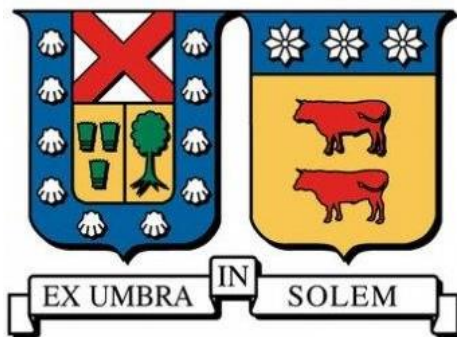




UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

**MODELO DE PROGRAMACIÓN DE DÍAS LIBRES Y ROTACIONES DE TURNOS DE LOS
CONDUCTORES DE UNA ORGANIZACIÓN DE TRANSPORTE PÚBLICO
METROPOLITANO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL INDUSTRIAL

AUTOR

DANIELA FERNANDA ISLA FUENTES

PROFESOR GUÍA

VÍCTOR ALBORNOZ SANHUEZA

PROFESOR CORREFERENTE

ISMAEL KAUAK VERDUGO

SANTIAGO, OCTUBRE, 2023

Dedico este trabajo a mi familia, pareja y amigos, por su gran apoyo en esta etapa tan importante de mi vida.

Resumen Ejecutivo

Este trabajo presenta un modelo de programación entera lineal para optimizar la asignación de días libres y rotaciones de turnos a los conductores de una organización de transporte público en Chile. El modelo propuesto proporciona la asignación de patrones de programación de tal manera de cumplir con los requerimientos operacionales de cada terminal y en lo posible abordar las preferencias de los colaboradores, al menor costo de programación posible. El objetivo es entregar una mejor alternativa de resolución que la actual heurística que utiliza la empresa para realizar la planificación. La utilidad del modelo se demuestra a partir de programaciones quincenales de turnos oficiales en la organización.

Palabras Claves: OPTIMIZACIÓN - PROGRAMACIÓN ENTERA - PROGRAMACIÓN DE DÍAS LIBRES – PLANIFICACIÓN - TRANSPORTE.

Abstract

This work presents an integer linear programming model to optimize the allocation of days off and shift rotations for drivers in a public transportation organization in Chile. The proposed model provides the assignment of scheduling patterns in such a way as to meet the operational requirements of each terminal and, if possible, address the preferences of the employees at the lowest programming cost. The main goal is to deliver a better resolution alternative than the current heuristic used by the company for planning purposes. The usefulness of the model is demonstrated through biweekly scheduling of official shifts within the organization.

Keywords: OPTIMIZATION – INTEGER PROGRAMMING - PROGRAMMING OF DAYS OFF – PLANNING – TRANSPORTATION.

Índice de Contenido

1	Introducción.....	8
1.1	Contexto.....	8
1.2	Objetivos	10
1.2.1	Objetivo General	10
1.2.2	Objetivos Específicos.....	10
1.3	Estructura.....	11
2	Marco Teórico	12
2.1	Breve historia de la empresa.....	12
2.1.1	Área de planificación y desarrollo de la organización	12
2.2	Plan Operacional de Transporte.....	14
2.3	Antecedentes planificación.....	14
2.4	Algoritmo de programación de conductores	18
2.4.1	Condiciones para generar la programación de conductores.....	20
2.4.1.1	Reglas Legales.....	20
2.4.1.2	Reglas Internas	21
2.4.2	Parámetros iniciales de programación	25
2.4.3	Matriz de días libres y rotaciones	27
2.4.4	Heurística actual para obtener la matriz de días libres y rotaciones.	28
2.5	Problemas con Algoritmo de Conductores	29

3	Metodología	31
3.1	Definición del problema.....	31
3.2	Formulación de un modelo matemático.....	32
3.3	Desarrollo de aspectos de patrones de programación.....	35
4	Resultados	39
4.1	Puesta en marcha	40
4.2	Análisis de Resultados	41
4.2.1	Indicadores Medición Solución Matriz de Días Libres y Rotaciones	41
4.2.2	Cambios manuales de días libres y rotaciones	47
4.2.3	Aspectos Generales.....	49
5	Conclusiones.....	51
6	Bibliografía	53

Índice de Tablas

Tabla 4.1: Indicador de costos de la solución entregada en términos de operación por desviación en la asignación de requerimientos operacionales.	44
Tabla 4.2: Indicador de desviación promedio absoluta por tipo de rotación.....	46
Tabla 4.3: Cantidad de movimientos manuales de días libres para la programación quincenal de turnos de los conductores.	48

Índice de Figuras

Figura 2.1: Módulo de parámetros de programación de conductores. 26

Figura 2.2: Módulo de matriz de días libres y rotaciones de conductores. 27

1 Introducción

1.1 Contexto

La planificación de turnos es un proceso fundamental en las organizaciones que prestan servicios los 365 días del año, presentándose como un desafío de gran relevancia en diversas industrias de servicios, como operadores telefónicos, enfermeras en hospitales, policías, personal de transporte, entre otros. (Pinedo, 2009)

Una planificación estratégica permite garantizar que las empresas puedan satisfacer las demandas de los usuarios de manera efectiva, al mismo tiempo que cuenta las necesidades de sus colaboradores al establecer una rotación equitativa de horarios y asegurar que todos tengan una distribución de días de descanso adecuada. Esto se ha presentado como un tema de interés en la literatura académica debido a sus ventajas prácticas. Sin embargo, muchas instituciones todavía elaboran estas listas de forma manual, lo que implica un esfuerzo considerable y a menudo provoca problemas.

Entre las consecuencias negativas asociadas a una asignación de turnos inadecuada, destacan el desequilibrio en la cobertura de demanda, manifestándose tanto en déficit como en exceso de personal disponible, así como cambios frecuentes en la programación, lo que conlleva un aumento notorio en la insatisfacción laboral. Este último aspecto tiene un impacto directo en la tasa de ausentismo y la elevada rotación de personal. Además, las decisiones relacionadas con la asignación de horarios también ejercen influencia en la calidad de vida de los trabajadores, afectando su vida social, familiar y su salud en general.

Lo anterior motiva a implementar modelos matemáticos que ayuden a optimizar la asignación de turnos y resolver los desafíos relacionados con la planificación, ya que La automatización de este proceso ofrece ventajas como una distribución más eficiente de los empleados en las listas, ahorro de tiempo en su preparación y en última instancia, una reducción de costos. Esto es particularmente relevante dado el gran volumen de información requerida, que incluye requisitos legales, preferencias del personal y limitaciones contractuales (Wickert et al., 2020).

En términos generales, las particularidades únicas presentes en diversas industrias y organizaciones implican la necesidad de desarrollar modelos y algoritmos específicos para solucionar los desafíos de programación de personal en distintas áreas de aplicación (Ernst et al., 2004). Más aun cuando los colaboradores año a año negocian nuevas condiciones en su contrato como días libres en fechas especiales, turnos fijos, descansos obligatorios, entre otros.

En relación con el rubro del transporte, el área de planificación y desarrollo de una empresa chilena ha reconocido la necesidad de abordar esta problemática y mejorar su actual algoritmo de programación para la planificación de personal, específicamente la asignación de días libres y rotaciones de turnos, lo cual ha sido identificado como una propuesta para ser desarrollada en este trabajo de memoria para la obtención del título de ingeniería.

En el contexto académico, este tema se aborda desde la perspectiva de la Gestión de Operaciones y ha sido ampliamente investigado. Este problema se conoce como programación de personal, y cuando se enfoca en la programación de horarios para conductores, se denomina Driver Rostering Problem. Este problema es altamente complejo, con numerosos factores a considerar y una serie de restricciones que deben cumplirse. De hecho, en términos de su dificultad computacional, se clasifican como problemas NP-hard (Osogami y Imai, 2000).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Formular y aplicar un modelo de optimización para resolver el problema de la asignación de días libres y rotaciones para los turnos de los conductores de una organización de transporte público metropolitano. Esto tiene como finalidad reemplazar la heurística que se ejecuta en el actual algoritmo de programación de conductores de la organización.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudiar y analizar el actual algoritmo de programación de los turnos de conductores que la organización utiliza.
- Formular un modelo de optimización que asigne patrones de programación a los conductores, obteniendo una matriz de días libres equilibrada que permita atender la operación y cumplir con las reglas legales e internas de la organización.
- Minimizar la cantidad de cambios manuales que se deben hacer sobre la programación generada por el algoritmo de programación de conductores.
- Reducir y/o eliminar patrones de programación que no son deseados en la planificación.
- Evaluar el desempeño de la implementación del nuevo modelo de programación.

