



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**MODELO DE SCHEDULING Y ROSTERING PARA PERSONAL DE CARGA
DE BODEGA EN UNA EMPRESA DEL GRUPO LATAM AIRLINES S.A.**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN GESTIÓN DE OPERACIONES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

ISRAEL HERNÁN PARADA FIGUEROA

PROFESOR GUÍA:
CRISTIÁN CORTÉS CARRILLO

PROFESOR CO-GUÍA:
PABLO REY

COMISIÓN:
FERNANDO ORDÓÑEZ PIZARRO

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:
Latam Airlines Group S.A.

SANTIAGO DE CHILE

2023

MODELO DE SCHEDULING Y ROSTERING PARA PERSONAL DE CARGA DE BODEGA EN UNA EMPRESA DEL GRUPO LATAM AIRLINES S.A.

FAST AIR es una empresa perteneciente al grupo LATAM dedicada al almacenaje de la importación de carga, y tiene instalaciones en Santiago, Antofagasta y Punta Arenas, pero el problema se acotará solamente a Santiago. Actualmente esta operación cuenta con 126 personas aproximadamente repartidas en 10 grupos de trabajo. Dentro de sus servicios está el almacenaje de congelados, animales vivos, féretros, carga peligrosa, explosivos, courier y pharma, entre otros, junto con su internación al país. Esta bodega tiene lugar en el Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez de Santiago.

En este contexto, a los funcionarios de FAST se les debe armar mensualmente los turnos de entrada y salida respetando ciertas restricciones operacionales, tales como días libres, horas de descanso, horas semanales mínimas y máximas de trabajo por persona, itinerario de vuelos, entre otras. Este proceso actualmente se hace de forma manual “haciendo calzar” los turnos, y para eso hay una persona del área de Capacity Planning que demora entre 1 y 2 semanas en construir los turnos considerando los históricos y las peticiones de los jefes de cada grupo de trabajo. Además de una mala eficiencia al construir los turnos, estos al ser manuales generalmente no son óptimos, causando tiempos muertos en la operación, baja dotación o sobre dotación en ciertos días, costos extras innecesarios y muchas veces ilegalidades como descansos u horas extra.

Se propone automatizar y optimizar la asignación de roles de turnos a los más de 120 funcionarios de FAST AIR. Para ello se espera modelar el problema bajo ciertos parámetros, restricciones y un objetivo y posteriormente implementarlo en GUROBI OPTIMIZER®. Para esto se procederá en 2 etapas: Planning: Determinación de la demanda operativa óptima según itinerario de llegada de vuelos y requisitos operacionales. Para esto se utilizará un software corporativo de LATAM llamado Inform®. Estos datos necesarios se tomarán en terreno en la bodega de FAST en Santiago y se levantará la información necesaria junto con documentación. Rostering: Corresponde a la asignación de los funcionarios a los turnos mensuales dadas ciertas restricciones operacionales, legales y de bienestar laboral. El output del planning va a ser el input utilizado en rostering. Se utilizará Gurobi® para implementar el modelo

A Dios, que ha sido mi sustento en cada paso de mi vida.

*“Elevó mis ojos a los montes, ¿de dónde vendrá mi socorro?
Mi socorro viene del Señor, creador del cielo y de la tierra”*

Salmo 121:1-2

Agradecimientos

Muchas gracias papá por instruirme en el Camino y en mi vida, por guiarme y enseñarme lo que es bueno, por darme todo lo que tenía y más, por el amor a diario y por valorarme. Muchas gracias mamá por todo el amor y esfuerzo para sacarnos adelante, por las palabras de aliento, por irme a buscar en la noche a donde estudiaba, por instarme a salir adelante y creer en mi. Gracias a ustedes y al Señor soy lo que soy, los amo.

Muchas gracias Geraldine, mi esposa, por todo el amor y apoyo en mis proyectos y locuras, aún cuando no tenían futuro. Gracias por esos retos para terminar luego la tesis y también por alentarme y darme ánimo. Gracias por ayudarme con tus talentos artísticos y de redacción.

Muchas gracias hermanitas, Noemí y Estefanía, por su amor que estuvo y está siempre presente, gracias por la ayuda cuando me veía colapsado, gracias por hacerme reír y alegrar cuando estaba estresado y por aguantar mis estados de ánimo.

Muchas gracias Jesús, mi Señor, mi amigo, mi todo, por guiar mis pasos y estar conmigo en cada etapa de mi vida. Gracias por bendecirme más de lo que merezco en todo ámbito, y por tu gracia incondicional e infinita. Gracias por ayudarme a terminar mis estudios, sin ti no sé dónde estaría.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Estructura	2
2. Antecedentes	3
2.1. Aeropuertos en donde opera la empresa	3
2.2. Procesos de transporte de carga	4
2.3. Metodología de construcción manual de los roles de turno	9
2.3.1. Método actual de cálculo de demanda	10
2.3.2. Método actual de asignación de turnos	10
2.4. Antecedentes de estudio	11
3. Problema y enfoque de solución	15
3.1. Descripción del problema	15
3.2. Condiciones de los turnos	16
3.3. Solución propuesta	18
3.3.1. Determinación de demanda	18
3.3.2. Modelo propuesto para asignación óptima de turnos	22
3.3.2.1. Conjuntos	22
3.3.2.2. Parámetros	23
3.3.2.3. Variables	24
3.3.2.4. Restricciones	25
3.3.2.4.1 Clasificación de las restricciones	26
3.3.2.5. Función Objetivo	26
3.3.2.6. Cálculo de coeficientes de la función objetivo	27
3.3.3. Implementación computacional	28
4. Resultados y discusiones	31
4.1. Descripción general	31
4.2. Caso 1: Turnos aeropuerto de Punta Arenas	34

4.3. Caso 2: Turnos aeropuerto de Santiago	38
5. Conclusiones y recomendaciones	44
Bibliografía	46

Índice de Tablas

3.1.	Tabla de Coeficientes	28
4.1.	Comparación general de resultados entre asignación manual y modelo computacional, escenario Punta Arenas	34
4.2.	Análisis de diferencia de dotación real y óptima por cargo, escenario de Punta Arenas	35
4.3.	Comparación detallada de resultados por cargo, Punta Arenas	37
4.4.	Comparación general de resultados entre asignación manual y modelo computacional, escenario Santiago	38
4.5.	Análisis de diferencia de dotación real y óptima por cargo, escenario de Santiago	39
4.6.	Comparación detallada de resultados por cargo, Santiago (1)	41
4.7.	Comparación detallada de resultados por cargo, Santiago (2)	42
4.8.	Comparación detallada de resultados por cargo, Santiago (3)	43

Índice de Ilustraciones

2.1.	Aeropuerto de Santiago	3
2.2.	Aeropuertos de regiones	3
2.3.	Flujo general de carga	5
2.4.	Proceso de internación documental	6
2.5.	Proceso de transporte a bodega	7
2.6.	Proceso de recepción de carga	8
2.7.	Proceso de internación de carga	8
2.8.	Proceso de entrega de carga al cliente	9
2.9.	Características clave de la literatura revisada.	14
3.1.	Tipos de turnos	16
3.2.	Regla de compatibilidad de turnos	17
3.3.	Ejemplo de secuencia de turnos de 9 horas	18
3.4.	Ejemplo de secuencia de turnos de 7,5 horas	18
3.5.	Etapas de solución	18
3.6.	Programa Inform, service classes	20
3.7.	Programa Inform, service groups	20
3.8.	Programa Inform, modulo principal	20
3.9.	Programa Inform, gráfica de demanda	21
3.10.	Programa Inform, gráfica de cobertura	21
3.11.	Ejemplo de resultado de programación de demanda mensual	22
3.12.	Clasificación de Restricciones	27
3.13.	Ejemplo de asignación óptima y automática de roles de turno para despachadores de la empresa en un mes de febrero	29
3.14.	Indicadores de la asignación de turnos por funcionario para el cargo de despachador	30
4.1.	Diagrama comparativo entre dos escenarios de prueba	32
4.2.	Número de funcionarios por escenario según su cargo, y la cantidad de tipos de turno a asignar	32

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

El rubro de transporte aéreo se desarrolla en entornos altamente complejos que requieren la coordinación eficiente de numerosos procesos a cargo de distintas áreas para asegurar la seguridad y el bienestar de los funcionarios, y lograr un buen servicio al cliente mediante la cobertura de demanda. Estos procesos incluyen la gestión de llegada de vuelos, el transporte terrestre de carga de distintos tipos y la logística de almacenaje. Existe constantemente un alto grado de incertidumbre acerca de la planificación de las tareas a realizar debido a las constantes cancelaciones y cambios de horario en los vuelos, junto con repentinas posibles inasistencias de los funcionarios, lo cual complejiza el proceso general y lo vuelve un problema mixto con una parte determinista y una parte estocástica.

La creación de roles de turnos en una empresa es esencial para asegurar que todos los procesos y subprocesos con cierta demanda se realicen de manera eficiente y sin interrupciones para una completa cobertura. Este proceso general involucra la asignación de tareas específicas a diferentes funcionarios del personal y la definición de sus horarios, considerando ciertas condiciones de naturaleza legal, operacional y de bienestar.

Estudios realizados por Costa et al. (2004) indican que las personas que trabajan en horarios fijos y regulares son una minoría en la población de trabajadores, mientras que la mayoría de la población trabaja por turnos. Así, la jornada de 9 horas fijas, de lunes a viernes solo aplica al 27 % de los dependientes a un empleador, y al 8 % de los independientes a un empleador.

En este contexto, nace la necesidad de analizar los procesos de carga en empresas de Latam Airlines, una de las principales compañías de transporte aéreo de carga en Chile y Sudamérica. El objetivo de este trabajo será estudiar la operación, para luego proponer un modelo de optimización basado en programación lineal mixta para la asignación de turnos de forma automatizada, con el fin de mejorar las asignaciones bajo ciertas restricciones, y disminuir el tiempo de creación de los roles de turnos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un modelo de programación lineal, con el fin de optimizar la asignación de roles de turno para los funcionarios de bodega de la empresa FAST AIR, mediante su automatización.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Generar la reportería de datos necesarios para operar el modelo de rostering, mediante la plataforma INFORM ®.
- Determinar los parámetros, variables, restricciones y función objetivo del problema, con el fin de modelar el roster con programación lineal.
- Consolidar el modelo matemático a lenguaje Python ®, para su automatización y optimización utilizando las librerías de Gurobi Optimizer ®

1.3. Estructura

Esta sección presenta de forma general cómo se organiza el documento, ayudando al lector a entender de mejor manera la información contenida en este informe.

El segundo capítulo abordará los antecedentes de la empresa, donde se describirá el tipo de actividad, los aeropuertos de Chile donde opera la empresa, y los procesos relacionados al transporte de carga. Se explicará el procedimiento actual que lleva a cabo la empresa para la construcción de los roles de turno mensual, y finalmente se describirá la revisión bibliográfica realizada, donde se detallarán trabajos relacionados al presentado en este informe.

El tercer capítulo se enfocará en la descripción del problema y el enfoque de solución propuesto en dos etapas, la planificación de demanda y la asignación de los turnos, junto con la implementación computacional.

El cuarto capítulo detalla los resultados obtenidos de la implementación del modelo propuesto en dos escenarios, uno para el Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez de Santiago, y uno para el Aeropuerto de Punta Arenas, tanto a nivel general como a nivel de detalle por tipo de cargo.

Finalmente, el capítulo cinco sintetiza el trabajo realizado y describe las conclusiones finales, dando también recomendaciones a la empresa, y a trabajos futuros de investigación.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Aeropuertos en donde opera la empresa

Latam Airlines S.A. mensualmente debe construir los roles de turnos a sus funcionarios para operar nacionalmente en un total de 12 aeropuertos, los cuales son:

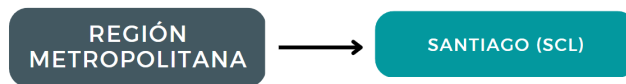


Figura 2.1: Aeropuerto de Santiago



Figura 2.2: Aeropuertos de regiones

En regiones actualmente se cuenta con 72 trabajadores en total entre las distintas áreas. En

Santiago la operación se segmenta en 3 negocios: nacional, importaciones y exportaciones. Estos dos últimos se dedican netamente al transporte de carga internacional, y el primero al transporte nacional.

Importaciones, que está a cargo de la empresa FAST AIR perteneciente al Grupo Latam Airlines, es el negocio que cuenta con mayor cantidad de dotación de funcionarios, con un total de 135. Luego le sigue el negocio nacional con 95 funcionarios y finalmente exportaciones con 91.

Cada uno de estos negocios tiene cargos o funciones en los que se desempeñan los trabajadores, los cuales son:

- Nacional
 - Supervisores
 - Recepción
 - Despacho documental
 - Import
 - Operadores
- Importaciones
 - Supervisores
 - Internadores Físicos
 - Operarios de internación
 - Operarios de bodega
 - Chequeadores
 - Servicio al cliente
 - Comercial
 - Servicio a terceros
 - Internadores documentales
 - Contraloría
- Exportaciones
 - Supervisores
 - Despachadores
 - Agentes de calidad
 - ULD Handling
 - Recepción carga
 - Correo
 - Contraloría aduanera
 - ECC
 - HCC
 - CCOP
 - Asignadores

2.2. Procesos de transporte de carga

El proceso de transporte de carga que sigue la empresa tanto para exportaciones como para importaciones es complejo y consta de muchos grupos, áreas y tareas. A continuación se muestra el diagrama de flujo del proceso general para la importación de carga por parte de la empresa FAST AIR.

