario deseable sobre el cual se itere y perfeccione.

De esta manera, el usuario podrá comenzar a armar el calendario final utilizando como base uno que garantice el no solapamiento de UC en conflicto en un mismo turno.

2. Asignar UC manualmente al calendario, y ejecutar el modelo, el cual asignará a las UC restantes teniendo en cuenta las restricciones del modelo.

Esta alternativa consiste en comenzar el proceso de calendarización de parciales al asignar manualmente las primeras UC a partir de un calendario en blanco, y correr únicamente la fase 3 para las asignaciones restantes.

3. Realizar una combinación de ambas, en donde a cada salida del modelo se remuevan aquellas asignaturas con las que no se está conforme, y se vuelva a correr el modelo hasta que se cumpla con lo esperado.

Este enfoque es el recomendado, dado que utiliza todo el potencial de la herramienta, y resulta en una salida donde se tiene el agregado de valor humano y computacional.

Asimismo, se recomienda utilizar la métrica de salida para evaluar la calidad global de distintas alternativas de calendarios obtenidos como resultado del modelo, o planteadas por el usuario, y tomar decisiones objetivas respecto a cuál de ellas es más conveniente.

Luego de poseer algún calendario tentativo, es recomendable continuar el análisis mediante el estudio profundo de las matrices de diferencia de días y turnos, tanto para todas las UC como también para aquellas en las que se tiene conflicto. Si el usuario así lo desea, puede a su vez enfocar su estudio a las columnas correspondientes a las UC de mayor jerarquía. De este modo, es posible indagar en la distribución de las mismas en el calendario, y analizar posibles reasignaciones para los casos en donde no se esté de acuerdo con dicha diferencia de días o turnos.

8. Conclusiones

A lo largo del desarrollo del proyecto, se ha identificado un problema que, a pesar de su aparente simplicidad y comprensión intuitiva de sus objetivos, revela su complejidad al no contar hasta la fecha con una solución óptima: la calendarización de exámenes en el ámbito académico.

La complejidad inherente se ve acentuada por la necesidad de manejar datos de entrada, ya que varios modelos y propuestas iniciales requieren datos que no son factibles de obtener o gestionar en la Fing. Asimismo, se ha buscado equilibrar la calidad de las salidas del modelo sin incurrir en la obtención de datos de entrada de difícil acceso, como la segregación de la cantidad de UC por estudiante.

El objetivo principal consistió en reducir la necesidad actual de confección manual del calendario de parciales o exámenes, proceso que involucra iteraciones arduas, conocimientos especializados y que lleva a reclamos estudiantiles debido a la falta de sistematización de los datos.

En cuanto a las técnicas de solución empleadas, se optó por algoritmos heurísticos debido a la naturaleza NP-dura del problema asociado. Además se opta por el enfoque utilizado en la Universidad de Toronto desarrollando una matriz de conflicto con información disponible de bedelía que a nivel manual sería imposible de procesar y/o contemplar en el proceso actual. Esto le brinda al problema entradas de información actualizada sobre los trayectos académicos de cada estudiante, para valorar la calidad del calendario en virtud de las currículas en ejecución y no las sugeridas.

El modelo, sometido a mejoras posteriores, demuestra adaptarse eficientemente al crecimiento del número de UC a asignar, manteniendo tiempos de procesamiento de orden lineal. Las salidas del programa fueron positivas, logrando asignar más del 60% de UC en la primera fase y el 100% en la segunda. La herramienta de replanificación en la fase 3 se diseñó para ser amigable para el usuario, asegurando una corrección efectiva de asignaciones no deseadas.

La colaboración estrecha entre roles clave dentro de la Fing, como el tutor del proyecto, el director del INCO, la asistente académica, la unidad de enseñanza y bedelías, fue esencial para el desarrollo de un modelo heurístico de tres fases. Este modelo aborda las necesidades de los estudiantes y considera restricciones, como la capacidad de turnos y la no conflictividad entre UC asignadas en un mismo turno, permitiendo la replanificación en la fase 3 a partir de las entradas del usuario.

El modelo presenta relevancia práctica y aplicación real en la Fing, siendo una alternativa viable y valorada positivamente por la asistente académica. A nivel de aprendizajes, se destaca la importancia de mantener vínculos cercanos con las partes interesadas y usuarios potenciales, así como la necesidad de desarrollar herramientas valiosas y complejas desde el punto de vista de la toma de decisiones, pero accesibles para usuarios no expertos en programación.