1.3 Estructura

La estructura de la memoria es la siguiente: En primera instancia, en el capítulo 2 se presenta el marco teórico en donde se describen antecedentes de la empresa, un breve resumen sobre el área de planificación y desarrollo, y de cómo esta entrega valor a la organización. Además, se explica cómo se lleva a cabo la planificación de turnos y las condiciones con las que se realiza. Por último, se presenta los deseables que busca la organización para mejorar el algoritmo actual.

En el capítulo 3 se formula el modelo de optimización entera lineal, a partir de las condiciones establecidas anteriormente y tomando en consideración los problemas que se desean solucionar y aspectos deseables que busca obtener la organización como resultado de este trabajo. Además, se menciona el desarrollo de nuevas condiciones incorporadas en la generación de la data para incorporar en el algoritmo de programación.

En el capítulo 4 se detallan los resultados del modelo de optimización, así como un análisis comparativo de las soluciones entregadas implementando la heurística actual y la propuesta del modelo.

Posteriormente, el capítulo 5 muestra las conclusiones obtenidas a partir de todo el trabajo de desarrollo y análisis expuesto en el capítulo anterior, además de mostrar posibles mejoras y extensiones al modelo. Finalmente, se encuentra la bibliografía utilizada.

2 Marco Teórico

2.1 Breve historia de la empresa

Buses Metropolitana S.A., más conocida como METBUS, es una empresa dedicada al transporte público de pasajeros en la Región Metropolitana. La organización actualmente cuenta con la concesión de alrededor de 70 servicios del sistema RED Movilidad. Esta actividad económica representa más del 99% de sus ingresos. Por esta razón, la compañía enfoca su estrategia en dos pilares fundamentales. El primero es la calidad de servicio a los usuarios, la que se traduce en el tipo de bus, su mantención, capacitación y fiscalización a los conductores, entre otras medidas. El segundo pilar corresponde al cumplimiento de las exigencias de la autoridad de transporte a mayor grado posible, colaborando con ella en cualquier actividad que permita entregar un mejor servicio público a los usuarios.

En cuanto a sus actividades, Buses Metropolitana S.A. ofrece servicios de transporte cortos y expresos, en el sector Poniente de Santiago abarca las comunas de Santiago, Maipú, Estación Central, Pudahuel, Lo Prado, Cerro Navia, Quinta Normal, Renca, Lo Espejo, Cerrillos, San Ramón, La Cisterna y Pedro Aguirre Cerda, mientras que en el sector Oriente las comunas de Providencia, Las Condes, La Reina, Macul, Peñalolén, La Florida, Vitacura, Lo Barnechea y Ñuñoa. (Metbus, 2022)

2.1.1 Área de planificación y desarrollo de la organización

El área de Planificación y Desarrollo de METBUS es la encargada de incorporar la ingeniería dentro de la organización, buscando siempre mejorar los procesos entre las distintas

áreas y colaborar activamente en proyectos de inclusión y seguridad vial. En este sentido, se sigue trabajando para optimizar los turnos de los conductores, buscando reducir las horas de conducción, maximizar el cumplimiento operacional y cumplir con las normas legales y preferencias de los conductores. Para lograr estos objetivos, se continúa en la integración de nuevas herramientas tecnológicas y en el desarrollo de evaluaciones para los conductores, que permitan una mejor gestión de los beneficios, traslados, solicitudes de turnos fijos y horas extras.

Por una parte, la subárea de planificación es la encargada de asignar la programación quincenal de turnos de los conductores, los cuales utilizan un sistema cargado con una heurística de programación que permite asignar días libres y rotaciones de turnos. A su vez, se otorga la jornada laboral con el horario de citación para los días trabajados que correspondan. Los que participan de esta actividad deben estar constantemente en contacto con el jefe de patio de cada terminal, para poder responder a las observaciones realizadas de la programación según las indicaciones de operación que se requiera y/o la solicitud de permisos, días libres, turnos fijos de los conductores, etc.

Por otra parte, la subárea de desarrollo compuesta por analistas de computación, ingenieros civiles industriales y computación se encarga de proporcionar soluciones concretas a las demás áreas de la organización relacionadas con el transporte público, la gestión de recursos humanos, las adquisiciones, manejo de inventarios y la planificación de turnos, mediante la creación de los sistemas de gestión integral.

2.2 Plan Operacional de Transporte

Toda empresa de transporte público metropolitano debe cumplir con lo denominado plan operacional, el instrumento que define y regula las condiciones y características de los servicios de transporte que los concesionarios deben prestar a los usuarios todos los días del año.

Los servicios están caracterizados por una serie de aspectos como la identificación del código y nombre, y otros relativos a la prestación del servicio, a saber: detalle de los trazados, frecuencias, capacidades de transporte, horarios de salida de buses, distancias y velocidades de los servicios, secuencia de paradas, salidas extraordinarias, entre otros. (Directorio de Transporte Publico Metropolitano & Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, 2023)

Sobre la base del programa de operación se medirá el grado de cumplimiento del contrato en materia operacional. En consecuencia, resulta clave realizar una planificación que permita maximizar el cumplimiento de los estándares de servicio establecido.

2.3 Antecedentes planificación

La asignación eficiente de flota de buses y conductores en el transporte público es crucial para garantizar un funcionamiento óptimo y satisfacer las necesidades de los usuarios. En el caso específico de METBUS, se lleva a cabo un proceso de planificación que implica la construcción de buses y conductores virtuales, los cuales se traducen posteriormente en una planificación de salidas y turnos teóricos de conductores para cada terminal y tipo de día (laboral, sábado, domingo y/o festivo).

Un elemento fundamental en este proceso es el concepto de turno teórico, el cual se refiere al horario de entrada y salida de un conductor en un terminal determinado, junto con la asignación de un grupo de viajes que debe realizar durante su jornada. Cada turno está asociado a un tipo de contrato, ya sea part-time o full-time, dependiendo de la duración de la jornada laboral.

Los turnos teóricos deben ser asignados a conductores reales, lo cual implica seguir una serie de reglas y consideraciones específicas:

- Reglas legales establecidas por la Dirección del Trabajo: Es necesario cumplir con las regulaciones laborales vigentes para garantizar que los turnos asignados cumplan con las normativas correspondientes.
- Restricciones particulares de los conductores: Cada conductor puede tener restricciones específicas, como beneficios de días libres o la posibilidad de tener un día libre en su cumpleaños. Estas consideraciones deben tenerse en cuenta al asignar los turnos teóricos, de manera que se respeten los derechos y preferencias individuales de los conductores, en la medida de lo posible.
- Estado del conductor: Es importante tener en cuenta el estado del conductor en el momento de realizar la asignación de los turnos. Esto incluye verificar si el conductor estará disponible o no disponible debido a diferentes circunstancias.

En la actualidad, los planificadores de la organización llevan a cabo una programación de turnos quincenal para los conductores. Esta programación detalla las jornadas asignadas,

incluyendo el turno teórico y la justificación correspondiente, que puede ser laboral, día libre, vacaciones, licencia médica, permiso, capacitación, entre otras.

El objetivo principal de esta programación es asignar los turnos de manera que se respete en la medida de lo posible el perfil teórico de conductores. El perfil teórico se refiere a la cantidad de conductores que deben trabajar en el terminal durante cada hora del día. Para determinar este perfil, se considera que un conductor está trabajando únicamente cuando tiene una justificación laboral.

Para resolver el problema de asignación de programación quincenal a los conductores, hasta el momento se ha dividido el problema en dos partes:

1. Asignar los días libres y rotaciones. Para esta asignación se consideran las vacaciones, licencias médicas, permisos y capacitaciones como inamovibles por el algoritmo, y se respetan las condiciones para generar la programación de conductores. El resultado de este proceso se traduce en una matriz de días libres y rotaciones.
2. Asignar turnos. Dado el resultado de la primera parte, se asigna hora de ingreso y duración de jornada para cada día laboral, respetando la rotación asignada en el punto anterior.

La rotación se define como una división del día para simplificar la asignación de turnos. Son tres tipos: mañana, tarde y noche. La solución considera asignar un horario amplio para luego asignarle un horario particular en la siguiente etapa.

La primera división del problema, en adelante llamado problema de matriz de días libres y rotaciones, implica que los turnos teóricos se simplifiquen en requerimientos operacionales por tipo de rotación, por lo que cada jornada laboral dependiendo del horario de entrada corresponderá a un tipo de rotación según los siguientes horarios:

- Rotación mañana: 04:00 hrs – 10:59 hrs.
- Rotación tarde: 11:00 hrs – 23:59 hrs.
- Rotación noche: 00:00 hrs – 03:59 hrs.