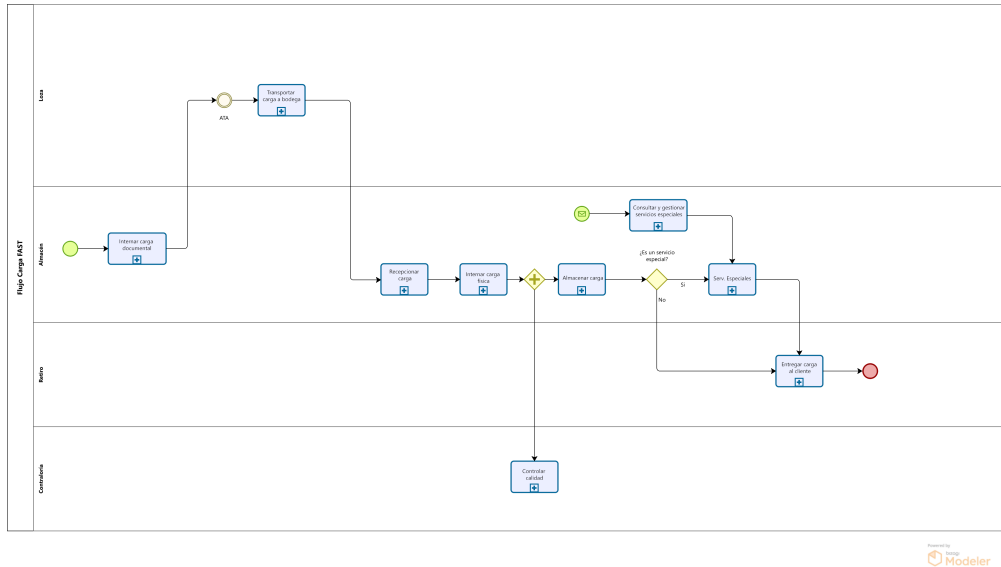
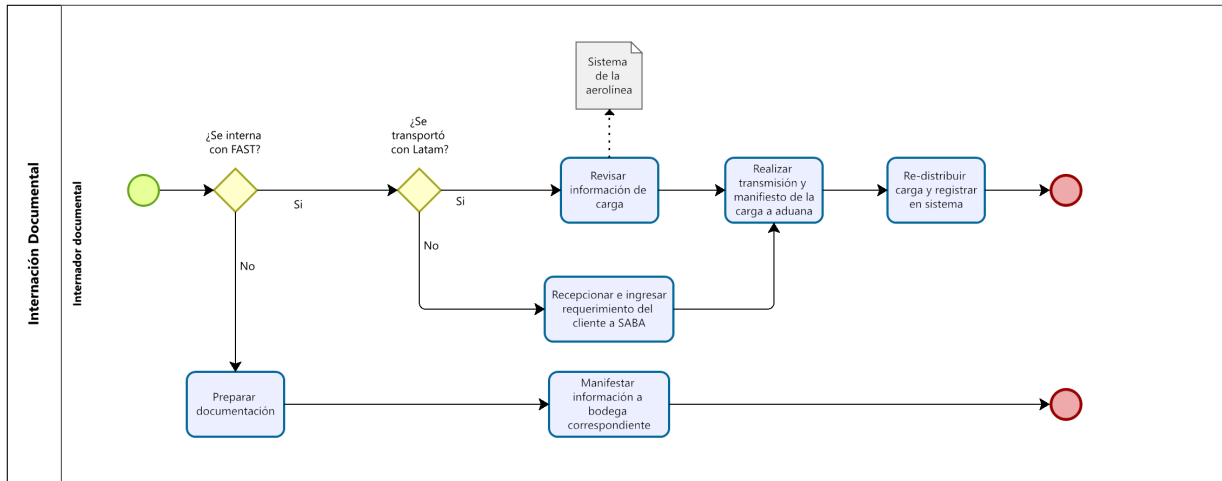


Figura 2.3: Flujo general de carga

Tal como se puede apreciar en la figura 3.1, hay cuatro áreas responsables del proceso, los cuales son Loza, Almacén, Retiro y Contraloría. Cada una de ellas consta de una dotación definida y constante a corto y mediano plazo.

El proceso comienza con las tareas que cumplen los funcionarios de Almacén, específicamente los internadores documentales. Su trabajo consiste en clasificar el tipo de carga que llega según el siguiente criterio: ¿La carga se interna en los almacenes de Fast Air? Si la respuesta es negativa, entonces solamente se debe preparar la documentación correspondiente y enviarlo a la empresa que almacenará esa carga. Por otro lado, en caso que la carga se almacene en la empresa, se ingresa el requerimiento de la futura llegada de esta al sistema interno SABA y se envía esta información a la Aduana. En este registro se debe redistribuir la carga de tal forma que sean notorias las prioridades de internación por cumplir alguno de los siguientes requisitos: ser medicamento, carga fría, carga viva, explosivos, carga peligrosa o fétetros. Dependiendo si se transportó con la empresa o no, se obtiene mayor o menor información respectivamente sobre esta, pues se puede consultar su ingreso y características en sistemas de información.

En la siguiente figura se puede apreciar el proceso de internación documental descrito anteriormente.

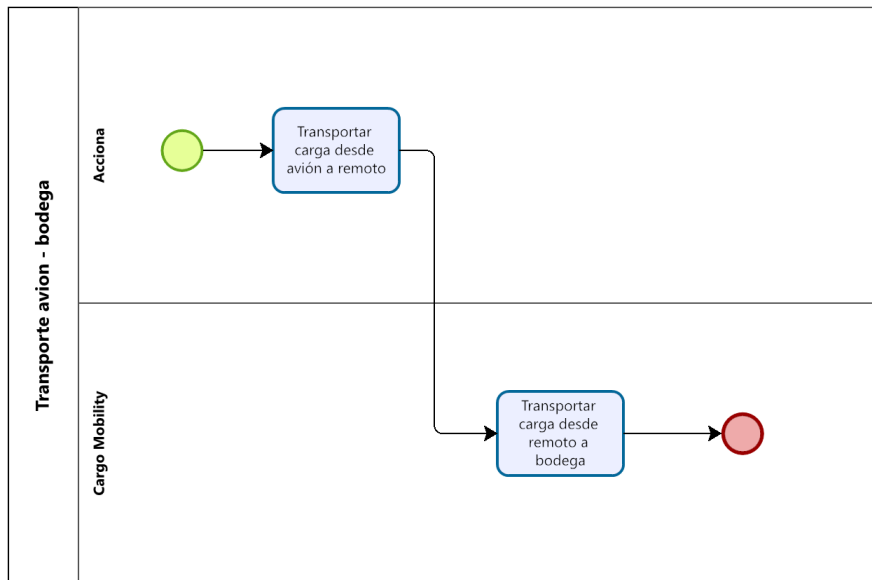


Powered by
bizagi
Modeler

Figura 2.4: Proceso de internación documental

Una vez ingresada la carga por llegar al sistema, se espera una señal que indica la llegada de esta a la pista de aterrizaje del respectivo aeropuerto que se denomina ATA (Actual Time of Arrival). En ese momento el equipo de loza se activa para ir a recibir esta carga y transportarla hasta la bodega de la empresa. Este proceso se divide en dos subprocesos: transporte desde el avión hasta la zona del remoto, y transporte desde la zona del remoto hasta la bodega.

El remoto es un lugar ubicado en la loza del aeropuerto donde se realiza un cambio del equipo que transporta la carga y el vehículo. Tal como se puede apreciar en la figura 3.3, este primer subproceso está a cargo de la empresa Acciona, que es contratada para esta tarea. Ellos reciben la carga desde el avión y la transportan al remoto. Al mismo tiempo se dirige una grúa de la empresa Cargo Mobility a ese lugar para luego llevar la carga hasta la entrada de la bodega. Este proceso se realiza bajo supervisión y registro de video para asegurar la integridad del mismo.



Powered by
bizagi
Modeler

Figura 2.5: Proceso de transporte a bodega

Luego, una vez llegada la carga a la bodega, los operarios de internación la suben al deck, que es una plataforma que desliza los paquetes y bultos hacia la zona interior. Cada día uno de los operarios se nombra Coordinador de Deck, y su labor es principalmente coordinar la clasificación de las cargas por tipo y cliente en las distintas zonas de la plataforma dada la información entregada por internación documental. Con esto en cuenta, se debe decidir si se produce desconsolidación teniendo en consideración las guías aéreas hijas (HAWB), o si se ingresa la carga tal como llegó.

Existe un tipo de carga que se llama "De Tránsito", la cual debe pasar por la bodega de Fast Air para su ingreso, pero su destino es otro aeropuerto. Si este es el caso, entonces la carga desconsolidada se envía a Aerosan Export para ser subida a un avión de exportación. Lo descrito anteriormente se puede ver en la figura 3.4 a continuación.

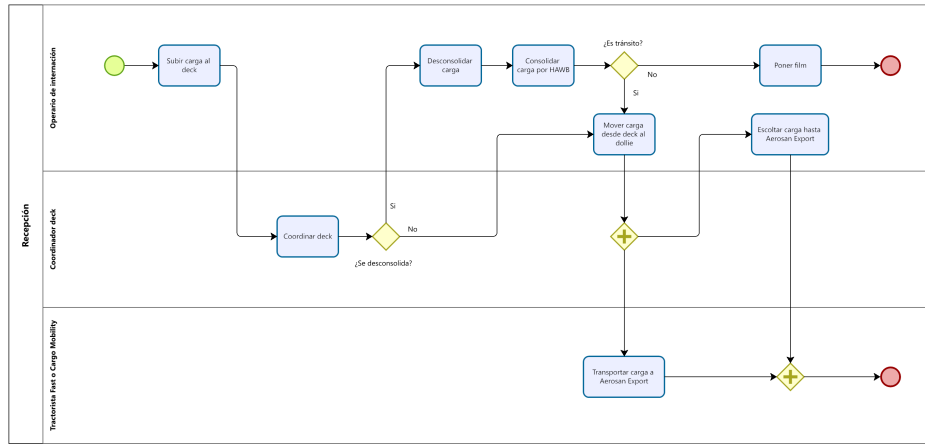


Figura 2.6: Proceso de recepción de carga

Cabe destacar que el lugar donde ocurre este proceso se divide en dos partes: zona de internación y zona de bodega.

Posterior a su recepción, la carga que se interna debe ser llevada a la zona de pesaje por un maquinista. Luego, un internador físico en ese lugar realiza un chequeo del estado de la carga y compara sus características con las ingresadas por los internadores documentales anteriormente. En caso de ser carga de "Paquetería", se ubica en unas jaulas móviles para así llevarlo a su respectiva zona de entrega a clientes. En caso contrario, el maquinista transporta la carga desde la zona de pesaje al límite entre internación y bodega.

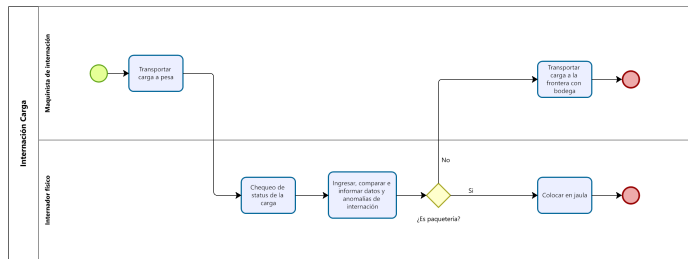


Figura 2.7: Proceso de internación de carga

Una vez realizado lo anterior, los operarios de bodega deben almacenar la carga en los racks segmentando por tipo de carga, los cuales pueden ser explosivos, féretros, carga viva, carga fría, mercancías peligrosas, o sobredimensionados. Si el cliente contrató un servicio especial, entonces antes de entregarle su pedido se debe llevar a cabo su solicitud. Un ejemplo de esto es enviar fotografías de la carga para observar su estado.

Finalmente, y como se puede ver en la siguiente figura, el cliente llega a la bodega de Fast

Air a retirar su carga. En esta etapa hay cinco grupos que trabajan en conjunto para una entrega exitosa: facturación, aduana, paquetería, chequeadores, y maquinistas de bodega.

No se puede entregar ningún bulto al cliente sin antes haber realizado la facturación, donde se revisa el detalle de la compra en las plataformas Croamis, Saba y Go Socket, y se detallan todos los cobros, los cuales pueden ser legales, de almacenamiento, de servicios especiales, o de transporte aéreo. De lo anterior Aduana solamente cobra los derechos de carga al cliente, y lo demás se factura por parte de Latam Airlines.

Luego, los operarios de bodega en la zona de paquetería reciben los documentos de forma física y revisan cuál es la ubicación de la carga. Si es de la categoría Paquetes de Menor Tamaño, se chequea y se entrega al cliente. En caso contrario, el chequeador debe enviar un maquinista de bodega a buscar la carga a los racks y traerla donde el cliente. En ese momento se revisa su estado, se chequea que lo impreso en el paquete coincida con la documentación y finalmente el maquinista sube la carga al vehículo del cliente.

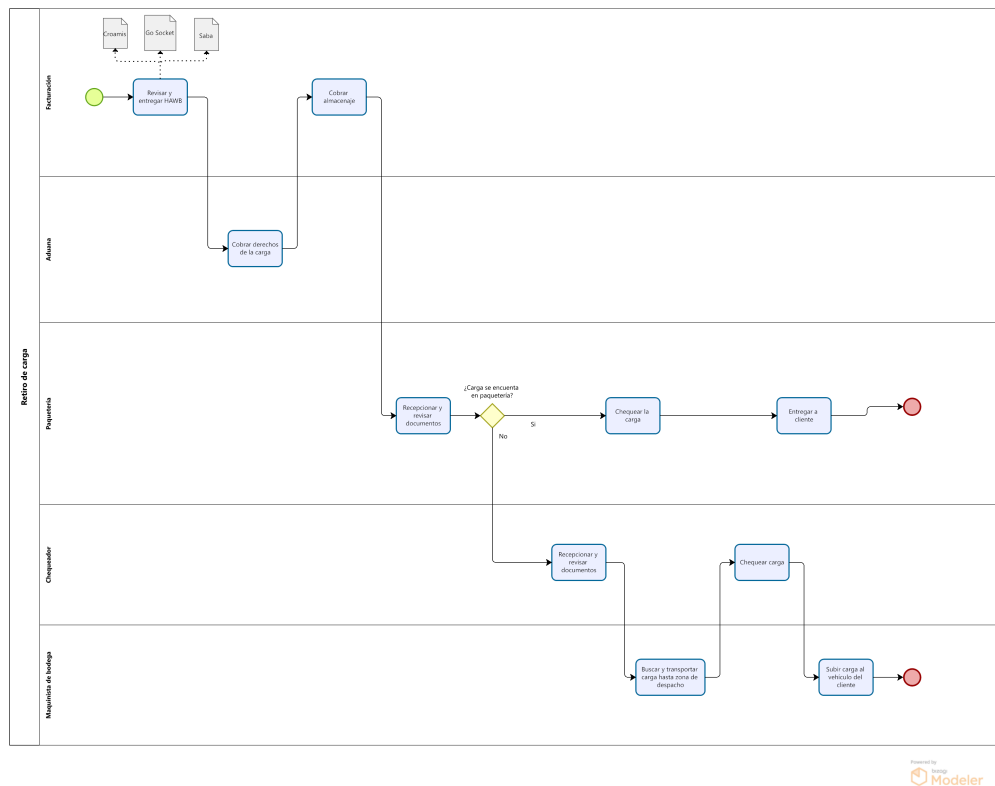


Figura 2.8: Proceso de entrega de carga al cliente

2.3. Metodología de construcción manual de los roles de turno

2.3.1. Método actual de cálculo de demanda

En el área de capacity planning de Latam Cargo hay dos personas encargadas de construir los roles de turnos para funcionarios, uno de ellos trabaja con la dotación de Santiago y el otro trabaja en la operación de las otras regiones de Chile. Se reúnen ciertos días del mes con los supervisores de las áreas y ven la necesidad mensual de su operación en cuanto a la cantidad de personas que necesita en cada turno dependiendo de la cantidad de kilos a transportar, así como la cantidad de funcionarios con licencia de grúa mínimos para turnos de mañana, tarde y noche.