9. Trabajos futuros

Dentro del marco de los trabajos futuros y el desarrollo de líneas de investigación adicionales relacionadas con la herramienta en cuestión, se contempla la posibilidad de una mejora progresiva y continua del programa. Esta necesidad de evolución constante responde a la naturaleza dinámica y fluctuante del problema asociado a la calendarización de parciales, cuyos parámetros y requisitos pueden variar significativamente en el tiempo debido a cambios en las estructuras curriculares, en la oferta académica o en las preferencias y necesidades de la población estudiantil.

Además, se reconoce el potencial del modelo para ser adaptado y aplicado a la resolución de problemas de diferente naturaleza. Este enfoque transversal sugiere que los principios y algoritmos subyacentes al programa actual pueden ser reconfigurados o extendidos para abordar desafíos en otros ámbitos que requieran de la asignación eficiente de recursos, la optimización de horarios o la gestión de espacios, entre otros.

Se destacan específicamente 4 implementaciones adicionales:

- **Segregación de capacidad de turnos por salones:**

Con el propósito de enriquecer la asignación de espacios para las unidades curriculares en función de los turnos y días específicos, este estudio propone la incorporación de un método de validación adicional que complementa el sistema de cálculo de capacidad existente, actualmente concebido como una "caja negra". A diferencia del enfoque homogeneizador previo, en el que no se distingue entre los distintos espacios físicos disponibles, la nueva metodología sugiere una diferenciación individual de cada aula, considerando su capacidad específica.

Se exploran dos estrategias metodológicas para abordar esta problemática. La primera estrategia propone una fase adicional al modelo vigente, en el cual, tras asignar las UC a los turnos correspondientes, procede a asignarlas a los salones basándose en un proceso de selección que prioriza las UC con mayor número de inscriptos, evaluando la capacidad mínima requerida del aula para albergar la UC. Este proceso implica una revisión descendente de las capacidades de los salones, asignando cada UC al espacio más pequeño adecuado y excluyendo aquellos espacios ya utilizados. Las UC que no logran ser asignadas bajo este esquema son sujetas a una fase subsiguiente de reasignación.

La segunda estrategia propone una revisión fundamental del modelo de asignación. En este enfoque, la asignación de una UC a un espacio en el calendario se condiciona a la disponibilidad inmediata de un aula que satisfaga los requisitos de capacidad, eliminando la necesidad de fases adicionales de asignación. Este método implica un incremento en las validaciones previas, garantizando que cada UC se asigne únicamente si existe un espacio compatible con su demanda de capacidad desde el inicio.

Ambas estrategias buscan mejorar la precisión en la asignación de espacios para las UC, a través de la implementación de sistemas de validación más rigurosos y adaptativos que consideran las características específicas de cada salón.

- **Disponibilidad de profesores y personal de apoyo**

En segundo lugar, se plantea la inclusión de un parámetro que indique la disponibilidad de los profesores y/o personal de apoyo para cada turno, así como su vínculo con la unidad curricular a ser asignada, por ejemplo, si el recurso A puede dar apoyo a la UC Mecánica Newtoniana todos los días en la mañana, y este recurso es absolutamente necesario, entonces la UC mencionada solo será asignada a los turnos donde se dispone del recurso necesario. Este enfoque es simple de implementar a nivel computacional pero requiere de mayores entradas humanas, además de ser un dato del que no siempre se dispone con antelación.

- **Enfoque matemático**

Como tercer sugerencia, se plantea la implementación de un nuevo modelo, basado en el enfoque matemático con función objetivo, en donde, mediante la ponderación de atributos deseables en un calendario de asignaciones, se obtengan asignaciones sin la necesidad de imponer reglas deterministas.

- **Calendario de exámenes**

Se contempla la posibilidad de adaptar el modelo actual para la generación de un calendario de exámenes. Este escenario presenta un desafío adicional, dado que implica la asignación de una cantidad significativamente mayor de unidades curriculares en comparación con el calendario de parciales, superando el doble de éstas en términos de volumen y complejidad logística.

Para abordar eficientemente esta tarea, se propone la incorporación de variables adicionales en el modelo. Una de estas es el factor de congruencia por carrera, que busca garantizar la coherencia y factibilidad del calendario en relación con las necesidades y restricciones específicas de cada currícula. Este enfoque permite evitar conflictos de horarios que puedan afectar a los estudiantes que cursan múltiples UC dentro de la misma carrera.