Es decir, una jornada laboral que inicie a las 7:30 hrs corresponde a un requerimiento operacional de mañana. Cabe señalar que aunque los turnos teóricos tengan asociado un tipo de contrato, solo se considera en la segunda parte del problema, en adelante llamado problema de asignación de turnos. Debido a esto, en el proceso anterior se asume que los requerimientos pueden ser abordados por un conductor full-time o part-time, ya que culturalmente dentro de la organización se acepta que una jornada tipo full-time sea realizada por un conductor part-time por la realización de horas extras.

Cabe señalar que los turnos teóricos son construidos en un procesamiento previo a la programación de conductores mediante una optimización de horarios de salida, tiempo de traslados, descanso y posicionamiento de buses, por lo que en este contexto se asume como un parámetro conocido para asignación de días libres y rotaciones.

Ambos problemas se desarrollan en el algoritmo de programación de conductores generado por el equipo de desarrollo de METBUS, el cual se ejecuta en el sistema de gestión integral creado para la planificación de la organización, llamado SGI-Planning. La descripción del algoritmo se describe a continuación.

2.4 Algoritmo de programación de conductores

El objetivo del algoritmo es generar todas las posibles combinaciones de días libres y rotaciones para los conductores, con el fin de encontrar la mejor combinación que cumpla con los requerimientos del terminal, para luego realizar la asignación de turnos. La programación se realiza en base a una quincena y un terminal específico.

Para comenzar, el algoritmo realiza consultas sobre la base de datos para conocer las características de las semanas a programar, tal como: días festivos, requerimientos operacionales (turnos teóricos), cantidad de conductores activos e inactivos y restricciones de conductores (horarios fijos, días libres obligatorios, entre otros).

Después de realizadas las consultas, el algoritmo genera la data necesaria para la programación quincenal. Primero, se agrupan los conductores que tienen las mismas condiciones iniciales y restricciones en cuanto a los días libres y las rotaciones. Estas condiciones son las siguientes:

- Días continuos trabajados.
- Días libres y domingos libres mínimos y máximos que se le deben asignar a un conductor dentro del rango de fechas. Se diferencia estos máximos y mínimos por mes, si es que hay un cambio de mes dentro del rango.
- Rotación de las semanas previas al inicio de la programación.
- Restricciones semanales sobre:
 - Días que debe trabajar obligatoriamente.

- Días con justificación de no trabajar que no es un día libre como; vacaciones, licencias médicas, etc.
- Días libres obligatorios.
- Rotaciones permitidas para días de semana.
- Rotaciones permitidas para fines de semana.

Lo anterior es realizado con la motivación de reducir el espacio de búsqueda de patrones de programación a un conjunto más manejable y factible, dado que conductores que tengan las mismas condiciones iniciales también tienen las mismas posibilidades de patrones de programación a asignar.

Después de crear los grupos de conductores, se generan todos los posibles patrones teniendo en cuenta únicamente los días festivos que caen dentro del período de programación. Un patrón de programación es construido por tantos patrones semanales según sea las semanas por programar. Dado que actualmente se realiza una programación quincenal, el patrón de programación tiene 2 patrones semanales.

Un patrón semanal considera 4 elementos: la rotación de la semana, la rotación del fin de semana, los días libres y los días con justificación para no trabajar que no son días libres. Este último elemento puede ser nulo.

Puesto que la programación lleva la lógica anterior, un conductor que tenga vacaciones o licencia médica durante la semana de programación, de igual manera se debe asignar un patrón con rotaciones y días libre, pero dado que tiene días con justificación para no trabajar, no son considerados.

El proceso de generación de patrones comienza con generar todas las combinaciones de días libres y luego las combinaciones de rotaciones donde se le agregan los días libres posibles. Posteriormente, se arman todos los posibles patrones uniendo los patrones semanales según las combinaciones factibles para programar.

Por último, para cada grupo de conductores se evalúan sus condiciones y se filtran los posibles patrones que se les puede asignar. Si no se le puede asignar ningún patrón, se asigna un patrón por defecto que es para todas las semanas rotación mañana y domingo libre. Las condiciones para filtrar los patrones de programación se describen a continuación.

2.4.1 Condiciones para generar la programación de conductores.

Al generar una programación de conductores, hay que considerar las siguientes reglas legales y/o internas de la organización.

2.4.1.1 Reglas Legales

- **Séptimo día libre:** Después de 6 días seguidos trabajados, todo conductor debe tener al menos un día libre (o no trabajado).
- **Dos domingos libres:** Por normativa legal todos los conductores deben tener al menos dos domingos libres al mes calendario.
- **Horas de descanso:** Entre el término de un turno y el inicio del siguiente debe haber al menos 10 horas de diferencia, para efectos de planificación y asignación de turnos se considera 12 horas.

- **Cantidad de libres mensuales:** Se debe asignar como mínimo la cantidad de libres mensuales correspondiente a los rojos calendario del mes (feriados y domingos). En caso de no asignarse se debe considerar la nómina de compensación ingresada en RRHH en la cual se incluyen los conductores con disposición a realizar turnos extras.

2.4.1.2 Reglas Internas

- **Cambiar rotación solamente durante el fin de semana:** Los conductores tienen una rotación por semana (mañana, tarde o noche). Pueden cambiar solamente un sábado, domingo o lunes. Un conductor solo puede pasar a la noche después de un día libre y con un turno de mañana anterior al libre.
- **Banda horaria:** La variación de los horarios de citación dentro de los días laborales no debe superar la banda horaria definida (bloques de medias horas).
- **Turnos fijos:** Los conductores pueden tener turnos fijos que se asignan en relación con las definiciones de turnos que tiene cada terminal, negociaciones sindicalistas y/o solicitudes de preferencias autorizados.
- **Rotación de turnos:** Se debe intencionar el cambio de rotación siempre y cuando las condiciones de cada terminal lo permitan. Sólo podrán pasar conductores rotativos part-time al turno de noche en caso de que la cantidad de fijos no estén todos disponibles y/o el fin de semana donde se mantiene o aumenta el requerimiento operacional del turno.

- **De la asignación de los días libres:**

- No puede tener dos libres continuos en días laborales: Sólo se permite un doble libre durante el fin de semana y/o con feriados.
- La distribución de días libres debe ser homogénea entre días laborales, sábados y domingos. Para los días laborales esta regla se debe aplicar dentro de un mismo turno.
- Libres en cumpleaños: Todos los conductores deben tener día libre el día de su cumpleaños.
- Fin de semana libre: Dentro de lo posible asignar en forma equitativa fines de semana libres a los conductores.
- Vuelta de vacaciones: Al volver de vacaciones, se trabaja el primer día laboral. Por esta razón, si un conductor termina sus vacaciones un viernes, volvería a trabajar el lunes de la semana siguiente. Si el primer día después del término de vacaciones es festivo, debe asignarse libre. No puede ser asignado fin de semana libre la semana siguiente al término de vacaciones.
- Previo a las vacaciones: No puede ser asignado libre a no ser que la asignación de mínimos domingos libres del mes lo requiera.
- Retorno de inasistencias: La programación posterior a una licencia, vacaciones o permiso debe ser laboral, nunca día libre.

- **Grupos de acercamiento:** Programar a conductores en banda horaria de 30 minutos con mismos días libres.

- **Banda de citación:** Asignar los turnos dentro de una banda horaria definida.

- **Banda de exclusión:** Asignar los turnos fuera de una banda horaria definida como exclusión.
- **Restricciones de edad:** Los conductores mayores a 70 deben cumplir banda especial de citación.
- **Restricción de turno nocturno:**
 - Sólo programar hombres.
 - En un día laboral, solo puede tener nocturno un turno fijo nocturno.
 - En fin de semana, puede tener nocturno un part-time rotativo.
- **Restricción de servicio:** Se deben considerar en la asignación de servicios las reglas ingresadas en forma masiva, por sexo, por edad, etc.
- **De la cobertura:** Se debe intencionar la asignación de todos los turnos teóricos definidos, considerando la siguiente secuencia de priorización.
 - Días laborales: Noche, mañana, tarde, con prioridad en las puntas si la cantidad de conductores operativos es menor que las cantidades del perfil teórico.
 - Fin de semana: Noche, tarde, mañana, sin afectar la rotación de turnos de los conductores.
- **Asignación por tipo de contrato:** Se debe poder asignar turnos Full-Time a Part-Time, en caso de Part-Time a Full-Time sólo si se selecciona la opción.

- **Días libres “islas”:** Se considera “isla”, cuando un trabajador presenta la siguiente estructura de trabajo: DL – trabaja - DL, donde DL es día libre. Si bien es un no deseable se entiende que es un caso que se puede dar.