Una vez recopilados los pedidos y los datos de las áreas, el encargado revisa los horarios de atención de los clientes y así decidir qué tipos de turnos son convenientes para la operación. Por ejemplo, si en Punta Arenas los vuelos llegarán entre las 8:00 hrs. y las 18:00 hrs., los turnos elegidos para ser utilizados son dos: de 7:00 hrs. a 14:30 hrs, y de 10:30 hrs. a 18:00 hrs.

Sumado a lo anterior, también se debe considerar que los funcionarios pueden solicitar ciertos turnos especiales para el siguiente mes, tales como días libres, vacaciones, licencias médicas o tele-trabajo, los cuales no se deben asignar de forma estricta, pero se tienen por prioridad siempre y cuando la operación y las legalidades lo permitan.

Respecto a la eficiencia de esta metodología de trabajo, los funcionarios indicaron que el tiempo estimado que lleva realizar esta tarea es aproximadamente 40 a 50 horas mensuales para todas las áreas de Santiago y otras regiones en total, lo que equivale a una o dos semanas aproximadamente de trabajo considerando los cambios inesperados que ocurren en ciertos aeropuertos. Al realizar el levantamiento de esta información, los encargados aseguran que según su percepción lo más difícil es una buena asignación de turnos libres y poder cumplir con la cobertura mínima necesaria para la operación respetando los acuerdos sindicales y legalidades.

2.3.2. Método actual de asignación de turnos

Una vez conocida la demanda por aeropuerto y área, y definidos los tipos de turnos a utilizar, se comienza a construir la matriz de turnos de forma manual utilizando una plantilla de Excel construido por ellos mismos, y que contiene formulas simples de celdas para descubrir errores legales, ya sea que a un trabajador se le de más de 45 horas semanales de trabajo o que no se le asigne un fin de semana libre al mes a cada funcionario.

Actualmente en regiones fuera de Santiago se les asigna sus turnos de trabajo a 72 funcionarios, lo que significa que para un mes de 31 días se deben asignar 2232 turnos manualmente considerando muchas restricciones. Además, en el caso en que la persona encargada llegase a realizar una asignación cumpliendo con legalidades y requerimientos, no es necesariamente

la matriz óptima, pues existen combinaciones de turnos con menos cantidad de libres, menos déficit de dotación en cierto día, y menos costos variables a corto plazo.

Respecto a la eficiencia de esta metodología de trabajo, los funcionarios a cargo de esta tarea indicaron que existe una gran ineficiencia en esta metodología pues al ir probando ciertas combinaciones se evalúa si es posible cubrir la operación, sin mencionar que muchas veces al último o penúltimo funcionario no se le pueden asignar bien los turnos legalmente, lo cual implica una reconstrucción de todo el roster desde el comienzo. Por otro lado, el tiempo que demora construir la matriz de roles para Santiago y otras regiones en total es de 30 a 40 horas mensuales, lo que equivale a 1 semana de trabajo aproximadamente.

Finalmente, la volatilidad de la operación provoca que existan posibles riesgos. Ejemplo de lo anterior es cuando, una vez construidos los turnos, se modifica de imprevisto el itinerario de vuelos, o se informa que se deberán transportar toneladas de salmón y hay que tener operarios para ese trabajo, o se realizan ciertos cambios en los horarios de atención de algún área, lo que lleva a hacer grandes modificaciones manuales o incluso una reconstrucción de todos los roles aumentando así el tiempo dedicado a esta tarea.

2.4. Antecedentes de estudio

Desde fines del siglo XX se ha intensificado la investigación acerca de la planificación de personal y asignación de roles de turno en distintos rubros, tales como en transporte, farmacia y salud. Respecto al transporte aéreo, un estudio realizado por Dowling et. al (1997) se dedicó a la programación de personal en un aeropuerto internacional de gran tamaño. El objetivo principal fue crear un algoritmo que optimice y asigne los horarios de trabajo del personal bajo ciertas restricciones y abarcando una gran variedad de funciones. Para ello se utilizó un modelo matemático para asignación de turnos con restricciones, el cual fue resuelto mediante un algoritmo heurístico que constó de 2 etapas: elaboración de turnos mensuales y asignación de tareas. El problema a resolver no estuvo exento de dificultades, pues la dotación se separó en personal de tierra y personal de vuelo, donde ambos son distintos en complejidad y tipo de restricciones de asignación. Los resultados de este trabajo mostraron una reducción en los costos de la planificación, también y equidad en la asignación de turnos. Este trabajo comparte similitudes con el presente estudio en cuanto al objetivo de asignar turnos de manera más eficiente, y también en la metodología utilizada, que corresponde a un modelo matemático resuelto en dos etapas.

Por otro lado, en el mismo rubro aeronautico, Belien et. al (2012) se encargaron de solucionar un problema de mantenimiento de aeronaves. El objetivo de ese trabajo consistió en reducir los costos laborales de una empresa relacionada mediante la programación y asignación de turnos del personal. Para ello se modeló un programa lineal entero mixto (MILP). Los resultados indicaron que la solución propuesta fue efectiva en encontrar soluciones de calidad, y el

número de vuelos y la distribución de la carga de trabajo tuvieron un impacto significativo en los costos. Las dificultades que presentó el problema fueron principalmente la incertidumbre (por ejemplo trabajadores enfermos, retraso en los vuelos, sobrecarga de trabajo inesperado), y la planificación detallada, es decir, la solución garantiza un resultado preciso principalmente a corto plazo. Este trabajo es muy similar al presente estudio en cuanto a objetivo, metodología (programación lineal entera mixta), y dificultades presentadas.

En otro trabajo, Côté et. al (2013) realizaron un trabajo de investigación sobre la asignación de turnos. Para ello se utilizó el método de generación de columnas y se resolvieron los sub-problemas con programación dinámica. Se presentó en este modelo el algoritmo de Branch and Price, lo que permitió que se resuelvan instancias de problemas a gran escala. Los experimentos computacionales realizados en los que se comparó el algoritmo con otros métodos existentes, mostraron que el algoritmo de *B&P* es competitivo con enfoques existentes en la literatura, y que es bastante flexible como para abordar diferentes tipos de problemas. Las dificultades presentadas consistieron en suponer el número total de períodos de trabajo dentro de un turno, pues los trabajadores pueden tener la flexibilidad de determinar cuándo trabajan y cuándo descansan dentro del mismo. Es por esto que se presentan problemas al planificar una semana de trabajo completa sin comienzos y finales de turnos predefinidos, donde se deben crear supuestos para la asignación.

En el rubro de la farmacia y laboratorio, se realizó un estudio por Lapègue et. al (2013), donde se trató la asignación de tareas bajo restricciones y reglas laborales, y equidad en la carga de trabajo, con el fin de satisfacer una demanda. Para ello se propuso un modelo de optimización utilizando programación por restricciones (CP) que abordó simultáneamente la asignación de tareas y el diseño de horarios del personal. Los resultados mostraron un alto porcentaje promedio de tareas asignadas y en equidad, incluso en casos de alta estrechez de la carga de trabajo. Además, respecto a la ejecución, se obtuvieron buenas soluciones rápidamente en solo unos segundos. La dificultad que estuvo presente en este proyecto fue principalmente la imposibilidad de prelación, dado que el problema requiere asignar tareas fijas ininterrumpidas sin priorizar algunas.

Un estudio realizado por Gross et. al (2017) se dedicó en el rubro de la salud a la programación de turnos de médicos en un hospital universitario alemán, donde se debía cumplir con ciertas restricciones legales y de operación, e incluir preferencias de horarios de los médicos. Esto se realizó mediante un modelo de programación entero lineal mixto (MILP), donde se dividió modelo principal en dos sub modelos: uno para el horario de deberes, y otro para el horario de estaciones de trabajo. Los resultados mostraron que el modelo integrado puede lograr resultados cercanos a los óptimos con esfuerzos computacionales razonables, y logra respetar las interdependencias entre el horario de deberes y el horario de estaciones de trabajo. Las principales dificultades presentadas fueron las preferencias por diferentes horarios laborales, y las ausencias no planificadas, como las causadas por enfermedad.

Alp y Alkaya (2019) se dedicaron a la programación de horarios de trabajo del personal de una empresa con un gran número de empleados. El objetivo principal del proyecto fue asignar turnos de una manera justa para personal en una empresa con un gran número de empleados dada una demanda diaria por turno y restricciones. Para ello, se definieron dos subproblemas; tour scheduling y asignación de turnos. Los resultados del modelo propuesto mostraron equidad en comparación con el método actual de asignación, y calidad en la programación de los turnos. Algunas limitaciones relacionadas con este trabajo tienen que ver con principalmente con el tamaño del problema, y la necesidad de tener una actualización periódica de las restricciones del personal.

Finalmente, Cavada et. al (2023) crearon un modelo de planificación de personal para equipos de asistencia en tierra en el Aeropuerto Internacional de Santiago de Chile. Para ello se propuso un modelo de programación lineal mixta entera (MILP), que tomó en consideración restricciones operacionales, de bienestar y legales. Los resultados mostraron significativas mejoras en cuanto al cumplimiento de condiciones laborales, la asignación eficiente de personal y la cobertura de trabajo en comparación con los métodos manuales. Además, se planteó un modelo de factibilidad para identificar las condiciones que podrían llevar a soluciones no factibles, tales como conflictos en turnos preasignados y solicitudes especiales. Las principales dificultades que se presentaron en este proyecto fueron: el tamaño del problema, a lo que se suma que se deben satisfacer adecuadamente las restricciones; se debe escoger un solucionador adecuado para el problema lineal entero mixto; el modelo debe ser modificado periódicamente según los nuevos acuerdos entre trabajadores y empresa; y el déficit de trabajadores en ciertos cargos. Este trabajo muestra similitudes al presente estudio en cuanto a objetivo, metodología (programación lineal entera mixta), y dificultades presentadas.

Si bien, las investigaciones presentadas anteriormente han abordado la asignación y optimización de roles de turnos, su enfoque es principalmente la resolución en una etapa. La presente tesis introduce un método de resolución de sub problemas independientes entre sí, reduciendo así exponencialmente la dificultad y tiempo de resolución.

A continuación se presenta una tabla resumen de los trabajos comentados, donde se menciona el objetivo principal, la metodología de resolución, los principales resultados y sus limitaciones.