Además, se sugiere la inclusión de un criterio de "previatura" en la asignación de exámenes, donde se considera la jerarquía o secuencia pedagógica de las UC. Este criterio implica la priorización en la asignación de fechas de exámenes para las UC que son requisitos previos de otras, asegurando así que los estudiantes puedan completar los exámenes en un orden lógico y académicamente coherente.

Con estos u otros criterios, el modelo base puede adaptarse para otros servicios de la Fing o la UDELAR en general.

10. Bibliografía

- [1] Agencia de gobierno electrónico y sociedad de la información y del conocimiento. "Los datos personales y su protección". 2008.
<https://www.gub.uy/agencia-gobierno-electronico-sociedad-informacion-conocimiento/comunicacion/publicaciones/guia-didactica-sobre-proteccion-datos-personales/guia-didactica-sobre-0>.
- [2] Alba, E., & Dorronsoro, B. "El problema de la asignación cuadrática (QAP) y el algoritmo de la colonia de hormigas (ACO). En *Computación Evolutiva*" (pp. 1-38). Editorial DYKINSON, S.L. 2005.
- [3] Alba, F. "Deep Learning". 2019.
<https://es.mathworks.com/help/optim/multiobjective-optimization.html>
- [4] Arbaoui, T. *Modeling and Solving University Timetabling Problem using the Constraints Satisfaction Model: A Case Study*. <https://doi.org/10.1109/ECAI52376.2021.9515060>. 2014
- [5] Arbaoui, T. *Modeling and solving university timetabling*. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne (UTC). 2014.
- [6] Arbaoui, T. *Investigación de operaciones: Una introducción (10ª ed.)*. Pearson. 2017.
- [7] Asmuni, H., Burke, E., Garibaldi J. & McCollum B. *Fuzzy Multiple Heuristic Orderings for Examination Timetabling*. PATAT. 2005.
- [8] Ayob, Masri, Ariff Md. Ab. Malik, Salwani Abdullah, Abdul Razak Hamdan. *Solving a Practical Examination Timetabling Problem: A Case Study*. 2007.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-74484-9_53
- [9] Alghamdi, H., et al. *A Review of Optimization Algorithms for University Timetable Scheduling*. Engineering, Technology & Applied Science Research. 2020.
- [10] Boado, M., Custodio, L. y Ramírez, R. *La deserción estudiantil universitaria en la Udelar y en Uruguay entre 1997 y 2006*. CSIC. 2011.
- [11] Burke, E. K., & Petrovic, S. (2002). *Recent Research Directions in Automated Timetabling*. European Journal of Operational Research. 2002
- [12] Burke, E. K., & Landa Silva, J. D. (Sin fecha). *The Design of Memetic Algorithms for Scheduling and Timetabling Problems*. Automated Scheduling, Optimisation and Planning Research Group, School of Computer Science and IT, The University of Nottingham, UK.
- [13] Coello Coello, C. A., Lamont, G. B., & Van Veldhuizen, D. A. "Evolución multiobjetivo: Aspectos teóricos y algoritmos" Acento Editorial. 2007.
- [14] Corne, D., Dorigo, M., & Glover, F. (Eds.). "Nuevas ideas en optimización". 2008.
- [15] Dirección general de planeamiento Universidad de la República. *Ingresos a Carrera según Área y Servicio por Localización y Sexo – 2020*.

https://planeamiento.udelar.edu.uy/publicacion_generica/ingresos-a-carrera-segun-area-y-se-rvicio-por-localizacion-y-sexo-2020/.

[16] Elliman, D. G. *Examination Timetabling in British Universities: A Survey*. In Proceedings of the Conference (pp. 52). 1995. https://doi.org/10.1007/3-540-61794-9_52

[17] Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República. "Carreras de Grado". 2023. <https://www.fing.edu.uy/es/ensenanza/carreras-de-grado-old>.

[18] Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República. "Historia de la Udelar". <https://udelar.edu.uy/portal/institucional/historia-de-la-udelar/>

[19] Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República. "Currículas Sugeridas por Carreras". <https://www.fing.edu.uy/es/node/38243>

[20] Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República. "Parciales". 2023. <https://www.fing.edu.uy/es/bedelia/parciales>.