Dada las condiciones, los pasos que sigue el algoritmo para filtrar los patrones de programación son los siguientes:

1. Condición del 7mo día libre, considerando los días continuos trabajados previos a la programación.
2. Condiciones de días y domingos libres mínimo y máximo. Se filtra primero por libres mínimos y luego por máximos.
3. No se puede partir con un día libre si la programación anterior terminó con un libre. Esto es válido solo si el primer lunes no es feriado o es un libre obligatorio.
4. Restricciones semanales, considerando primero las posibles rotaciones y luego las restricciones de días libres. Si ningún patrón cumple con una condición de días libres, se agrega este día libre a todos los posibles patrones. Por último, se filtra por días trabajados obligados y días con justificación de no trabajar.
5. Se filtra rotación que ha sido repetida las dos semanas previas y todas las combinaciones donde podría repetir por tercera vez una misma rotación. Este filtro solo se hace para aquellos conductores que tienen más de una rotación permitida y no para los que presenten turnos fijos como restricción.

Mientras se filtran los patrones, se agrega un costo asociado a cada patrón, donde se castiga repetir rotación por segunda semana, tener una rotación sin requerimiento operacional y por cada día libre asignado. Los costos del patrón dependen del conductor y sus condiciones iniciales, por lo que dos patrones iguales pueden tener distintos costos. Cabe señalar que los posibles patrones se filtran solamente si hay al menos un patrón que cumplan las condiciones.

La filtración de patrones más relevante se realiza con la condición de días y domingos libres mínimos y máximos dado por la parametrización inicial que se debe ingresar para realizar la programación.

2.4.2 Parámetros iniciales de programación

Para realizar la asignación de días libres y rotaciones a los conductores, antes de ejecutar el algoritmo de programación, los planificadores deben ingresar los parámetros de programación para cada mes y terminal.

En el caso particular del problema de matriz de días libres y rotación, la relevancia cae en el ingreso de parámetros de días libres y domingos libres, los cuales dentro de la generación de la data servirán como límite para realizar la filtración de patrones de programación factibles.

El resto de los parámetros son propios del problema de asignación de turnos. Dado que en esta memoria solo se van a desarrollar una mejora en la primera parte del algoritmo, no son relevantes de describir en esta ocasión.

Figura 2.1: Módulo de parámetros de programación de conductores.

Parámetros de Programación					
Parámetros Generales		Días Libres		Citación Previo DL	
Mes		Mínimo		Part-Time	
Inicio tarde		Máximo		Full-Time	
Inicio PreNoc					
Bloque de exclusión		Domingos Libres		Relajación restricciones	
Inicio		Mínimo		Bandas (+/-)	
Término		Máximo		Turno PT a FT	☐
				Turno FT a PT	☐
Cargar información					

(Fuente: SGI-Planning METBUS, 2023).

Los planificadores tienen la responsabilidad de establecer el mínimo y máximo de días libres a entregar. El mínimo de días libres para entregar por mes corresponde a los rojos calendarios según las reglas legales que se deben cumplir. El máximo de días libres es un parámetro adicional para poder filtrar estableciendo un límite para la cantidad de patrones factibles por grupos. Dado las características del terminal, como tener un superávit de conductores sobre los requerimientos operacionales, se pueden otorgar más libres que los mínimos legales. En caso contrario el máximo de días libres es igual al mínimo de días libres.

Terminando el proceso de filtración de patrones para cada grupo, finaliza la etapa de generación de data para dar paso a la heurística que se utiliza actualmente para obtener la matriz de días libres y rotaciones.

2.4.3 Matriz de días libres y rotaciones

En el contexto de planificación de mano de obra, una matriz de días libres y rotaciones es una representación tabular que muestra la asignación de días libres y rotaciones para un grupo de trabajadores en un determinado período de tiempo.

Esta matriz tiene una estructura bidimensional, donde las filas representan a los trabajadores individuales y las columnas representan los días o períodos de tiempo en los que se realiza la planificación. Cada celda de la matriz indica la asignación específica para un trabajador en un día determinado, indicando si ese día es un día libre o si está asignado a una rotación específica.

Figura 2.2: Módulo de matriz de días libres y rotaciones de conductores.

Rol	...	D 03-09-2023	L 04-09-2023	M 05-09-2023	X 06-09-2023	J 07-09-2023	V 08-09-2023	S 09-09-2023	D 10-09-2023
1920	...	LIBRE	VACACIONES	VACACIONES	VACACIONES	VACACIONES	VACACIONES	VACACIONES	VACACIONES
10261	...	05:20-14:00	05:52-10:52/550	05:52-10:52/550	05:52-10:52/550	05:52-10:52/550	05:52-10:52/550	LIBRE	17:00-22:00/RSV
11743	...	14:31-00:40	16:16-21:16/521c	16:16-21:16/521c	16:16-21:16/521c	16:16-21:16/521c	16:00-21:00/RSV	LIBRE	07:15-16:41/528
13093	...	VACACIONES	VACACIONES	VACACIONES	VACACIONES	VACACIONES	VACACIONES	VACACIONES	VACACIONES
13099	...	14:05-21:32	11:21-18:44/550	11:21-18:44/550	11:21-18:44/550	11:21-18:44/550	11:21-18:44/550	LIBRE	05:25-14:28/550
13584	...	VACACIONES	16:03-00:16/528	16:40-21:40/RSV	16:46-21:46/521c	16:40-21:40/RSV	16:16-21:16/521c	LIBRE	16:35-21:35/RSV
14143	...	LIBRE	15:14-00:42/550	15:10-20:10/RSV	LIBRE	15:17-23:22/528	15:10-20:10/RSV	11:30-16:30/RSV	LIBRE
14350	...	LIBRE	05:05-11:46/550	05:35-13:56/528	05:05-11:46/550	05:55-15:07/528	05:20-10:20/RSV	LIBRE	17:20-22:20/RSV
14410	...	LIBRE	06:00-11:00/521c	06:00-11:00/521c	LIBRE	06:00-11:00/521c	06:00-11:00/521c	05:05-14:14/550	LIBRE
14485	...	LIBRE	05:35-13:56/528	05:40-12:59/550	05:40-12:59/550	05:40-12:59/550	05:55-15:07/528	LIBRE	13:35-22:58/550
14542	...	06:06-14:09	05:55-15:07/528	05:55-15:07/528	05:25-15:24/528	LIBRE	05:05-11:46/550	06:40-12:57/550	LIBRE
14584	...	06:00-15:17	07:35-16:37/528	07:30-12:30/RSV	07:30-12:30/RSV	07:30-12:30/RSV	LIBRE	CAPACITACIÓN	LIBRE

(Fuente: SGI-Planning METBUS, 2023).

La matriz de días libres y rotaciones es una herramienta útil para visualizar y gestionar la programación de conductoras y conductores, ya que permite identificar rápidamente la disponibilidad y la asignación de los trabajadores en diferentes momentos. Esto facilita la tarea

de asegurar una distribución equitativa de los días libres y asignar las rotaciones de manera eficiente según las necesidades operativas.

2.4.4 Heurística actual para obtener la matriz de días libres y rotaciones.

Dada la generación de la data, la heurística empieza con recorrer todos los grupos de conductores, ordenados ascendentemente por cantidad de posibles patrones para asignar y se le asigna el patrón con menor nota. Esta nota depende de los excesos y déficit en los requerimientos asignados (que sean mayores a la diferencia aceptable), la cantidad de días libres, que tan parejo están distribuidas las deficiencias y excesos, entre otras características.

Dado la asignación del patrón de programación con menor nota para cada uno de los conductores, la heurística busca corregir ciertos aspectos de la matriz de días libres y rotaciones, para esto primero se intenta cambiar rotaciones repetidas contrarias entre conductores y luego se recorre por conductor buscando un mejor patrón que permita atender requerimientos operacionales insatisfechos. Este proceso es repetido 3 veces

Este enfoque fue establecido después de que el equipo de desarrollo llevó a cabo varias pruebas y descubrió que esta cantidad de repeticiones era óptima para obtener resultados significativos. A pesar de considerar aumentar el número de repeticiones, se determinó que la mejora en la solución no justificaba el costo adicional en términos de recursos y tiempo.

2.5 Problemas con Algoritmo de Conductores

El equipo de planificación de METBUS se enfrenta a una problemática en la asignación de días libres y turnos de sus conductoras y conductores, debido al algoritmo descrito, en particular la heurística utilizada actualmente. Aunque se reconoce que las heurísticas no garantizan soluciones óptimas, han sido adoptadas como medida para optimizar la programación de manera aproximada o aceptable en menos tiempo y con menos recursos. Sin embargo, la heurística empleada carece de una estrategia de resolución claramente definida, no se encuentra documentada en los repositorios de la organización y no sigue un enfoque metodológico riguroso como los que se encuentran disponibles en la literatura. Además, su criterio de detención no es adecuado, ya que no asegura resultados significativos como se menciona anteriormente. Puesto esto, en el análisis de los resultados entregados por este método, se han identificado los siguientes problemas:

- Se asigna más días libres el sábado que el domingo, siendo que los días sábado tienen más requerimientos operacionales que el domingo.
- Los domingos libres están desequilibrados, a pesar de que no exista un feriado en la quincena de programación.
- Los días libres laborales asignados también se entregan desequilibrados, lo que a fin de mes tiende a concentrar más días libres.
- Se asigna fin de semana libre después de que el conductor vuelve de vacaciones.