Autor	Título	Año	Objetivo	Metodología	Resultados Clave	Dificultades
D. Dowling, M. Krishnamoorthy, H. Mackenzie J.D. Sier	Staff rostering at a large international airport	1997	Resolver un problema de asignación de turnos al personal para de empresa con un gran número de empleados	Modelo matemático para asignación de turnos con restricciones, resuelto mediante un algoritmo heurístico. Consta de 2 etapas, elaboración de turnos mensuales y asignación de tareas.	Reducción de costos y composición de recorridos con horarios más justos y beneficiosos.	Se trabaja con dos tipos de personal, tierra y viaje, que son distintos en complejidad y restricciones.
Jeroen Bellen, Erik Demeulemeester, Philippe De Bruecker, Jorne Van denBergh, Brecht Cardoen	Integrated Staffing and Scheduling for an Aircraft Line Maintenance Problem	2012	Minimizar los costos laborales de una empresa de mantenimiento de aeronaves	Modelo de optimización lineal entero mixto (MILP)	El algoritmo pudo encontrar soluciones de calidad, lo que sugiere que un enfoque integrado para la programación de personal y la asignación de turnos es factible desde el punto de vista computacional. Los gaps varían del 2.28% al 28.96%, con un promedio del 9.84%. El número de vuelos y la distribución de la carga de trabajo tuvieron un impacto significativo en los costos.	Incertidumbre (trabajadores enfermos, retraso en los vuelos, sobrecarga de trabajo inesperado), planificación detallada (preciso a corto plazo).
Marie-Claude Côté, Bernard Gendron, Louis-Martin Rousseau	Grammar-Based Column Generation for Personalized Multi-Activity Shift Scheduling	2013	Asignación óptima de turnos para personal	Método branch-and-price para resolver problemas de programación de turnos personalizados de múltiples actividades. Los subproblemas en el método de generación de columnas se formulan utilizando gramáticas y se resuelven mediante programación dinámica. Se utiliza una formulación de relajación lineal (LP) de la fórmula clásica de cobertura de conjuntos con generación de columnas.	Hay resultados positivos en términos de la eficacia computacional y la flexibilidad del enfoque basado en gramáticas para abordar problemas de programación de turnos de múltiples actividades, y también se destaca que este enfoque supera a otros métodos en ciertos casos.	Dificultad en limitar el número total de períodos de trabajo dentro de un turno, pues los trabajadores pueden tener la flexibilidad de determinar cuándo trabajan y cuándo descansan dentro de un turno. Se presentan problemas al planificar una semana de trabajo completa sin comienzos y finales de turnos predefinidos.
Tanguy Lapègue, Odile Bellenguez-Morineau, Damien Prot	A constraint-based approach for the shift design personnel task scheduling problem with equity	2013	Construir turnos para empleados en una empresa de fármacos, que cubran una demanda basada en equidad respecto a la carga de trabajo	Modelo de CP que aborda simultáneamente la asignación de tareas y el diseño de horarios del personal	Alto porcentaje promedio de tareas asignadas y en equidad, incluso en casos de alta estrechez de la carga de trabajo. Además, respecto a la ejecución se obtuvieron las mejores soluciones rápidamente, es decir, en solo unos pocos segundos.	Imposibilidad de prelación, dado que el problema requiere asignar tareas fijas ininterrumpidas.
Christopher N. Gross, Andreas Fugener, Jens O. Brunner	Online rescheduling of physicians in hospitals	2017	Optimizar programación de turnos de médicos en un hospital universitario alemán, cumpliendo requisitos legales y preferencias de horarios de médicos.	Modelo de programación lineal mixta entera para crear horarios actualizados de deberes y estaciones de trabajo simultáneamente después de las ausencias del personal programado. Se dividió el modelo en dos modelos para el horario de deberes y el horario de estaciones de trabajo, que generan planes de manera secuencial.	El modelo integrado puede lograr resultados cercanos a los óptimos con esfuerzos computacionales razonables, y logra respetar las interdependencias entre el horario de deberes y el horario de estaciones de trabajo. En resumen, permite manejar el compromiso entre los objetivos de calidad del plan y la estabilidad del plan.	Los requisitos legales, los diferentes niveles de calificación, las preferencias por diferentes horarios laborales, las ausencias no planificadas, como las causadas por enfermedad.
Gözde Alp and Ali Fuat Alkaya	Improving the Quality of Personnel Scheduling by Incorporating Fairness	2019	Asignación de turnos de una manera justa para personal en una empresa con un gran número de empleados dada una demanda diaria por turno y restricciones.	Se definen 2 subproblemas lineales enteros (tour scheduling y asignación).	Resultados del modelo son mucho mejores en calidad y equidad en comparación con la asignación actual. Tiene más mérito que es el primer estudio que incluye equidad en este ámbito.	Al separar los 2 subproblemas difieren en periodo planificado (semanal vs mensual), pero si se resuelven como un solo problema entonces es muy grande y solo admite soluciones pequeñas. Por otro lado, los requisitos de los empleados se actualizan cada 4 semanas.
Juan Cavada, Cristián Cortés, Gustavo Henríquez, Pablo Rey	A ground crew shift rostering model for Santiago International Airport	2023	Planificación de personal de los equipos de asistencia en tierra en el Aeropuerto Internacional de Santiago en Chile, generando horarios de turnos para los empleados durante todo un mes.	Modelo de programación lineal mixta entera (MILP)	El modelo presentó significativas mejoras en cuanto a cumplimiento de condiciones laborales, asignación eficiente de personal y cobertura de trabajo en comparación con los métodos manuales. Se introdujo un modelo de factibilidad para identificar condiciones que podrían llevar a soluciones no factibles, como conflictos en turnos preestablecidos y solicitudes especiales.	El problema es de gran tamaño y se deben satisfacer adecuadamente las restricciones. Se debe escoger un solucionador adecuado para el problema lineal entero mixto. Por otro lado, el modelo debe ser modificado periódicamente según los nuevos acuerdos entre trabajadores y empresa. Hay déficit de trabajadores en ciertos cargos.

Figura 2.9: Características clave de la literatura revisada.

Capítulo 3

Problema y enfoque de solución

3.1. Descripción del problema

Para el proceso descrito anteriormente se debe calcular el número de personas que se llaman a trabajar cada día en cierto horario para alguna función en particular, y posteriormente crear el roster, es decir, una matriz de turnos que asigne turnos a un funcionarios cada día del mes bajo ciertas restricciones legales, de operación y de bienestar.

Consideremos un total de F funcionarios, que están segmentados en C grupos de trabajo, cuyos S tipos de turnos deben ser planificados para un horizonte temporal de D días (equivalente a 1 mes). Cada grupo de trabajo C consta de F_c funcionarios, cada uno de los cuales debe tomar exactamente uno de los S_c turnos cada día. Debido a la operación o a pedidos de los supervisores, hay ciertos turnos pre asignados que de forma estricta debe tomar un funcionario. Existe una variedad de turnos especiales que no se pueden asignar a un funcionario f en el día d a menos que se le preasigne.

Cada turno s tiene una duración de tiempo de trabajo, que corresponde a la diferencia entre la hora de entrada y la hora de salida del turno. Dado esto, un funcionario no puede trabajar más de 45 horas en total en una semana movable del mes, la cual se refiere a 7 días seguidos cualesquiera, ya sea dentro del mes al que se está optimizando los turnos o entre meses. Sin embargo, se intenta que cada funcionario trabaje la mayor cantidad de horas posible dentro de ese intervalo. Existe una demanda dada como parámetro para cada turno s trabajado en el día D , la cual se espera cubrir con la dotación de personal. En caso de no poder suplirla, se desea la mayor cobertura posible.

Por otro lado, no todos los turnos pueden seguirse entre si, sino que se debe asegurar un descanso mínimo de H horas para cada trabajador entre la salida de un turno y la entrada del siguiente. Además, la empresa solicita que cada funcionario pueda trabajar a lo más dos días domingos al mes pues de lo contrario se incurre en gastos extras por bonos.

Se espera paridad, tanto en la cobertura de los turnos como en las horas trabajadas por funcionarios, para que así no haya algún turno descubierto totalmente o algún trabajador que trabaje más durante el mes. El objetivo de este problema es entregar la menor cantidad de días libres posible en total, cubrir de la mejor forma la demanda de turnos, y llamar la mayor cantidad de funcionarios posibles cada día a trabajar.

3.2. Condiciones de los turnos

En el ámbito laboral, es fundamental conocer las condiciones que deben cumplir los turnos en el trabajo, tanto las obligatorias como las deseables. Los turnos asignados deben cumplir estrictamente las condiciones establecidas en los contratos sindicales y en las legalidades laborales, con el fin de garantizar un ambiente laboral seguro y justo para los trabajadores.

A continuación, se definen los turnos que asigna la empresa a sus funcionarios.

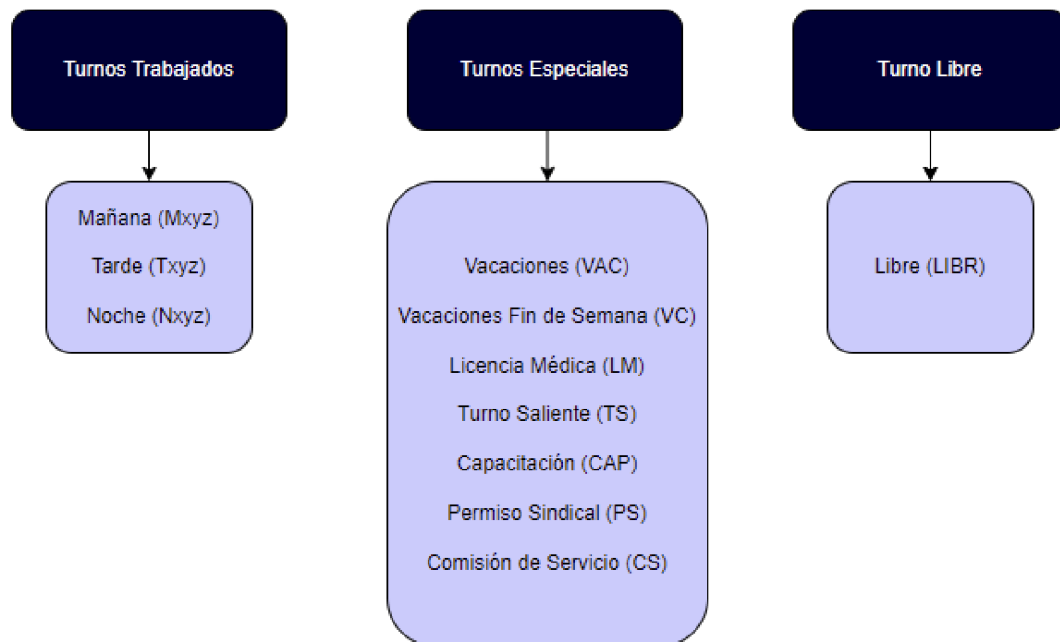


Figura 3.1: Tipos de turnos

Los turnos de mañana (M_{xyz}), en su mayoría, son aquellos que comienzan entre las 6:00 y las 11:00 horas. Los turnos de tarde (T_{xyz}) generalmente son aquellos que comienzan entre las 12:00 y las 16:00 horas, y los turnos de noche (N_{xyz}) generalmente son aquellos que comienzan entre las 17:00 y las 23:30 horas. Sin embargo, hay ciertos turnos que particularmente comienzan en la madrugada para cobertura de demanda. Existen turnos en particular que se utilizan para cubrir el resto de los horarios no mencionados, como por ejemplo aquellos que abarcan el bloque entre 11:00 y 12:00 horas.

En cuanto a la duración de los turnos, se pueden clasificar en dos grupos: los turnos de 7,5 horas y los turnos de 9 horas. Para simplificar el proceso, cada funcionario puede tener asig-

nado un solo tipo de turno por día durante todo el mes. Esta medida se toma con el fin de garantizar que la suma total de horas semanales no superen las 45 horas legales, permitiendo así una mayor eficiencia en el tiempo de trabajo. Cabe destacar que los cálculos de las duraciones se hace sobre una semana movable, es decir, en 7 días consecutivos.

El Turno Saliente corresponde a un turno libre que se considera como trabajado y pagado, y ocurre cuando el funcionario comienza su jornada de trabajo un día, y la termina al día siguiente. En este caso alcanzó a trabajar la fracción de un día. El Turno Saliente tiene una duración variable, es decir, si el turno que lo antecede dura 7,5 horas o 9 horas, entonces adopta esa duración respectiva. Se añade a lo anterior que después de cada turno saliente, al día siguiente corresponde asignar de manera estricta un turno libre al funcionario.

La relación entre los turnos de trabajo de mañana, tarde y noche no se rige por una secuencia preestablecida, sino que las condiciones de la secuencia se determinan por la diferencia entre dichos turnos. Esta diferencia se define como la brecha entre el final del primer turno y el inicio del segundo turno. En la siguiente figura se muestra la secuencia de turnos en n días para algún funcionario, donde la diferencia horaria entre turnos es $H_i: i \in \{1, \dots, n-1\}$. Para que dos turnos puedan seguirse en días consecutivos (d y $d+1$), se requiere que H_i sea mayor a H . Esta condición es de bienestar ya que asegura un correcto descanso del funcionario. Este valor H es variable en el tiempo y depende de contratos sindicales, pero hasta la actualidad los valores que ha tomado ha sido 11 horas y 12 horas.

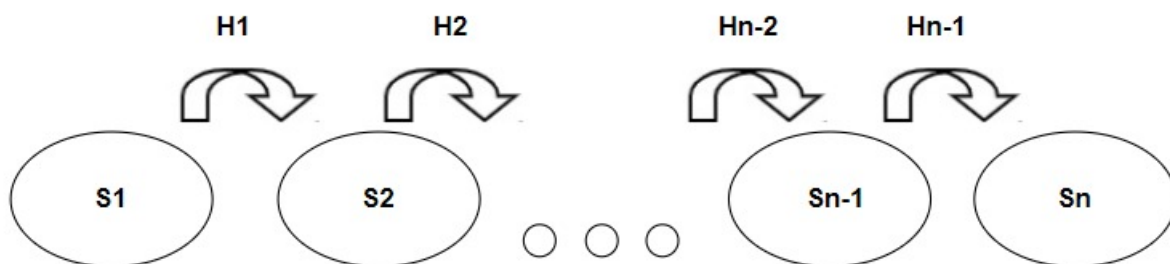


Figura 3.2: Regla de compatibilidad de turnos

A continuación se muestran dos ejemplos de turnos semanales para algún funcionario, respetando las 45 horas de trabajo máximo y la compatibilidad entre turnos de días consecutivos. La siguiente figura corresponde a un ejemplo de secuencia de turnos de 9 horas para una semana móvil que consta de 5 turnos con duración de trabajo y 2 turnos sin duración de trabajo, lo que suma un total de 45 horas. Además, se ha incluido un turno nocturno, lo que genera la necesidad de incluir un turno saliente con la duración correspondiente.

Día	d	d+1	d+2	d+3	d+4	d+5	d+6
Código	LIBR	M030	M031	T001	N032	TS	LIBR
Tipo de turno	Libre	Mañana	Mañana	Tarde	Noche	Turno Saliente	Libre
Duración	0 hrs.	9 hrs.	9 hrs.	9 hrs.	9 hrs.	9 hrs.	0 hrs.

Figura 3.3: Ejemplo de secuencia de turnos de 9 horas

Por otro lado, la siguiente figura corresponde a un ejemplo de secuencia de turnos de 7.5 horas para una semana móvil que consta de 6 turnos con duración de trabajo y 1 turno sin duración de trabajo, lo que suma un total de 45 horas. Al igual que en el caso anterior, se incluye un turno nocturno, lo que genera la necesidad de incluir un turno saliente con duración 7.5 hrs.

Día	d	d+1	d+2	d+3	d+4	d+5	d+6
Código	T012	T240	N001	N038	TS	LIBR	M034
Tipo de turno	Tarde	Tarde	Noche	Noche	Turno Saliente	Libre	Mañana
Duración	7.5 hrs.	7.5 hrs.	7.5 hrs.	7.5 hrs.	7.5 hrs.	0 hrs.	7.5 hrs.

Figura 3.4: Ejemplo de secuencia de turnos de 7,5 horas

3.3. Solución propuesta

Teniendo en cuenta el proceso general y el problema definidos, se propone una solución en dos etapas: la primera, consiste en automatizar y calcular la demanda de funcionarios en cada instante, mientras que la segunda, se enfoca en optimizar la asignación de los roles de turno.