[21] Gasparotti, C. "Resource Allocation Within A Project Using Heuristic Algorithm". 2011. https://www.researchgate.net/publication/260085658_Resource_allocation_within_a_project_using_heuristic_algorithm/link/5486c5540cf2ef34478c2656/download?tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19

[22] Islam, T., Shahriar, Z., Perves, M.A. and Hasan, M. *University Timetable Generator Using Tabu Search*. Journal of Computer and Communications, 4, 28-37. (2016) <http://dx.doi.org/10.4236/jcc.2016.416003>

[23] ITC 2019: International Timetabling Competition. 2019. (n.d.). <https://www.itc2019.org/home>

[24] Jensen, Tommy R. *Graph coloring problems*. Wiley-Interscience publication. 1995.

[25] Khan Academy. *Algoritmos de aprendizaje automático* (artículo). (n.d.). <https://es.khanacademy.org/computing/ap-computer-science-principles/data-analysis-101/x2d2f703b37b450a3:machine-learning-and-bias/a/machine-learning-algorithms>

[26] KeepCoding. "¿Qué son los modelos de caja negra? | KeepCoding Bootcamps. *KeepCoding Bootcamps*". 2023 <https://keepcoding.io/blog/que-son-los-modelos-de-caja-negra/>.

[27] Kenekayoro. "Incorporating Machine Learning to Evaluate Solutions to the University Course Timetabling Problem." 2019.

[28] Kennedy, J., Eberhart, R. C., & Shi, Y. "Enjambre de partículas: conceptos básicos y experimentos con el algoritmo de enjambre de partículas". 2001.

[29] Krarup, J., y de Werra, D. *Chromatic Optimization: Limitations, Objectives, Uses, References*. European Journal of Operational Research. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(82\)80002-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(82)80002-7). 1982.

[30] Laporte, G., y Desroches, S. *Examination Timetabling by Computers*. Comput. & Operational Research. 1984. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(84\)90036-4](https://doi.org/10.1016/0305-0548(84)90036-4).

- [31] Martino, T. "Heuristics, Biases, and Decisions in Resource Allocation for Home Care Packages under Consumer Directed Care: A Systematic Review and Thematic Synthesis". 2023. http://eamo.usc.es/pub/mte/descargas/ProyectosFinMaster/Proyecto_1463.pdf.
- [32] MathWorks España. Optimización multiobjetivo - MATLAB & Simulink. (n.d.). <https://es.mathworks.com/help/optim/multiobjective-optimization.html>
- [33] McCollum, B. *University Timetabling: Bridging the Gap between Research and Practice*. PATAT. 2006.
- [34] Open Library UBC. "Constraint Programming Models For Real-World Examination Scheduling". 2022. <https://open.library.ubc.ca/soa/cIRcle/collections/ubctheses/24/items/1.0417561>
- [35] Poder Legislativo de Uruguay. "Ley N° 18331: Protección de Datos Personales y Acción de Habeas Data". 2008. <https://www.impo.com.uy/bases/leyes/18331-2008>.
- [36] Qu, R., Burke, E. K., McCollum, B., Merlot, L. T. G., & Lee, S. Y. A survey of search methodologies and automated system development for examination timetabling. *Journal of Scheduling*, 12(1), 55–89 (2008). <https://doi.org/10.1007/s10951-008-0077-5>.
- [37] Seijas, S. "El problema de coloración de grafos". 2017. http://eamo.usc.es/pub/mte/descargas/ProyectosFinMaster/Proyecto_1463.pdf
- [38] Werra, D. *An Introduction to Timetabling*. *European Journal of Operational Research*. 1984. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(85\)90167-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(85)90167-5)
- [39] DEMİR, Y., & ÇELİK, C. (2018). HIERARCHICAL MATHEMATICAL MODELLING APPROACH FOR a CASE STUDY IN UNIVERSITY TIMETABLING. *Sigma Journal Of Engineering And Natural Sciences Sigma Mühendislik Ve Fen Bilimleri Dergisi*. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/2030445>

10. Anexos

Dado que el tamaño de los documentos complementarios del proyecto es considerable, se comparte un vínculo al anexo digital. En el mismo, se encuentran las herramientas de gestión de proyectos, las actas de reunión, así como los datos de entrada y salidas correspondientes utilizadas a lo largo de la elaboración del proyecto.

▣ Anexo Digital - Proyecto de grado NERI, PEIRANO