Los tres primeros problemas evidencian que la asignación de días libres y rotaciones no se está llevando a cabo de manera correcta. Estos desequilibrios y prácticas ineficientes generan la necesidad de replantear el método de asignación y buscar soluciones más efectivas, ya que los planificadores se ven obligados a realizar la matriz de días libres y rotaciones prácticamente desde cero, lo que consume tiempo y recursos adicionales.

Además de poder brindar una solución a las problemáticas planteadas, también se busca que el algoritmo pueda incorporar los siguientes aspectos deseables:

- Entregar una mayor prioridad de asignar libres a los conductores que tengan menor cantidad de días libres entregados dentro de un periodo de consulta.
- No asignar patrones de programación con fines de semanas libres consecutivos en la programación a conductores.
- No permitir que el algoritmo genere patrones con 3 días libres continuos cuando la programación incluye un lunes festivo (sábado, domingo y lunes).

Lo anteriormente descrito, ha llevado al equipo de desarrollo a reconocer la necesidad de abordar la problemática y mejorar ciertos aspectos en el algoritmo de programación. Dado que el departamento en los últimos años ha tenido una constante recepción de alumnos en práctica y memoristas, la problemática relacionada con la asignación de días libres y rotaciones de los conductores ha sido identificada como una propuesta para ser desarrollada en este trabajo de memoria.

3 Metodología

3.1 Definición del problema

El modelo de optimización propuesto en este trabajo de memoria tiene como objetivo abordar el problema de asignación de días libres y rotaciones de turnos de los conductores de METBUS, con el fin de satisfacer los requerimientos operativos del terminal y garantizar la asignación de días libres en conformidad con las normativas legales y políticas internas de la organización.

Para fundamentar este modelo, se toma como referencia el Nurse Rostering Problem (NRS) planteado en Brucker et al. (2011), que comparte una finalidad similar. El NRS aborda la eficiente asignación de turnos dentro de un período de planificación, teniendo en cuenta restricciones de personal, regulaciones laborales y preferencias individuales. Estas restricciones se dividen en duras, que son obligatorias, y blandas, que conllevan penalizaciones por incumplimiento.

En el enfoque desarrollado en este trabajo, la asignación de turnos diarios para todo el periodo de planificación se aborda como una asignación única de un patrón de programación, donde la información de entrada para cada conductor es la selección de patrones factibles, los cuales cumplen con las restricciones duras, similares a las del NRS. Las restricciones blandas se determinan según las penalizaciones de costos asociadas con los patrones asignados y las desviaciones con respecto a los requisitos.

3.2 Formulación de un modelo matemático

Teniendo presente los objetivos y cuál es el problema a resolver, se procede a la formulación matemática del problema planteado, detallando sus conjuntos, parámetros, variables de decisión, función objetivo y restricciones a continuación:

Conjuntos:

- G : Conjunto de grupo de conductores, indexado por $g \in G$.
- T : Conjunto de tipo día, indexado por $t \in T = \{\text{Laboral, Sábado, Domingo}\}$.
- R : Conjunto del tipo rotación, indexado por $r \in R = \{\text{Mañana, Tarde, Noche, Día Libre}\}$.
- D : Conjunto de días de programación, indexado por $d \in D$.
- P^g : Conjunto de posibles patrones que se les puede asignar al grupo de conductores $g \in G$, indexado por $p \in P^g$.
- P_g^r : Conjunto de patrones que suman para la rotación $r \in R$ del grupo $g \in G$. $P_g^r \subseteq P^g$.

Parámetros:

- $Cantidad_Conductores_g$: Número de colaboradores que pertenecen al grupo $g \in G$.
- $Requerimientos_{d,r}$: Requerimiento de conductores para el día de programación d en la rotación r . $\forall d \in D, r \in R$.
- $Cost_p$: Costo del patrón de programación $p \in P^g$.
- $CostExtraReq_{d,r}$: Costo de asignar un requerimiento operacional adicional para el día $d \in D$ y la rotación $r \in R$.

- $CostMissingReq_{d,r}$: Costo de no asignar un requerimiento operacional para el día $d \in D$ y la rotación $r \in R$.
- $CostMaxReq_{t,r}$: Costo de la máxima desviación de requerimiento operacional adicional asignado para el tipo de día $t \in T$ y la rotación $r \in R$.
- $CostMinReq_{t,r}$: Costo de la máxima desviación de requerimiento operacional faltante asignado para el tipo de día $t \in T$ y la rotación $r \in R$.

Variables de Decisión:

- $patternsAssing_{p,g}$: Cantidad de veces que el patrón p es asignado al grupo de conductores $g \in G$.
- $extraReq_{d,r}$: Requerimiento extra asignado para el día $d \in D$ y la rotación $r \in R$.
- $missingReq_{d,r}$: Requerimiento faltante asignado para el día $d \in D$ y la rotación $r \in R$.
- $maxReq_{t,r}$: Variable auxiliar que representa la máxima desviación de requerimiento adicional asignado para el tipo de día $t \in T$ y la rotación $r \in R$.
- $minReq_{t,r}$: Variable auxiliar que represente la máxima desviación de requerimiento faltante asignado para el tipo de día $t \in T$ y la rotación $r \in R$.

Modelo:

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad & \sum_{p \in P^g, g \in G} Cost_p \cdot patternsAssing_{p,g} + \sum_{d \in D, r \in R} CostMissingReq_{d,r} \cdot missingReq_{d,r} \\
 & + \sum_{d \in D, r \in R} CostExtraReq_{d,r} \cdot extraReq_{d,r} + \sum_{t \in T, r \in R} CostMaxReq_{t,r} \cdot maxReq_{t,r} \quad (1) \\
 & + \sum_{t \in T, r \in R} CostMinReq_{t,r} \cdot minReq_{t,r}
 \end{aligned}$$

s.a.

$$\sum_{p \in P^g} patternsAssing_{p,g} = Cantidad_Conductores_g \quad \forall g \in G \quad (2)$$

$$\sum_{p \in P^r_g, g \in G} patternsAssing_{p,g} + missingReq_{d,r} - extraReq_{d,r} = Requerimiento_{d,r} \quad \forall r \in R, d \in D \quad (3)$$

$$extraReq_{d,r} \leq maxReq_{t,r} \quad \forall t \in T, r \in R, d \in D \quad (4)$$

$$missingReq_{d,r} \leq minReq_{t,r} \quad \forall t \in T, r \in R, d \in D \quad (5)$$

$$patternsAssing_{p,g}, extraReq_{d,r}, maxReq_{t,r}, missingReq_{d,r}, minReq_{t,r} \in \mathbb{Z}^+ \quad (6)$$

La función objetivo (1) busca minimizar el costo de la programación realizada en términos de patrones asignados a los conductores y penalización de las desviaciones de los requerimientos operacionales y días libres. Respecto a las restricciones del modelo, la restricción (2) asegura que cada conductor del grupo se le asigne un patrón de programación. La restricción (3) representa un balance de los requerimientos operacionales y días libres. Las restricciones (4) y (5) asignan a las variables auxiliares la mayor desviación por tipo día y rotación de requerimientos extras y faltantes asignados. Finalmente la restricción (6) describe la naturaleza de las variables.

Con respecto al conjunto R de los tipos rotación, a modo de conveniencia se agrega la rotación “día libre”, ya que al igual que los requerimientos de operación para las distintas rotaciones, se tiene un estimativo de días libres a los conductores para cada día de la programación, el cual es un parámetro de entrada que se obtiene de la generación de data en el paso previo al modelo. Este parámetro tiene la finalidad de equilibrar la asignación de días libres

a nivel mensual, dado que la programación solo se realiza de manera quincenal, por lo que ayuda a balancear la asignación de turnos para la próxima quincena.

En relación con los costos de la función objetivo, estos son fijados a conveniencias de las condiciones de programación explicada anteriormente, donde los patrones de programación no deseados tienen un mayor costo y el incumplimiento de la actividad operacional se castiga. En cuanto a las variables que toma el valor de las desviaciones de requerimientos, tanto el exceso como el déficit buscan ser minimizados, pero tiene un menor costo tener exceso de conductores que un déficit de ellos.

3.3 Desarrollo de aspectos de patrones de programación

Tal como se mencionó en el marco teórico, hay aspectos a mejorar que tiene que ver con la generación de la data, específicamente la filtración de patrones de programación.