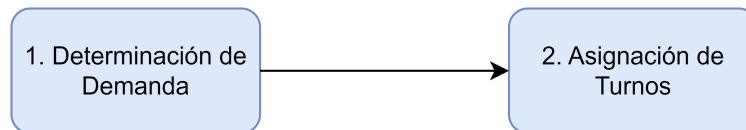


Figura 3.5: Etapas de solución

La determinación de la demanda consiste en calcular el número de funcionarios necesarios en cada momento del mes para algún cargo en específico. Una vez realizado esto, se procede a hacer un *shifting*, que se refiere a reorganizar la demanda en distintos turnos de trabajo para poder cubrir los requerimientos de forma óptima. Esto será necesario para la segunda etapa, ya que servirá como uno de los parámetros del problema de programación lineal mixto, que es la propuesta de solución a la segunda etapa. Este consiste en poder asignar trabajadores a los turnos propuestos con el fin de satisfacer la demanda.

3.3.1. Determinación de demanda

Para poder determinar la demanda, se utilizará el programa Inform, que es un software que utiliza la empresa en el área de pasajeros, a diferencia del área de carga, para realizar

mensualmente la planificación de demanda. Para su implementación se debe recopilar la siguiente información:

- Dotación de funcionarios
- Functions (funciones)
- Qualifications (cualidades)
- Reglas operacionales
 - Static rules (reglas no variables)
 - Multi flight (reglas asignadas a multiples vuelos)
- Locations (lugares físicos)

Las functions hacen referencia a las tareas generales que hacen los trabajadores, como por ejemplo operarios, internadores y supervisores. Por otro lado, las qualifications son aquellas tareas particulares que componen una function. Por ejemplo, los operarios pueden ser maquinistas, coordinadores y paqueteros.

Respecto a las reglas, las static rules son aquellas que no son variables. Ejemplo de esto es el horario de trabajo de los funcionarios de facturación, que es el mismo periódicamente. Por otro lado, las multi flight son aquellas reglas que dependen de los eventos variables, como por ejemplo el itinerario de llegada de los aviones, la cantidad y tipo de carga, y el número de funcionarios disponibles. Finalmente, las locations se refieren a los lugares de la bodega donde se realizan las tareas, pues se consideran sus capacidades y tiempos de traslados.

Mensualmente se debe agregar el itinerario respectivo de vuelos o modificar personal, pero todo lo demás es relativamente fijo, al menos a corto y mediano plazo.

La plataforma consta de dos partes: base de datos y planning. En la base de datos se debe indicar las service classes y las service groups, que en conjunto resulta el nivel de servicio. Por ejemplo, si la carga fría se deba internar antes que las demás por su prioridad, este es el lugar donde se debe especificar. Además, en el módulo de base de datos se pueden visualizar las locations, las rutas de los vuelos, y las características de los aviones, entre otras características. A continuación se muestran imágenes de lo anterior.

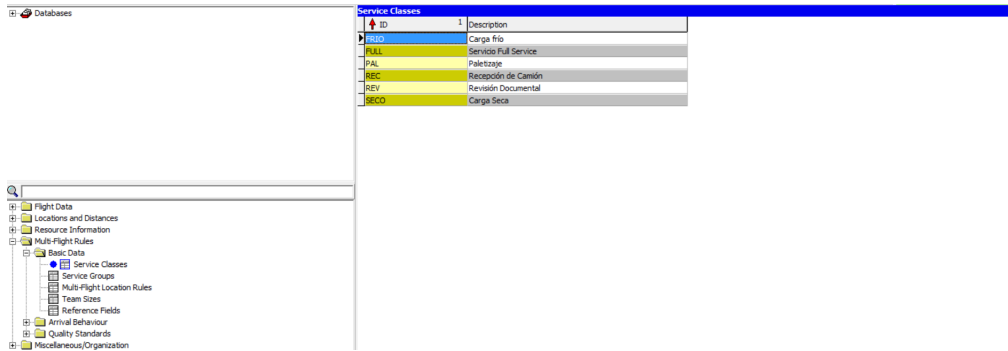


Figura 3.6: Programa Inform, service classes

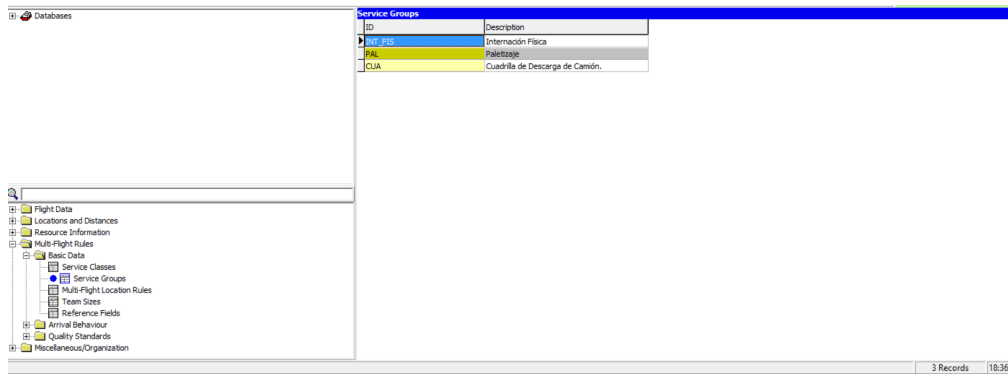


Figura 3.7: Programa Inform, service groups

Por otro lado está el módulo de planning, donde se modela el escenario mensualmente. Lo primero es cargar el LOW (line of work) que se refiere al itinerario detallado mensual de vuelos, que indica el número de vuelo, su ruta, y las fechas y horas de arribo y despegue. Junto con esta información se puede agregar otras características, como los kilogramos transportados y el tipo de carga. A continuación se muestra el módulo de la plataforma donde se despliega el itinerario de vuelos.

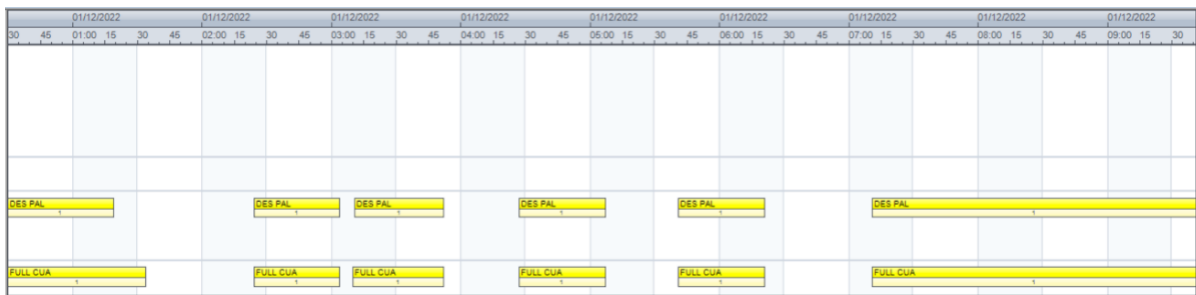


Figura 3.8: Programa Inform, modulo principal

En el caso de modelar los equipos cuyas tareas no dependen de la llegada o salida de vuelos, por ejemplo atención al cliente, se les crean reglas de llegada de clientes en vez de vuelos. Así, cada uno de los diez grupos de trabajo de importaciones se identifica con algún evento

que acciona sus tareas.

Junto con considerar la información conocida, se agrega incertidumbre al modelo de cálculo de demanda de dotación. Por ejemplo, digamos que los periodos anteriores muestran que el 80 % de la carga es carga peligrosa y el 20 % es pharma, entonces en ese caso se supone que de cada 10 vuelos, ocho vienen completos con cargas peligrosas y dos vienen con carga pharma. Esto permite que, dadas ciertas estacionalidades o eventos puntuales, el modelo se pueda anticipar y cubrir esa operación.

La planificación requiere conocer también los tiempos de las tareas. Para ello se revisan datos históricos y con ese levantamiento de información se asignan sus tiempos.

Por otro lado, para que el sistema pueda cubrir la operación, se le debe indicar los tipos de turnos que se pueden utilizar y sus horarios. Por ejemplo, el turno *M042* corresponde a una entrada a las 8:00 hrs. y una salida a las 17:00 hrs.

Las siguientes imágenes muestran un ejemplo simulado de la demanda calculada para cierto escenario mensual por el sistema y su cobertura con los turnos disponibles.

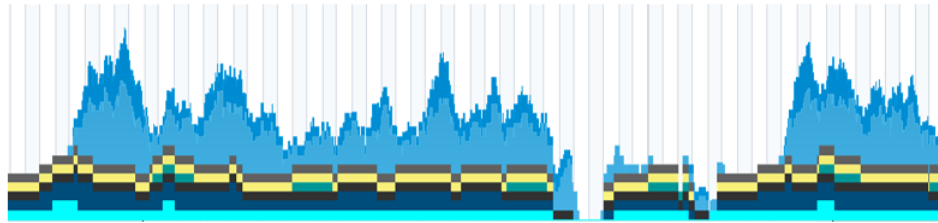


Figura 3.9: Programa Inform, gráfica de demanda

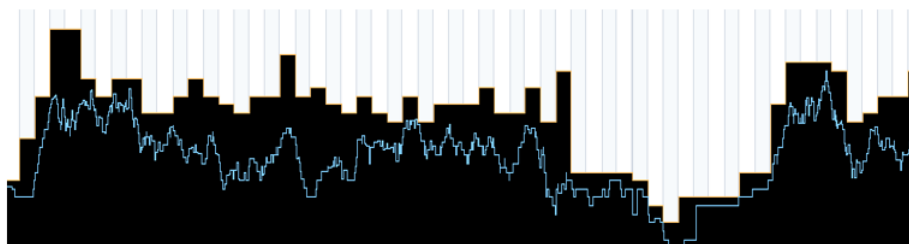


Figura 3.10: Programa Inform, gráfica de cobertura

En la primera figura se muestra un gráfico que indica la demanda de funcionarios necesaria a lo largo de un periodo de tiempo, donde cada color representa un grupo de trabajo distinto. La segunda figura, por otro lado, muestra la cobertura de la demanda mediante la mejor asignación de turnos posible. La curva en azul representa la dotación necesaria, y la curva en color negro es la asignación por parte del software. Dependiendo de la cantidad y los tipos de turnos disponibles, la diferencia entre ambas curvas aumentará o se disminuirá, tal como

se espera para minimizar los costos extra innecesarios.

Como el objetivo de este problema no es optimizar la elección de los tipos de turnos utilizados, se tomará en cuenta para esta tarea el criterio de los encargados actuales de la construcción de roles de turno, y las solicitudes de los respectivos supervisores.

Finalmente, para consolidar la información entregada sobre la demanda mensual de turnos, el software cuenta con distintas opciones de output. Ejemplos de esto son hoja de cálculo, archivo csv o archivo de texto. Se optó por un formato de hoja de cálculo que incluya los horarios de los turnos, los tipos de turnos, el grupo de trabajo y los días del mes con su respectiva demanda, tal como se muestra a continuación.

Horario	Grouped by	FUNCTION	Total Mensual	1	2	3	4	5	6
08:00-17:00	M032	OPERADOR DESPACHADOR	217	4	8	5	4	8	10
11:00-20:00	M060	OPERADOR DESPACHADOR	94	3	1	2	10	1	3
01:00-10:00	N068	OPERADOR DESPACHADOR	399	12	12	12	13	13	13
12:30-21:30	T009	OPERADOR DESPACHADOR	62	0	2	3	1	2	0
14:00-23:00	T023	OPERADOR DESPACHADOR	35	7	4	3	10	4	7
08:00-17:00	M032	SUPERVISOR	9	1	1	1	2	2	2
14:00-23:00	T023	SUPERVISOR	6	2	2	2	0	0	0
11:00-20:00	M060	INTERNADOR FISICO	44	4	5	10	10	8	7
12:30-21:30	T009	INTERNADOR FISICO	27	1	10	4	3	8	1
14:00-23:00	T023	INTERNADOR FISICO	23	3	1	2	10	5	2

Figura 3.11: Ejemplo de resultado de programación de demanda mensual

3.3.2. Modelo propuesto para asignación óptima de turnos

Para una óptima construcción de los roles de turnos para los trabajadores a lo largo del mes, se propone el siguiente modelo de programación lineal mixto que maximiza la cobertura de demanda y minimiza los días libres asignados para cada trabajador, con el objetivo de cumplir con las 45 horas laborales. El problema planteado a continuación es independiente para cada grupo de trabajo o cargo, lo que implica que los conjuntos varían en función de estos. Para abordar toda la dotación de funcionarios, es necesario resolver iterativamente la situación en cada grupo de trabajo para cada mes.