Dado que se busca tener una programación más justa, la generación de grupo de conductores pierde su propósito de ser dentro del algoritmo, ya que para lograr tener una programación más equilibrada entre todos los colaboradores, se deben consultar más condiciones iniciales para poder filtrar ciertos patrones de programación de modo de asignar costos adicionales, eliminar una mayor cantidad de patrones no deseados, y/o incluir ciertas preferencias en la asignación de días libres a los conductores. Lo anterior generará que los grupos de conductores desaparezcan en su mayoría y se evalúe el patrón de programación a asignar conductor por conductor, a excepción de los grupos que puedan ser generados debido a pertenecer a “grupos de acercamiento” o “grupo de beneficios sindicalistas” los cuales tienen las mismas condiciones de base y se les asigna siempre el mismo patrón de programación.

Para realizar lo anterior, tomando de base la generación de data realizada por el algoritmo, se continua con el mismo método de consultar las condiciones iniciales de los conductores, de modo de poder filtrar los posibles patrones de programación en el siguiente proceso. Las condiciones que se agregan para la generación de grupo de conductores son las siguientes:

- Verificar si el conductor lleva un periodo de trabajo mayor a 6 meses.
- Días libres asignados en un periodo de 6 meses.
- Domingos libres asignados en un periodo de 6 meses.
- Justificación sábado previo a la programación.
- Justificación domingo previo a la programación.
- Vacaciones o licencias médicas previo y posterior a la programación.
- Inasistencias previas a la programación.
- Domingos libres asignados durante el(los) mes(es) de la quincena a programar.

Dada estas nuevas condiciones, al igual como se filtran los distintos patrones de programación explicados anteriormente, se agrega al algoritmo mediante código en el proyecto, la siguiente lógica para la generación de data:

- Agregar un costo adicional a los patrones de programación que incluyan mayor cantidad de días libres y domingos libres a los conductores que en el último periodo de 6 meses se les ha asignado una mayor cantidad en contraste con el promedio. De manera contraria, a los conductores que tenga un déficit de días libres entregados, se agrega un costo adicional a los patrones que tenga menor cantidad de días libres.

- Eliminar patrones de programación que entreguen fin de semana libre a los conductores que presenten fin de semana libre previo, inasistencias, vacaciones, licencias médicas en los últimos 30 días previo a la programación. Además, también se filtra a los conductores que tengan vacaciones planificadas en las semanas posteriores a la quincena de programación.
- Añadir un costo al patrón que entregue 2 días libres que no sean feriados de lunes a sábado, después de haber entregado domingo libre. Lo anterior no es deseado, ya que se concentran 3 días libres en 1 semana de domingo a sábado.
- Si el conductor presenta fin de semana libre previo a la programación y el primer lunes de la quincena es feriado, se filtran los posibles patrones que considera el lunes como día libre, para no tener dentro de la programación 3 días libres consecutivos.
- Agregar un costo elevado a los patrones que no sigan la lógica de domingos libres consecutivos, dado la consulta de domingos libres asignados y días previos a la programación.

El ultimo punto es de suma importancia, dado que dentro del análisis de las programaciones de turno, se tiene que al implementarse la asignación de domingos libres consecutivos en las semanas de programación, se reducen la asignación de días libre laborales, aumentando la operatividad y/o reduciendo el riesgo de tener un déficit de conductores en los días más importantes de operación de la organización.

Con los puntos mencionados, se cumple con el objetivo de solucionar los problemas de asignación de días libres y los aspectos deseables a incorporar en el algoritmo descritos anteriormente en el marco teórico.

4 Resultados

Finalizado la formulación del nuevo modelo y la lógica implementada de las nuevas condiciones para la filtración de patrones de programación, el algoritmo fue puesto a prueba mediante el desarrollo de código en el proyecto de sistema SGI-Planning de la organización, de modo que los planificadores puedan ver los resultados de la solución en la aplicación con la que desarrollan la planificación de turnos.

El modelo de programación (1) - (6) de asignación de días libres y rotaciones se resolvió utilizando Google OR-Tools, en particular la biblioteca CP-SAT. Google OR-Tools es un conjunto de herramientas de optimización desarrollado por Google que ofrece solucionadores eficientes para problemas de programación combinatoria y de optimización. CP-SAT, dentro de OR-Tools, es un solucionador basado en la programación por restricciones y variables enteras gratuito, que ofrece capacidades de resolución poderosas y eficientes.

Para llevar a cabo la implementación, se utilizó el lenguaje de programación C# y la plataforma Visual Studio. C# es un lenguaje de programación versátil y de propósito general desarrollado por Microsoft, mientras que Visual Studio es un entorno de desarrollo integrado (IDE) utilizado para crear aplicaciones en C# y otras tecnologías de Microsoft.

Esta elección de herramientas y tecnologías permitió modelar y resolver eficientemente el problema de programación en cuestión, permitiendo adaptarse en los proyectos de sistemas de gestión integral de la organización, sin la necesidad de optar por un solver comercial más poderoso como lo es CPLEX o Gurobi para problemas de programación entera lineal. Lo anterior

es posible dado la estructura de patrones de programación que son soluciones factibles para cada conductor, lo cual reduce el tamaño del problema, siendo más sencillo de resolver.

A raíz de lo mencionado anteriormente, durante el desarrollo del trabajo se tuvo que realizar la ejecución mediante la programación en C#, lo que significó una curva de aprendizaje pronunciada debido a la falta de experiencia previa en este lenguaje de programación. Para adquirir este conocimiento, se utilizaron recursos en línea en conjunto con apoyo del equipo de desarrollo de METBUS.

4.1 Puesta en marcha

La puesta en marcha del algoritmo de programación con el modelo propuesto se realizó de manera progresiva. En un principio solo se realizaron pruebas con uno de los planificadores del área, el cual utilizó el modelo para realizar la programación de 3 terminales. Las pruebas fueron satisfactorias, donde la solución entregada brinda notoriamente una asignación equilibrada de días libres cumpliendo con los requerimientos operacionales de los terminales.

Dado lo anterior, posteriormente se fue incluyendo en la prueba del modelo más terminales, de modo que todos los usuarios que utilizan esta herramienta pudiesen aportar un feedback sobre la solución del modelo y ciertos aspectos de los patrones de programación. Finalmente el modelo fue utilizado para realizar la programación de turnos de los conductores en 8 de los 18 terminales de la organización.

4.2 Análisis de Resultados

Para analizar y comparar el comportamiento de la heurística actual y el modelo de programación propuesto en la presente memoria, se consideró el uso de indicadores de medición, para evaluar la calidad de la solución en términos cuantitativos. Se opta por este análisis dado que el costo de programación de la heurística no es comparable con la propuesta del modelo, al tener distintos parámetros y costos asociados.

4.2.1 Indicadores Medición Solución Matriz de Días Libres y Rotaciones

A continuación, se presentan la descripción de los indicadores que se van a utilizar para medir y comparar el resultado que entrega la heurística actual y la propuesta de modelo de optimización para resolver el problema de asignación de días libres y rotaciones de turnos.

Para evaluar la calidad de las soluciones entregadas, se considerará la diferencia entre los requerimientos operacionales teóricos versus los realmente asignados. Un modelo que encuentra soluciones de mayor calidad, como soluciones más cercanas a la óptima o soluciones más realistas en términos de aplicabilidad, puede considerarse mejor. En este caso se puede medir de varias maneras. Teniendo en cuenta costos de operación del rubro en términos generales, se debe considerar que:

Por un lado, tener una mayor cantidad de conductores que la necesaria incrementa los costos adicionales de la operación en términos de horas hombres, más aún cuando los colaboradores realizan horas o turnos extras. Sin embargo, este factor es de menor importancia, por lo que tiene una menor ponderación en la evaluación, ya que se busca minimizar más el déficit que el superávit de conductores, dado que el costo del recurso humano ya está realizado

al tener contratados a los colaboradores. Además, la estructura de conductores de algunos terminales de la organización considera tener más colaboradores ayudando a la operación para cubrir con las salidas de los servicios comprometidos ante cualquier eventualidad durante la operación.

Por otro lado, la disponibilidad de un menor número de conductores conlleva a un incumplimiento de la actividad operacional. En promedio, un conductor recorre 126 [Km] durante una jornada laboral estándar, de acuerdo con los Anexos de plan de operaciones del Directorio de Transporte Público Metropolitano y el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (2023). Como ejemplo concreto, consideremos el servicio 504 de la Red de Movilidad, que abarca una distancia de 31,5 [Km] en su trayecto de ida y vuelta. En una jornada típica, un conductor realiza dos vueltas completas en dicho servicio. Por lo tanto, si no se asigna un conductor para operar este servicio, la falta de un conductor significa la pérdida de 4 salidas y 126 [Km] recorridos en promedio. Además, esto resulta en una falta de cumplimiento de la regularidad y capacidad de transporte acordada para ese tipo de bus en la salida programada.

Lo anterior afecta a los indicadores con lo que se mide el cumplimiento del plan operacional de transporte, teniendo como consecuencia menores ingresos y multas para la organización por no atender lo acordado en el contrato de concesión. Este factor es de gran importancia, ya que no se puede entregar el servicio de transporte con un déficit de personal.

Dadas las características planteadas y el nivel de relevancia para el déficit y superávit de conductores, se tiene el primer indicador de costos sobre la solución es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 KPI_1 = & 30\% * \left(\text{if } Req_{d,r} > 0 : \sum_{\substack{d \in D, \\ r \in R}} CostoExtra \cdot Req_{d,r} \right) + \\
 & 70\% * \left(\text{if } Req_{d,r} < 0 : \sum_{\substack{d \in D, \\ r \in R}} CostoFaltante \cdot |Req_{d,r}| \right)
 \end{aligned} \tag{7}$$

Un mayor valor de este indicador sugiere una solución de menor calidad, ya que no se ajusta a los requerimientos de la operación. La mejor solución estará dada por el menor costo. Cabe destacar que en este indicador no se considera la desviación de requerimiento de días libres, ya que solo tiene énfasis en la actividad operacional.

Otro buen indicador para comparar las soluciones entregadas por la heurística y el modelo de optimización en base a los requerimientos asignados es la desviación promedio absoluta de estos en relación con el valor teórico. Para este se debe obtener el promedio de los valores absolutos de la diferencia entre los requerimientos teóricos vs los asignados en los días de programación, como se muestra a continuación:

$$KPI_{rotation} = \sum_{\in NumDays} \frac{|Req_{d,r}|}{Días\ de\ programación} \tag{8}$$

El resultado obtenido será la desviación promedio absoluta que entrega cada matriz de días libres y rotaciones. Cuanto menor sea la desviación, mejor será la solución entregada por la estrategia empleada, ya que indicará que la diferencia de los requerimientos asignados se ajusta más a los requerimientos teóricos.

Dada la descripción de los indicadores para evaluar y comparar las soluciones entregadas por la heurística y el modelo de optimización, a continuación se presentan los resultados de los indicadores (7) y (8) para una quincena de programación en los 8 terminales que fueron sometidos a prueba.

Tabla 4.1: Indicador de costos de la solución entregada en términos de operación por desviación en la asignación de requerimientos operacionales.

Herramienta	Terminal	Total Conductores	Costo
Heurística	Los Rosales	184	\$ 2.893.400
Modelo			\$ 1.103.200
Heurística	Los Peumos	95	\$ 2.160.600
Modelo			\$ 163.200
Heurística	Los Aromos	147	\$ 2.013.200
Modelo			\$ 459.000
Heurística	Los Almendros	152	\$ 3.496.800
Modelo			\$ 751.400
Heurística	Las Palmas	291	\$ 13.343.999
Modelo			\$ 8.677.400
Heurística	Los Acacios	203	\$ 5.193.600
Modelo			\$ 4.342.200
Heurística	Los Lingues	195	\$ 7.155.000
Modelo			\$ 4.833.600
Heurística	Los Cipreses	192	\$ 6.533.400
Modelo			\$ 2.967.200

(Nota: El costo aproximado de tener un requerimiento faltante y adicional en la operación es de \$70.000 y \$32.000 respectivamente. Lo anterior, según la descripción del indicador realizada anteriormente. Fuente: Elaboración propia).

La Tabla 4.1 presenta el valor que toma el indicador de costos de la solución entregada para los 8 terminales en términos de costos de operación por desviación en la asignación de requerimientos operacionales. Los resultados proporcionados muestran una variabilidad significativa en los costos operativos entre los diferentes terminales. En general, la heurística tiende a generar costos más elevados en comparación con el modelo de optimización. Por ejemplo, en los terminales "Los Rosales," "Los Peumos," "Los Aromos," y "Los Almendros," los costos calculados por la heurística son notablemente superiores a los del modelo, teniendo una variación sobre el 60%.

Destaca especialmente el caso del terminal "Las Palmas," donde se observa una brecha significativa entre ambas herramientas, con un costo excepcionalmente alto calculado por la heurística. En este contexto, el modelo de optimización ofrece una ventaja importante al generar costos más bajos.

Además de la variabilidad de costos entre los terminales y la ventaja evidente del modelo de optimización en la reducción de costos, es esencial destacar un aspecto crítico. Los costos más bajos generados por el modelo de optimización están relacionados en gran medida con un superávit de conductores, lo que significa que la asignación de conductores es más precisa en términos de días de descanso. Esta mejora en la distribución de días de descanso contribuye a una mayor operatividad en los terminales, lo que es un elemento valioso a corto plazo.

Este resultado no solo se traduce en una reducción de costos, sino que también brinda oportunidades estratégicas. La capacidad de reasignar conductores de terminales con un superávit hacia aquellos con déficit puede optimizar la planificación de la operación. Esto no solo conduce a una operación más eficiente en términos de costos, sino que también garantiza un cumplimiento más consistente de los requerimientos operativos, lo que a su vez puede mejorar

la satisfacción de los usuarios y mejorar los indicadores de cumplimiento de operación que estable el Directorio de Transporte Publico Metropolitano.

Tabla 4.2: Indicador de desviación promedio absoluta por tipo de rotación.

Herramienta	Terminal	KPI Mañana	KPI Tarde	KPI Noche	KPI Días Libres
Heurística	Los Rosales	4,50	3,71	1,79	8,57
Modelo		1,36	1,71	1,36	6,86
Heurística	Los Peumos	4,71	2,86	0	5,14
Modelo		3,00	2,14	0	4,29
Heurística	Los Aromos	3,57	1,57	1,83	6,71
Modelo		1,07	1,00	1,43	6,00
Heurística	Los Almendros	5,14	5,00	0	6,71
Modelo		3,14	1,29	0	5,29
Heurística	Las Palmas	1,21	2,04	3,21	5,26
Modelo		1,21	1,41	2,93	2,36
Heurística	Los Acacios	9,57	6,36	4,57	9,93
Modelo		5,93	4,14	2,93	6,10
Heurística	Los Lingues	8,36	1,14	0	1,39
Modelo		4,79	0,50	0	1,31
Heurística	Los Cipreses	8,29	6,36	2,79	1,14
Modelo		3,50	1,79	2,43	0,99

(Fuente: Elaboración propia).

La Tabla 4.2 presenta la desviación promedio absoluta de los requerimientos operacionales. En términos de comparación entre las dos herramientas, los indicadores proporcionados para los diferentes terminales y rotaciones del día ofrecen una visión valiosa sobre la precisión de la asignación de conductores en las operaciones de transporte. En general,

se observa una tendencia en los resultados que destaca la eficacia del modelo de optimización en comparación con la heurística.

En múltiples terminales, como "Los Rosales," "Los Peumos," y "Los Aromos," el modelo de optimización logra un indicador significativamente más bajo tanto en la mañana como en la tarde. Esto sugiere una asignación más precisa de conductores en estos momentos del día cuando se utiliza el modelo. Similarmente, en términos de días libres, el modelo de optimización tiende a mostrar una asignación más precisa en varios terminales.

Este tipo de indicador tienen un impacto directo en la eficiencia operativa, ya que valores más bajos indican una asignación más precisa y eficiente, lo que a su vez puede contribuir al cumplimiento de los requerimientos teóricos y a una operación más efectiva.

4.2.2 Cambios manuales de días libres y rotaciones

Adicional a los indicadores mencionados anteriormente, es relevante destacar la incidencia de cambios manuales en la asignación de días libres. A partir de los informes generados en el área de planificación de METBUS, se ha recopilado información que ilustra la cantidad de modificaciones que se realizaban anteriormente con la heurística en comparación con las que se llevan a cabo actualmente con el modelo propuesto. Estos datos proporcionan un respaldo a la mejora sustancial que representa el desarrollo de este trabajo en el proceso de planificación.

La Tabla 4.3 presenta un registro de los movimientos manuales realizados durante un período de 5 quincenas para la planificación de turnos en 8 terminales. Los datos en **negrita** y *cursiva* resaltan los resultados obtenidos a partir de la implementación del modelo. En la tercera

quincena, se muestra el impacto inicial de la aplicación del modelo en 3 terminales. Luego, en la cuarta quincena, se incorporó un terminal adicional como parte de la puesta en marcha, y finalmente, en la quinta quincena, se presentan los resultados completos de los 8 terminales que fueron evaluados.

Tabla 4.3: Cantidad de movimientos manuales de días libres para la programación quincenal de turnos de los conductores.