3.3.2.1. Conjuntos

- $f \in F$: Funcionarios
- $f \in Fold \subseteq F$: Funcionarios con antigüedad
- $f \in Fnew \subseteq F$: Funcionarios nuevos
- $d \in D$: Días del mes
- $d \in Dsin \subseteq D$: Días del mes sin el último día
- $d \in D6 \subseteq D$: Días del mes sin los últimos seis

- $d \in Dom \subseteq D$: Días domingos del mes
- $d \in Sab \subseteq D$: Días sábados que no son el último día del mes
- $d \in Lun \subseteq D$: Días lunes del mes
- $s \in S$: Turnos a asignar
- $s \in Se \subseteq S$: Turnos especiales
- $s \in Sw \subseteq S$: Turnos de trabajo
- $s \in Snw \subseteq S$: Turnos de no trabajo

3.3.2.2. Parámetros

<i>Año</i> : Año para el que se hará el roster	$Año \in \mathbb{N}$
<i>Mes</i> : Número del mes para el que se hará el roster	$Mes \in \{1, \dots, 12\}$
$Q_{s,d}$: Demanda a satisfacer en turno s en día d	$\forall s \in S_w, \forall d \in D$
$Duracion_s$: Duración del turno s	$\forall s \in S$
$DuracionL_{f,d}$: Horas trabajadas últimos d días del mes anterior para f	$\forall f \in F$
$Last_f$: Turno del último día del mes anterior para f	$\forall f \in F$
$Pesos_turnos_s$: Peso de un turno según tipo (<i>Mañana, Tarde o Noche</i>)	$\forall f \in F$
$Pre_{f,s,d} = \begin{cases} 1, & \text{si a } f \text{ se preasigna un turno } s \text{ en el día } d \\ 0, & \text{si no.} \end{cases}$	$\forall f \in F, s \in S, d \in D$
$Pre_esp_{f,s,d} = \begin{cases} 1, & \text{si a } f \text{ se preasigna un turno especial } s \text{ en el día } d \\ 0, & \text{si no.} \end{cases}$	$\forall f \in F, s \in Se, d \in D$
$Compat_{s,r} = \begin{cases} 1, & \text{si al turno } s \text{ le puede seguir el turno } r \text{ el día siguiente} \\ 0, & \text{si no.} \end{cases}$	$\forall s, r \in S$

3.3.2.3. Variables

$$X_{f,s,d} = \begin{cases} 1, & \text{si a funcionario } f \text{ se le asigna turno } s \text{ en el día } d \\ 0, & \text{si no} \end{cases} \quad \forall f \in F, s \in S, d \in D$$

$$Weekend_{f,d} = \begin{cases} 1, & \text{si la semana de sábado } d \text{ se asigna libre al funcionario } f \\ 0, & \text{si no} \end{cases} \quad \forall f \in F, d \in Sab$$

$$U_{s,d} = \text{Déficit de dotación para el turno } s \text{ en día } d \text{ respecto a la demanda} \quad \forall s \in Sw, d \in D$$

$$UH_{f,d} = \text{Déficit de trabajo por un funcionario en una semana movable} \quad \forall f \in F, d \in D6$$

$$UH_{\max} = \text{Máximo déficit de horas trabajadas}$$

$$U_{\max} = \text{Máximo déficit de dotación en un turno en algún día}$$

$$No_work_d = \text{Número de funcionarios que no trabajan en el día } d \quad \forall d \in D$$

$$Max_no_work = \text{Máximo número de trabajadores sin laborar en un día}$$

3.3.2.4. Restricciones

- (1) $\sum_{s \in S} X_{f,s,d} = 1,$ $\forall f \in F, d \in D$
- (2) $X_{f,s,d} \geq \text{Pre}_{f,s,d},$ $\forall f \in F, s \in S, d \in D$
- (3) $X_{f,s,d} = \text{Pre_esp}_{f,s,d},$ $\forall f \in F, s \in Se, d \in D$
- (4) $\sum_{f \in F} X_{f,s,d} \geq Q_{s,d} - U_{s,d},$ $\forall s \in Sw, d \in D$
- (5) $\sum_{s \in S} \sum_{e=d}^{d+6} X_{f,s,e} \cdot \text{Duracion}_s \geq 45 - UH_{f,d},$ $\forall f \in F, d \in D6$
- (6) $\text{Duracion}_{L_{f,7-a}} + \sum_{s \in S} \text{Duracion}_s \cdot \sum_{i=1}^a X_{f,s,i} \leq 45,$ $\forall f \in F_{\text{old}}, a \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$
- (7) $\sum_{s \in S} \sum_{e=d}^{d+6} X_{f,s,e} \cdot \text{Duracion}_s \leq 45,$ $\forall f \in F, d \in D6$
- (8) $X_{f,s,d} + X_{f,r,d+1} \leq \text{Compat}_{s,r} + 1,$ $\forall f \in F, s \in S, r \in S, d \in D_{\text{sin}}$
- (9) $X_{f,s,1} \leq \text{Compat}_{s,\text{Last}_f},$ $\forall f \in F, s \in S$
- (10) $\sum_{d \in \text{Dom}} \sum_{s \in Sw} X_{f,s,d} \leq 2,$ $\forall f \in F$
- (11) $UH_{f,d} \leq UH_{\text{max}},$ $\forall f \in F, d \in D6$
- (12) $U_{s,d} \leq U_{\text{max}},$ $\forall s \in Sw, d \in D$
- (13) $X_{f,\text{TS},1} = 0,$ $\forall f \in F_{\text{new}}$
- (14) $\sum_{d \in \text{Sab}} \text{Weekend}_{f,d} = 1,$ $\forall f \in F$
- (15) $X_{f,\text{LIBR},d} + X_{f,\text{LIBR},d+1} \geq 2 \cdot \text{Weekend}_{f,d},$ $\forall f \in F, d \in \text{Sab}$
- (16) $\text{No_work}_d = \sum_{f \in F} \sum_{s \in S_{nw}} X_{f,s,d},$ $\forall d \in \text{Dias}$
- (17) $\text{Max_no_work} \geq \text{No_work}_d,$ $\forall d \in \text{Dias}$
- (18) $X_{f,s,d} \in \{0, 1\},$ $\forall f \in F, s \in S, d \in D$
- (19) $\text{Weekend}_{f,d} \in \{0, 1\},$ $\forall f \in F, d \in \text{Sab}$
- (20) $UH_{f,d} \in \mathbb{Z}^+,$ $\forall f \in F, d \in D6$
- (21) $U_{s,d} \in \mathbb{Z}^+,$ $\forall s \in Sw, d \in D$
- (22) $\text{No_work}_d \in \mathbb{Z}^+,$ $\forall d \in D$
- (23) $UH_{\text{max}} \in \mathbb{Z}^+$
- (24) $U_{\text{max}} \in \mathbb{Z}^+$
- (25) $\text{Max_no_work} \in \mathbb{Z}^+$

La restricción (1) establece que todos los funcionarios deben tener asignado un turno cada día. La restricción (2) asegura que se asignen los turnos establecidos previamente, ya sean de trabajo o especiales. La restricción (3) hace referencia a que los demás días que no son

predefinidos no pueden tener turnos especiales asignados. La restricción (4) establece que se debe satisfacer la demanda diaria por cada turno, con cierta holgura en caso de haber infactibilidad dada por falta de personal. La restricción (5) garantiza que se cumpla con una cantidad mínima de horas semanales de trabajo, que puede ser ajustada dependiendo de la operación. Similar a esto, la restricción (6) asegura que en aquellas semanas que involucran días de 2 meses, se respeten las 45 horas de trabajo máximo. La restricción (7) se establece que no se pueden superar las 45 horas semanales de trabajo. Este límite puede ser ajustado según regulaciones específicas. La restricción (8) se refiere a la compatibilidad de turnos entre los días del mes. Esto significa que los turnos asignados a un funcionario deben ser compatibles entre días consecutivos. La restricción (9) se relaciona con la compatibilidad de turnos entre el último día del mes anterior y el primer día del mes actual. Esto garantiza la continuidad entre meses. La restricción (10) establece que cada funcionario puede trabajar como máximo 2 domingos al mes, lo cual es una condición deseada por la empresa. La restricción (11) define la variable de mayor déficit de horas trabajadas diarias por funcionario. La restricción (12) establece el mayor déficit de funcionarios demandados para un turno en un día. En la restricción (13) se establece que los funcionarios nuevos no pueden tener asignado un turno saliente el primer día. La restricción (14) hace referencia a que cada funcionario debe tener un fin de semana libre al mes. Por otro lado, la restricción (15) se refiere a la asignación de días libres en el fin de semana dado a un funcionario. Esto significa que cuando se da libre a un funcionario, tanto el sábado como el domingo deben ser asignados como días libres. La restricción (16) establece que el número de funcionarios que no trabajaron en cierto día es la suma de aquellos que tienen asignados turnos especiales, turno saliente o están libres. La restricción (17) define el número máximo de funcionarios que no trabajaron en cierto día. Finalmente, las restricciones (18) a la (25) definen la naturaleza de las variables utilizadas en el problema.

3.3.2.4.1. Clasificación de las restricciones

Las restricciones descritas anteriormente se clasifican en tres grupos: legales (o de bienestar), deseadas, y operacionales. Las legales son aquellas que son exigidas legalmente para los trabajadores o por acuerdos sindicales. Las deseadas corresponden a las restricciones que se imponen como una regla de asignación por parte de la empresa. Por último, las restricciones operacionales son aquellas necesarias para que el modelo pueda funcionar, como por ejemplo definiciones, comparación entre variables, entre otras.

3.3.2.5. Función Objetivo

$$\text{Min } w_1 \cdot \sum_d \sum_s U_{s,d} + w_2 \cdot U_{max} + w_3 \cdot \sum_d \text{No_Work}_d + w_4 \cdot \text{Max_no_work}$$

La función objetivo definida tiene coeficientes w_i , $i \in \{1,2,3,4\}$, para cada uno de sus términos respectivos, los cuales serán definidos más adelante. El primer término garantiza que se cumpla la demanda de dotación requerida en cada día y turno en la medida de lo posible,

Legales	Deseadas	Operacionales
6	2	1
7	4	3
8	5	11
9	10	12
14		13
15		16
		17
		18
		19
		20
		21
		22
		23
		24
		25

Figura 3.12: Clasificación de Restricciones

minimizando así el incumplimiento total. Por otro lado, el segundo término busca minimizar el incumplimiento máximo de la demanda para los turnos y días, ya que se prioriza tener múltiples turnos con una cobertura limitada en lugar de uno completamente desatendido. El tercer término se enfoca en asegurar que se llame a un número mínimo de trabajadores cada día, evitando así la ausencia de personal en determinados días, mientras que el cuarto término maximiza la mínima cantidad de trabajadores llamados cierto día del mes.

3.3.2.6. Cálculo de coeficientes de la función objetivo

Dado que el problema se resuelve en una sola etapa, se debe decidir cuáles serán los coeficientes de cada término de la función objetivo para así priorizar ciertas soluciones factibles por sobre otras.

Inicialmente la función objetivo tenía las siguientes componentes:

1. $\sum_d \sum_s U_{s,d}$
2. $\max_{s,d} U_{s,d}$
3. $\sum_d \sum_f X_{f,LIBR,d}$
4. $\sum_d \text{No_work}_d$
5. $\max_d \text{Max_no_work}_d$
6. $\sum_d \sum_f UH_{f,d}$
7. $\max_{f,d} UH_{f,d}$

Para poder mejorar el planteamiento del problema y su resolución, se redujo la cantidad de términos de 7 a 4, dado que existe correlación directa o indirecta entre algunas de ellas. Se eliminó la expresión (3) que reduce el número de turnos libres o no trabajados, dado que la expresión (1) se encarga de cubrir la demanda programada, y la expresión (4) se encarga de cubrir los turnos no trabajados por día. También se eliminaron las expresiones (6) y (7) que tenían por objetivo planificar turnos de tal manera que el funcionario trabaje la mayor cantidad horas semanales movibles con un máximo de 45, ya que estaba correlacionada con la expresión (3), (2) y (4).

Se realizaron pruebas con un escenario para ambos casos de función objetivo y mismos coeficientes, y se obtuvieron los mismos resultados en cuanto a las 4 variables calculadas. Es por eso que se decidió dejar solamente las siguientes expresiones:

1. $\sum_d \sum_s U_{s,d}$
2. $\max_{s,d} U_{s,d}$
3. $\sum_d \text{No_work}_d$
4. $\max_d \text{Max_no_work}_d$

La siguiente etapa fue definir los 4 coeficientes para las expresiones respectivas, para lo cual se utilizaron 2 criterios: comparación de prioridades, y análisis de resultados de prueba. Para lo primero, se debe decidir qué es más prioritario, si la cobertura de turnos, o que se minimicen los turnos no trabajados. La respuesta a ello es que es más importante para la empresa la cobertura de turnos, ya que no hay mucha utilidad en tener funcionarios trabajando en turnos que no hay movimiento operacional, y no tener funcionarios en los horarios de alta demanda. Es por ello que es más importante cubrir primero la demanda, es decir, minimizar el déficit de turnos cubiertos $\sum_d \sum_s U_{s,d}$, y por ende los coeficientes de las expresiones (1) y (2) deben ser mayores que los de las expresiones (3) y (4). Para asegurar esta condición estricta, se tomará un coeficiente 5 veces mayor, es decir, es mejor dejar de incumplir 1 turno que llamar a trabajar 5 funcionarios en turnos libres sin demanda.

Por otro lado, la relación entre los valores de las expresiones (1) y (2) en las pruebas realizadas en promedio fue 1:20, con el escenario realizado de prueba, que se detallará más adelante. Considerando esto, y dándole prioridad a la suma de déficit de turnos cubiertos, se decidieron los siguientes coeficientes:

Tabla 3.1: Tabla de Coeficientes

Coeficiente	Valor
w1	10
w2	5
w3	2
w4	1

Así, la función objetivo con los coeficientes definidos es:

$$\text{Min } 10 \cdot \sum_d \sum_s U_{s,d} + 5 \cdot U_{max} + 2 \cdot \sum_d \text{No_Work}_d + \text{Max_no_work}$$

3.3.3. Implementación computacional

Las dos etapas de la solución propuesta son implementadas en distintos softwares. En el caso de la asignación óptima de turnos, el modelo matemático se transcribió a lenguaje de programación Python®, que fue escogido por su simplicidad, la gran variedad de funcionalidades

que trae incorporadas y el conocimiento adquirido de este por sobre otros lenguajes de programación, con el objetivo de automatizar la operación. Por otro lado, se utilizó la librería de Gurobi Optimizer [®] para optimizar el problema modelado, la cual fue escogida por su simplicidad, por la gran cantidad de bibliografía existente y por el conocimiento adquirido por sobre otros solvers. Para modelar el problema se utilizó la plataforma Google Colab [®], con el fin de simplificar la usabilidad para los funcionarios de la empresa. Los beneficios de utilizarla son variados, como por ejemplo accesibilidad, restricción para leer o editar, guardado automático de cambios y máquina compartida con Google para solucionar.

Una vez obtenida la solución óptima por grupo de trabajo, el modelo entrega un archivo Excel con $|C|$ hojas, donde cada una muestra la matriz de turnos del mes para sus respectivos funcionarios.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
Trabajador 1	VAC	VAC	VAC	VC	VC	VAC	VAC	VAC	VAC	VAC	VC	VC	N068	N068	N068	M032	T023	LIBR	LIBR	CAP	CAP	CAP	CAP	CAP	N068	M032	M032	T009	
Trabajador 2	LIBR	LIBR	N068	N068	N068	LIBR	M032	LIBR	N068	N068	N068	LIBR	LIBR	T023	T023	M060	M032	M032	LIBR	LIBR	T023	M060	M032	LIBR	LIBR	M032	M032	T009	
Trabajador 3	N068	LIBR	LIBR	M032	M032	M032	LIBR	M032	T023	LIBR	T023	M060	M032	LIBR	T023	T023	LIBR	LIBR	LIBR	N068	N068	M032	M032	LIBR	T023	LIBR	T009	T009	
Trabajador 4	VAC	VAC	VAC	VC	VC	N068	N068	M032	M032	M032	LIBR	LIBR	N068	N068	M032	M032	T023	LIBR	LIBR	N068	N068	M032	T023	T023	LIBR	LIBR	N068	N068	
Trabajador 5	N068	N068	M032	LIBR	LIBR	T009	T009	LIBR	LIBR	T023	T023	T023	LIBR	LIBR	N068	T023	T023	T023	M060	VAC	VAC	VAC	VAC	VAC	VC	VC	VAC	VAC	
Trabajador 6	LIBR	T023	LIBR	LIBR	LIBR	N068	N068	T023	T023	VAC	VC	VC	VAC	VAC	VAC	VAC	VAC	VC	VC	VAC	VAC	VAC	VAC	VAC	VC	VC	VAC	VAC	
Trabajador 7	LIBR	LIBR	N068	M032	M032	LIBR	LIBR	M060	M032	M060	LIBR	LIBR	T009	T009	T023	M060	M032	LIBR	LIBR	M060	M032	M060	M032	T023	LIBR	LIBR	M032	M032	
Trabajador 8	M032	M032	T023	LIBR	LIBR	LIBR	LIBR	N068	N068	M032	M032	M032	LIBR	LIBR	N068	N068	N068	M032	M032	LIBR	LIBR	N068	N068	N068	T023	M060	CAP	CAP	
Trabajador 9	VAC	VAC	VAC	VC	VC	VAC	VAC	VAC	VAC	VAC	VC	VC	VAC	VAC	VAC	VAC	VAC	VC	VC	VAC	VAC	VAC	VAC	VAC	VC	VC	M032	T009	
Trabajador 10	T023	T023	M060	LIBR	LIBR	LIBR	LIBR	N068	N068	N068	N068	N068	CAP	CAP	CAP	CAP	CAP	N068	N068	T009	T009	T023	LIBR	LIBR	M032	M032	M032	M060	
Trabajador 11	M032	M032	M032	LIBR	LIBR	M032	M032	T023	LIBR	LIBR	M032	M032	T009	T009	LIBR	LIBR	N068	N068	N068	M032	M032	LIBR	LIBR	N068	N068	N068	M060	M032	
Trabajador 12	LIBR	N068	N068	T023	LIBR	M032	T009	LIBR	M060	M032	LIBR	LIBR	M060	M032	M032	LIBR	LIBR	T023	T023	T009	T009	T023	LIBR	LIBR	M032	M032	M032	M032	
Trabajador 13	T023	T023	T023	LIBR	LIBR	M060	M032	LIBR	M032	T023	LIBR	N068	N068	N068	LIBR	N068	M032	LIBR	N068	T009	T009	LIBR	N068	T023	LIBR	N068	N068	N068	
Trabajador 14	T023	LIBR	LIBR	N068	N068	LIBR	M060	T023	T023	LIBR	T023	T023	LIBR	M032	M032	M032	LIBR	T023	T023	LIBR	LIBR	T023	T023	M060	LIBR	LIBR	M060	T023	
Trabajador 15	T023	M060	LIBR	T023	LIBR	T009	T009	T023	LIBR	T023	T023	LIBR	M032	M032	T023	LIBR	M032	T023	LIBR	N068	LIBR	N068	M032	M032	LIBR	LIBR	N068	N068	
Trabajador 16	LIBR	LIBR	T023	T023	T009	LIBR	M032	LIBR	N068	N068	LIBR	M032	M060	M060	LIBR	N068	LIBR	LIBR	M032	M060	M032	LIBR	M032	LIBR	M032	LIBR	T023	T009	T009
Trabajador 17	M060	M032	M032	LIBR	LIBR	N068	N068	N068	LIBR	LIBR	M032	M032	T009	T009	LIBR	N068	LIBR	M032	M032	M032	M032	LIBR	T023	LIBR	T023	T023	T009	T009	

Figura 3.13: Ejemplo de asignación óptima y automática de roles de turno para despachadores de la empresa en un mes de febrero

En la figura anterior se puede ver un ejemplo de resultado del modelo para diecisiete trabajadores con el cargo de despachadores para un mes de febrero.

A continuación se muestran los resultados consolidados para cada funcionario con el cargo de despachador, indicando la cantidad de turnos trabajados, turnos libres, turnos salientes, y turnos de mañana, tarde y noche. Al final de la tabla se calcula el total de turnos y también un promedio por Head Count (por trabajador).

Function	Funcionario	Total Trabajados	Total Libres	Total TS	Total Mananas	Total Tardes	Total Noches
DESPACHADOR	Trabajador 1	9	2	0	3	2	4
DESPACHADOR	Trabajador 2	18	10	0	7	4	7
DESPACHADOR	Trabajador 3	18	10	0	8	7	3
DESPACHADOR	Trabajador 4	17	6	0	6	3	8
DESPACHADOR	Trabajador 5	13	6	0	2	8	3
DESPACHADOR	Trabajador 6	5	4	0	0	3	2
DESPACHADOR	Trabajador 7	18	10	0	13	4	1
DESPACHADOR	Trabajador 8	18	8	0	8	2	8
DESPACHADOR	Trabajador 9	2	2	0	1	1	0
DESPACHADOR	Trabajador 10	17	6	0	5	5	7
DESPACHADOR	Trabajador 11	20	8	0	11	3	6
DESPACHADOR	Trabajador 12	19	9	0	10	7	2
DESPACHADOR	Trabajador 13	20	8	0	4	7	9
DESPACHADOR	Trabajador 14	18	10	0	6	10	2
DESPACHADOR	Trabajador 15	19	9	0	6	9	4
DESPACHADOR	Trabajador 16	18	10	0	8	7	3
DESPACHADOR	Trabajador 17	20	8	0	9	7	4
Total		269	126	0	107	89	73
Total/HC		15,8	7,4	0,0	6,3	5,2	4,3

Figura 3.14: Indicadores de la asignación de turnos por funcionario para el cargo de despachador

Capítulo 4

Resultados y discusiones

4.1. Descripción general

Con el propósito de medir el impacto del modelo propuesto como solución, este capítulo muestra el análisis y los resultados de escenarios reales seleccionados. Para ello se escogen 2 casos que contrastan entre sí en demanda, número de funcionarios y tipos de cargo. Estos escenarios son independientes, por lo tanto para cada uno se comparará el resultado obtenido con el modelo propuesto versus el resultado obtenido de la construcción manual real realizada por la empresa, es por ello que no es necesario que ambos escenarios correspondan al mismo año, mes o tipos de cargo. El objetivo de simular 2 escenarios es poder medir la eficiencia y eficacia del modelo en distintos tipos de problemas.

El primer caso, correspondiente al mes de julio del año 2023, tiene por objetivo cubrir la demanda del aeropuerto de Punta Arenas en Chile (PUQ). Fue seleccionado debido a que es representativo de la problemática que se está abordando, dado que es una de las regiones con mayor nivel de operación y número de funcionarios, y por otro lado, en comparación con el segundo escenario, es más pequeño en cargos, número de funcionarios y demanda. Cabe señalar además que la empresa solicitó de forma especial estudiar y mejorar la cobertura de demanda de este aeropuerto. Por otro lado, el segundo escenario, que corresponde al mes de agosto del año 2023, tiene por objetivo cubrir la demanda del negocio de importaciones en el Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez (SCL).

Tal como se aprecia, ambos escenarios son diferentes en algunos aspectos, por lo que es posible comparar la efectividad de la solución de manera más global. A continuación, se muestra un diagrama comparativo que describe la naturaleza de los problemas:

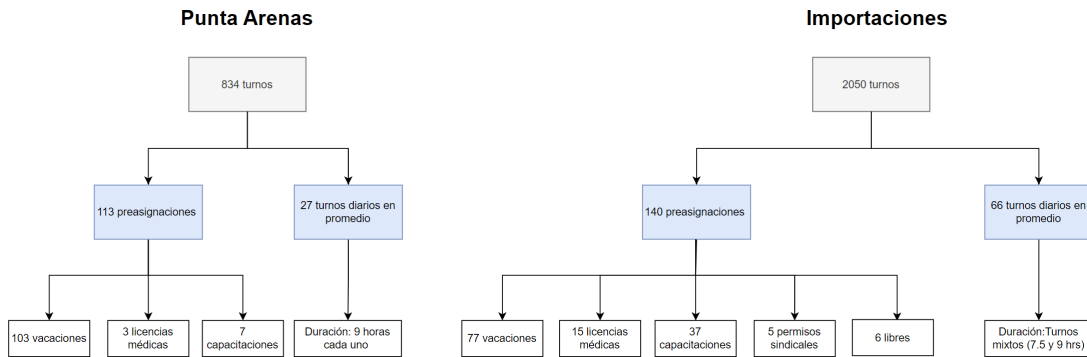


Figura 4.1: Diagrama comparativo entre dos escenarios de prueba

Como se observa en la Figura 5.1, la diferencia más notoria entre ambos escenarios es que el segundo es aproximadamente 2.5 veces más grande que el primero en cuanto a demanda de turnos y en cuanto a preasignaciones. Sin embargo, el escenario de Punta Arenas presenta un mayor número medio (0.14 vs 0.07 preasignaciones/turno respectivamente). Ambos casos difieren en la duración de los turnos, donde el escenario de Punta Arenas demanda solo turnos de 9 horas, y el escenario de Importaciones de Santiago demanda turnos mixtos, es decir, de 7.5 y 9 horas, lo que le agrega una complejidad extra al modelo al tratar de completar las 45 horas semanales de trabajo por persona.

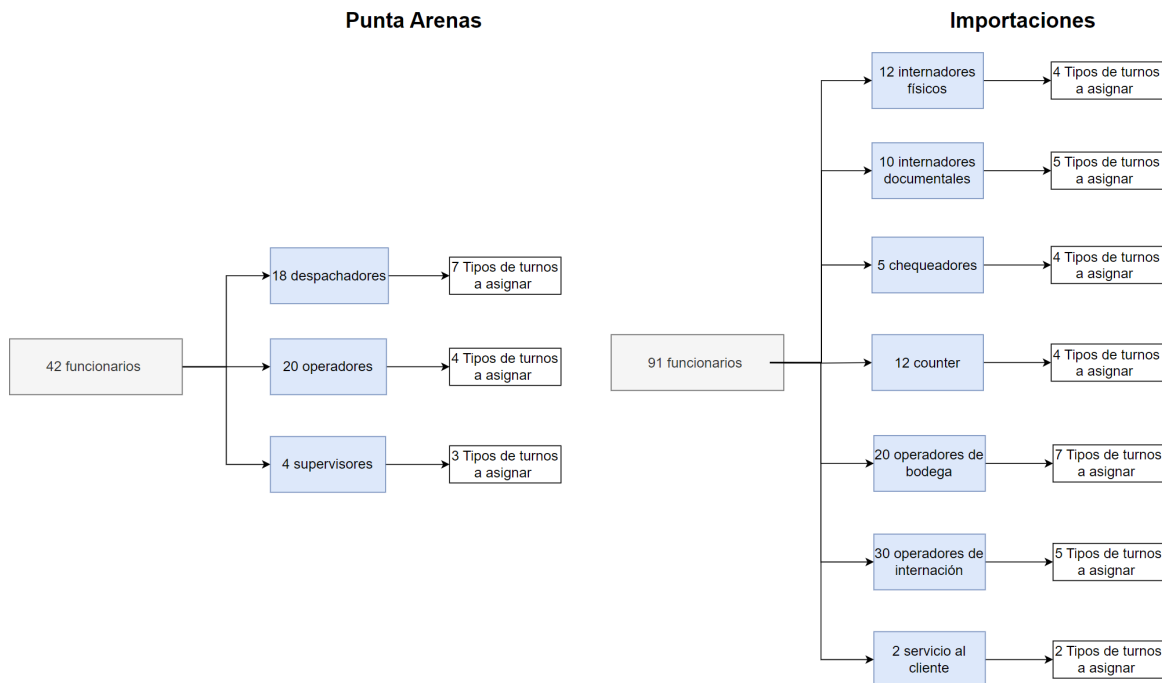


Figura 4.2: Número de funcionarios por escenario según su cargo, y la cantidad de tipos de turno a asignar

La comparación entre ambos escenarios en cuanto a la cantidad de funcionarios es relativamente proporcional a la cantidad de turnos a asignar. Tal como se aprecia en la figura 5.2, el escenario de Punta Arenas cuenta con 42 funcionarios repartidos en 3 cargos, mientras que

el escenario de Importaciones en Santiago cuenta con 92 funcionarios repartidos en 7 cargos.

El modelo fue ejecutado para ambos escenarios en un procesador *12th Gen Intel(R) Core(TM) i7-1260P 2.10 GHz*, para un tiempo de 30 minutos como límite máximo de cada uno, el que se dividió proporcionalmente por cargo según la cantidad de funcionarios. Este tiempo no fue el tiempo real utilizado, debido a que para ciertos cargos, sus asignaciones llegaron a su óptimo en menos tiempo. Así también, hay otros cargos que luego de pasado un tiempo t no siguió mejorando su GAP. Dado lo mencionado anteriormente y considerando que los escenarios son independientes, no es necesario que ambos escenarios sean ejecutados en distintos tiempos proporcionales a su tamaño o dificultad.

Antes de presentar los resultados obtenidos en la ejecución de cada caso, se definen los indicadores a utilizar para una mejor análisis de los experimentos.