Terminal	Total Conductores	1Q	2Q	3Q	4Q	5Q
Los Rosales	184	112	130	130	161	42
Los Peumos	95	97	91	101	41	47
Los Aromos	137	213	174	205	161	63
Los Almendros	152	188	174	61	46	33
Las Palmas	291	141	168	168	136	64
Los Acacios	203	205	186	184	178	92
Los Lingues	195	263	203	76	60	74
Los Cipreses	192	176	265	45	44	36

(Fuente: Elaboración propia).

Dado los resultados, es posible evidenciar una notable disminución de movimientos manuales en todos los terminales, reduciendo en más del 50% en comparación con los procedimientos anteriores. Este resultado evidencia un avance significativo en la eficiencia de la planificación. No obstante, es fundamental tener en cuenta que las condiciones varían en cada quincena y terminal, lo que influye directamente en la cantidad de cambios manuales necesarios. Estas variaciones están condicionadas no solo por la estrategia inicial empleada (heurística o modelo de optimización), sino también por factores como días festivos, restricciones individuales de los conductores y cambios imprevistos en las condiciones iniciales de algunos conductores

durante la ejecución del proceso de planificación. Por lo tanto, la disminución de movimientos manuales es un indicador valioso de mejora, pero se contextualiza dentro de una serie de variables dinámicas que influyen en la toma de decisiones y ajustes necesarios en la asignación de turnos.

4.2.3 Aspectos Generales

Dado los resultados obtenidos en la implementación del modelo y el análisis de estos, es posible afirmar que la solución entregada notoriamente brinda una asignación equilibrada de requerimientos operacionales y días libres, cumpliendo en lo posible con los requerimientos operacionales de los terminales para los tres tipos de días considerados en este estudio.

En específico a resultados que entrega el modelo de optimización, se evidencian 2 casos particulares. Primero, hay terminales que tienen un déficit de conductores con respecto a la operación, en este caso el modelo se ajusta a la menor cantidad de días libres para los colaboradores y cubrir la operación en los tipos de turno según la prioridad establecida. Segundo, en caso contrario, hay terminales con superávit de conductores para la operación, donde se entrega una cobertura adicional a los turnos que presentan mayor variabilidad en la ejecución del servicio, además de dar la posibilidad de brindar una mayor cantidad de días libres sujeto a la parametrización ingresada.

En cuanto a los tiempos computacionales del modelo propuesto y la heurística, se revela que los tiempos de resolución son altamente eficientes y despreciables para la planificación de programaciones quincenales. Aunque la heurística exhibe una ventaja en términos de velocidad, con un rendimiento aún más rápido, es importante destacar que dado el contexto de trabajo con un período relativamente corto de planificación, la diferencia en tiempo entre ambos métodos se

vuelve insignificante. Ambos enfoques pueden resolver satisfactoriamente las asignaciones en cuestión de minutos, donde el tiempo máximo de resolución no supera los 3 minutos. Por lo tanto, la distinción en tiempos computacionales carece de relevancia práctica.

Respecto al desarrollo de aspectos de los patrones de programación, se tiene que las condiciones agregadas en el algoritmo para el procesamiento previo de los parámetros de entrada permitieron que la asignación no entregara una planificación no deseada, además de agregar un equilibrio de distribución de días libres entre los colaboradores.

Con la implementación exitosa del modelo propuesto, la organización ha optado por utilizar este enfoque avanzado de programación en todos sus terminales, en lugar de la heurística previamente empleada, marcando un hito significativo en la mejora de sus operaciones de planificación. Los resultados obtenidos en este estudio han demostrado de manera concluyente que el modelo supera a la heurística en términos de calidad y eficiencia en la asignación de días libres y rotaciones de turnos a los conductores. La precisión y flexibilidad del modelo permiten abordar tanto los requerimientos operacionales de la organización como las preferencias de los colaboradores de manera óptima, al menor costo de programación posible.

La investigación en este campo está en constante evolución, con enfoques innovadores y soluciones que buscan abordar estos desafíos de manera efectiva. Se espera que la tecnología y la optimización de horarios sigan desempeñando un papel crucial en la gestión de personal y conductores en el futuro, ofreciendo oportunidades para una mayor eficiencia y rentabilidad en diversas industrias. Por último, debido a la simplicidad y estructura de división del problema abordado, el modelo resulta ser atractivo para su aplicación en distintas organizaciones para la planificación quincenal de días libres y rotaciones de turnos.

5 Conclusiones

En este trabajo de memoria se presenta un modelo de programación entera lineal, para realizar la planificación de mano de obra en una organización de transporte público metropolitano en Chile. El modelo de optimización propuesto proporciona la asignación de patrones de programación para los conductores de tal manera de cumplir con las reglas legales establecidas por la dirección del trabajo, reglas internas de la organización, los requerimientos operacionales del terminal y en la medida de lo posible abordar las preferencias de los colaboradores, al menor costo de programación posible.

En el trabajo se incluye el desarrollo y/o modificación de ciertos aspectos en el procesamiento de los parámetros de entrada del modelo, de tal manera de agregar más características para filtrar y/o agregar costos a los patrones posibles de programación para los conductores de la organización.

Google OR-Tools, junto con su solucionador CP-SAT, proporcionó capacidades de optimización robustas y eficaces. El uso de C# y Visual Studio facilitó el desarrollo y la integración del modelo de programación en los proyectos de sistemas de gestión integral de METBUS, permitiendo obtener resultados óptimos en un tiempo razonable.

A través de la puesta en marcha del modelo en la programación oficial de turnos se demuestra la utilidad y mejora que presenta con respecto a la heurística actual utilizada, presentando una solución de mejor calidad, considerando un equilibrio uniforme en cuanto a la asignación de rotación de turnos y de días libres para los conductores, logrando así cumplir los objetivos previamente establecidos en este estudio.

Como trabajo futuro, la organización presenta como nuevo objetivo extender la planificación a una escala mensual, lo que implicaría abordar el problema mediante otras alternativas existentes en la literatura dado el crecimiento del problema, donde destacan técnicas clásicas de descomposición como lo es el método de generación de columnas, que en el caso particular podría abordar la planificación a una mayor escala, generando los patrones de programación para un periodo mayor y reduciendo los tiempos de resolución utilizando solvers comerciales más poderosos. Además, la transición a una planificación mensual ofrecería numerosas ventajas tanto para la organización como para los colaboradores, al brindar una mayor previsibilidad y estabilidad en las asignaciones y horarios de trabajo.

Para finalizar, es importante destacar la importancia de este trabajo de memoria en términos del aporte que puede significar este modelo y la herramienta de resolución utilizada para ser aplicada en la programación quincenal de personal de diversas organizaciones con sistemas de turnos, puesto que presenta una solución óptima en un tiempo razonable para un tipo de problema que en la literatura es difícil de resolver dado la gran cantidad de personal y las restricciones de reglas de trabajo presente, lo cual es simplificado mediante la estructura de patrones de programación y el proceso de filtro de estos para cada colaborador.

6 Bibliografía

Albornoz, V., Isla, D., Iriarte, G. (2023). Modelo de Programación de Días Libres y Rotaciones de Turnos de los Conductores de una Organización de Transporte Público Metropolitano en Chile. Revista De La Escuela De Perfeccionamiento En Investigación Operativa. (Aceptado para su publicación).

Brucker, P., Qu, R., & Burke, E. K. (2011). Personnel scheduling: models and complexity. European Journal of Operational Research, 210(3), 467-473. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.11.017>

Ernst A., Jiang H., Krishnamoorthy M., Sierd D. (2004). Staff Scheduling and Rostering: A review of applications, methods and models. European Journal of Operational Research, vol. 153, pp. 3-27.

Directorio de Transporte Público Metropolitano, Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones. (2023). Programa de Operación Vigente 2023. Recuperado el 10 de julio de 2023, de <https://www.dtpm.cl/index.php/noticias/pov2>

METBUS. (2022). Memoria 2022. Recuperado el 22 de junio de 2023, de https://www.cmfchile.cl/sitio/aplic/serdoc/ver_sgd.php?s567=8f555a238b8fff942305bd4a8831d7bcVFdwQmVVMtZRVEJOUkVVeFRVUlpIazUzUFQwPQ==&secuencia=-1&t=1690769359

Osogami, T. & Imai, H. (2000). Classification of various neighborhood operations for the nurse scheduling problem. *Lecture Notes in Computer Science*, 1969, 72–83.

Pinedo M. (2009): “Workforce Scheduling”. Publicado en Pinedo M. (2009), *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services*, Springer, New York, NY, United States, pp. 317-343.

Wickert, T. I., Neto, A. F. K., Boniatti, M. M., & Buriol, L. S. (2020). An integer programming approach for the physician rostering problem. *Annals of Operations Research*, 302(2), 363-390. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03552-5>