- **Días libres promedio por empleado:** Corresponde a la cantidad total de días libres asignados dividido por el número de funcionarios involucrados.
- **Fracción diaria de trabajadores:** Se calcula como el promedio simple de la proporción de funcionarios que son llamados diariamente con respecto al total de funcionarios.
- **Número de turnos sin déficit de cobertura:** Es la cantidad de turnos (s,d) cubiertos totalmente, es decir, aquellos que poseen déficit $\sum_d \sum_s U_{sd}$ igual a cero.
- **Número de turnos sin déficit de cobertura %:** Se calcula como la fracción de turnos sin déficit de cobertura respecto al total de turnos con demanda no nula, es decir, $\frac{\text{Número de turnos sin déficit de cobertura}}{|S|*|D|}$, donde $Q_{sd} > 0$
- **Número de turnos con déficit de cobertura:** Se define como la cantidad de turnos (s,d) con cobertura parcial o nula, es decir, aquellos con déficit $\sum_d \sum_s U_{sd}$ mayor a cero.
- **Número de turnos con déficit de cobertura %:** Se calcula como la fracción de turnos con déficit de cobertura respecto al total de turnos con demanda no nula, es decir, $\frac{\text{Número de turnos con déficit de cobertura}}{|S|*|D|}$, donde $Q_{sd} > 0$
- **Demanda sin cubrir:** Se calcula como la demanda total no cubierta $\sum_d \sum_s U_{sd}$.
- **Número mínimo, máximo y promedio de trabajadores llamados diariamente:** Corresponde al número mínimo, máximo y promedio respectivamente de funcionarios con turnos de trabajo asignado diariamente.
- **Ocupación real de funcionarios:** Se calcula como el promedio diario de la razón entre el total de funcionarios llamados a trabajar y la cantidad programada según la demanda.

4.2. Caso 1: Turnos aeropuerto de Punta Arenas

Los resultados del primer escenario serán analizados a continuación según distintos criterios, donde se realizará una comparación entre la construcción manual de los turnos y la construcción utilizando el modelo de optimización. La tercera columna, llamada "diferencia", corresponde a la variación nominal entre los resultados obtenidos con el modelo y los resultados obtenidos con la construcción manual, donde el color azul indica una mejora y el color rojo indica una variación negativa.

Tabla 4.1: Comparación general de resultados entre asignación manual y modelo computacional, escenario Punta Arenas

Indicador	Manual	Modelo	Diferencia
I. Días libres promedio por empleado	9.50	9.19	-0.31
II. Fracción diaria de trabajadores	61.7 %	64.0 %	2.3 p.p.
III. Número de turnos sin déficit de cobertura	203	301	98
IV. Número de turnos sin déficit de cobertura %	46.8 %	69.4 %	22.6 p.p.
V. Demanda sin cubrir (suma de U_{sd})	193	60	-133
VI. Mínimo diario de trabajadores	20	21	1
VII. Máximo diario de trabajadores	31	33	2
VIII. Promedio diario de trabajadores	25	27	2
IX. Ocupación real de funcionarios	0.94	0.97	0.03

Los indicadores clave de rendimiento (KPIs) analizados en la Tabla 4.1 incluyen el promedio de días libres por empleado, el porcentaje de personal asignado diariamente, la cantidad de turnos que son totalmente cubiertos, la demanda no cubierta en términos de turnos y porcentaje, y el número mínimo, máximo y promedio de trabajadores diarios. Se seleccionaron estos criterios porque proporcionan una descripción precisa del análisis del problema, y es por esto que se ha incluido en la función objetivo. Respecto al indicador *I*, correspondiente a la proporción entre los días libres totales y el número total de empleados respectivos, se aprecia en la tabla una mejora de 0.31 turnos libres por empleado, lo que se traduce a aproximadamente 1 turno trabajado extra por cada 3 funcionarios. Esto es consistente con la función objetivo que, una vez cubierta la demanda, completa los turnos no trabajados con cualquier turno de trabajo. Respecto a esto, es importante mencionar que este criterio se implementó debido a una petición especial de la empresa. Sin embargo, en cuanto a operación y bienestar no es necesario realizar esto, sino que podría ser una oportunidad de beneficiar al personal asignarles menos turnos de trabajo ya que la cantidad de funcionarios necesaria es calculada en la etapa anterior a la asignación de turnos. Por otro lado, respecto a los indicadores *II*, *VI*, *VII* y *VIII*, se aprecia que el modelo logra mejorar el número de personas llamadas diariamente a trabajar respecto al objetivo solicitado especialmente por la empresa. Los resultados obtenidos representados por los indicadores *III* y *IV* muestran que se logró reducir el déficit de asignación en 98 turnos, que corresponde a 22.6 p.p.. Esto es un

resultado significativo en cuanto a la eficiencia del modelo propuesto, dado que la mejora en la cobertura de demanda es el criterio principal en la optimización de asignación de turnos. Junto a lo anterior, el criterio *VII* indica que hubo una mejora de cobertura de demanda de 133 jornadas. Finalmente se presenta el indicador *XI*. Si bien la demanda predeterminada corresponde a la cantidad de algunos turnos específicos, la empresa muchas veces asigna a los funcionarios otros turnos no planificados, lo que implica una cobertura parcial, por lo tanto, este indicador tiene por objetivo reflejar la cobertura de demanda lograda en la práctica, siendo mayor que lo presentado en los indicadores *III* y *IV*. Con esto en mente, se ve en la tabla que el modelo propuesto llama más personal a trabajar y los asigna de mejor manera, cumpliendo así con los objetivos propuestos.

Con el fin de analizar de mejor manera los resultados por cada cargo, se presenta a continuación la Tabla 4.2, la cual muestra tres columnas que representan la cantidad de trabajadores por cargo.

Tabla 4.2: Análisis de diferencia de dotación real y óptima por cargo, escenario de Punta Arenas

Cargo	Dotación		
	Real	Óptimo	Déficit
Despachadores	18	18	0
Operadores	20	29	9
Supervisores	4	6	2

La columna Real muestra la cantidad de funcionarios disponibles en julio. La segunda columna, Óptimo, se refiere al número mínimo de funcionarios requeridos para satisfacer toda la demanda en este escenario, lo cual puede no ser un óptimo global pues en algún escenario se podría requerir una cantidad mayor. La tercera columna, déficit, corresponde al número de trabajadores que se necesita para alcanzar la cantidad óptima. El número óptimo de empleados se determinó mediante un proceso iterativo. Para el caso de Punta Arenas, se ejecutó el modelo incrementando gradualmente el número de trabajadores en una unidad hasta que se logró satisfacer por completo la demanda requerida para cada cargo. De los tres tipos de cargo, la cantidad de despachadores coincide con el número mínimo. Teniendo en cuenta lo anterior, es posible analizar de mejor manera la Tabla 4.3 que se muestra a continuación. La primera sección muestra los resultados del cargo Despachadores, donde no hubo una gran diferencia en los días libres promedio por empleado entre la construcción manual y lo obtenido con el modelo de optimización, pero si hubo una diferencia notoria en cuanto al número de turnos sin déficit de cobertura, lo cual aumentó en 69 turnos, y 31.8 puntos porcentuales. Relacionado con esto, también hubo una mejora en cuanto a la cobertura de demanda de 83 jornadas, lo cual equivale a la cobertura mensual de 4 personas aproximadamente. Este resultado es esperado dado que no existe un déficit de funcionarios para la cobertura de de-

manda en este escenario.

Por otro lado, la segunda sección correspondiente al cargo Operadores muestra una mejora en la cantidad de días libres promedio por empleado que equivale a 8 días libres al mes. Respecto a la cantidad de turnos cubiertos totalmente, el modelo muestra una mejora respecto a la programación manual pues logró aumentarla en 26 turnos. Relacionado a esto, se logró una disminución del déficit de cobertura de demanda lo que equivale a la cobertura de un poco más de 2 personas aproximadamente. El resultado obtenido reflejó una mejora considerable, sin embargo es importante destacar que no se llegó al óptimo absoluto pues existe un déficit de 9 trabajadores para la cobertura de demanda en este escenario.

La tercera sección, correspondiente al cargo Supervisores, posee una menor cantidad de funcionarios y menor demanda a cubrir. El modelo presentó una mejora respecto a la construcción manual de los turnos en cuanto a los días libres en 0.5 días promedio por empleado. En cuanto a los turnos sin déficit de cobertura, se obtiene una mejora de 3 turnos utilizando el modelo propuesto. Relacionado a esto, se observa una mejora en la cobertura de demanda de 3 jornadas aproximadamente. Estos resultados son esperados, debido a que, como se dijo en un inicio, se cuenta con solo 4 supervisores y la demanda a cubrir es menor, por lo tanto el rango de mejora no es muy amplio. Cabe destacar además que, como hay un déficit de 2 supervisores, no es posible llegar al óptimo deseado.

Por otro lado, el indicador *IX* muestra que se logra llamar más funcionarios a trabajar respetando los requisitos legales y operacionales, y además se cubre de mejor forma la demanda programada para los cargos de despachadores y supervisores, mientras que para los operadores se igualó el número de funcionarios llamados.

Tabla 4.3: Comparación detallada de resultados por cargo, Punta Arenas

Despachadores			
KPI	Manual	Model	Mejoras
Días libres promedio por empleado	8.8	8.7	-0.1
Fracción diaria de trabajadores	57.5 %	60.9 %	3.4 p.p.
Número de turnos sin déficit de cobertura	94	163	69
Número de turnos sin déficit de cobertura %	43.3 %	75.1 %	31.8 p.p.
Demanda sin cubrir (suma de Usd)	83	0	-83
Mínimo diario de trabajadores	7	9	2
Máximo diario de trabajadores	13	14	1
Promedio diario de trabajadores	10	11	1
Ocupación real de funcionarios	0.98	1.03	0.05
Operadores			
KPI	Manual	Model	Mejoras
Días libres promedio por empleado	10.4	10.0	-0.4
Fracción diaria de trabajadores	66.1 %	67.7 %	1.6 p.p.
Número de turnos sin déficit de cobertura	46	72	26
Número de turnos sin déficit de cobertura %	37.1 %	58.1 %	21.0 p.p.
Demanda sin cubrir (suma de Usd)	80	33	-47
Mínimo diario de trabajadores	11	10	-1
Máximo diario de trabajadores	16	20	4
Promedio diario de trabajadores	13	14	1
Ocupación real de funcionarios	1.01	1.01	0
Supervisores			
KPI	Manual	Model	Mejoras
Días libres promedio por empleado	8.0	7.5	-0.5
Fracción diaria de trabajadores	58.1 %	59.7 %	1.6 p.p.
Número de turnos sin déficit de cobertura	63	66	3
Número de turnos sin déficit de cobertura %	67.7 %	71.0 %	3.3 p.p.
Demanda sin cubrir (suma de Usd)	30	27	-3
Mínimo diario de trabajadores	2	2	0
Máximo diario de trabajadores	4	4	0
Promedio diario de trabajadores	2	2	0
Ocupación real de funcionarios	0.69	0.71	0.02

Dados los resultados obtenidos, a nivel global se evidencia que el modelo propuesto ha logrado mejoras significativas en varios criterios respecto a la asignación manual realizado por la empresa, como el porcentaje de personal asignado diariamente, el cumplimiento exacto de la demanda y la reducción de la demanda no cubierta.

4.3. Caso 2: Turnos aeropuerto de Santiago

A continuación se mostrarán los resultados del segundo escenario, correspondientes al aeropuerto de Santiago de Chile. Estos serán analizados según distintos criterios, tal como el caso anterior, donde se realizará una comparación entre la construcción manual de los turnos y la construcción utilizando el modelo de optimización. La siguiente tabla muestra los resultados consolidados.

Tabla 4.4: Comparación general de resultados entre asignación manual y modelo computacional, escenario Santiago

Indicador	Manual	Modelo	Diferencia
I. Días libres promedio por empleado	6.69	5.90	-0.79
II. Fracción diaria de trabajadores	71.4 %	74.6 %	3.2 p.p.
III. Número de turnos sin déficit de cobertura	527	705	178
IV. Número de turnos sin déficit de cobertura %	67.8 %	90.7 %	22.9 p.p.
V. Demanda sin cubrir (suma de U_{sd})	343	72	-271
VI. Mínimo diario de trabajadores	43	44	1
VII. Máximo diario de trabajadores	76	86	10
VIII. Promedio diario de trabajadores	65	68	3
IX Ocupación real de funcionarios	0.99	1.03	0.04

Al igual que en el primer caso, los indicadores analizados en la Tabla 4.4 incluyen el promedio de días libres por empleado, el porcentaje de personal asignado diariamente, la cantidad de turnos que son totalmente cubiertos, la demanda no cubierta en términos de turnos y porcentaje, y el número mínimo, máximo y promedio de trabajadores diarios.

El indicador I muestra una disminución en cuanto a los días libres asignados por empleado, lo que corresponde a 73 días totales trabajados extra. Esto es significativo para la empresa pues es parte del objetivo planteado como petición especial. Respecto a los indicadores II, VI, VII y VIII se ve de los resultados que aumenta la ocupación de empleados diariamente, es decir, el número de funcionarios llamados a trabajar. Por otro lado, los resultados obtenidos representados por los indicadores III y IV revelan una reducción en el déficit de asignación en 178 turnos, que corresponde a 19. p.p., lo cual es beneficioso para la empresa dado que el principal problema a resolver es mejorar la cobertura de demanda. Relacionado a lo anterior, el criterio V muestra una disminución del déficit de cobertura de demanda en cuanto a cantidad de jornadas, lo que corresponde a 271.

Es importante señalar que en ambos escenarios los resultados presentados muestran mejoras significativas debido a que la empresa intenta satisfacer la demanda con distintos esfuerzos manuales, tales como incluir otros tipos de turnos no planificados, asignar turnos libres injustificados con el fin de cubrir un día posterior, entre otros, lo que implica que la construcción

manual difiera de la planificación. Sin embargo, a pesar del déficit de dotación de funcionarios y de la complejidad de asignación de turnos mixtos en cuanto a duración, el modelo propuesto logra satisfacer de mejor manera la demanda programada, respetando los tipos de turnos predefinidos y a la vez logra llamar a más gente a trabajar diariamente, tal como lo muestra el indicador *IX*.

Con el fin de analizar de mejor manera los resultados por cada cargo, se presenta a continuación la Tabla 4.5, la cual muestra tres columnas que representan la cantidad de trabajadores.

Tabla 4.5: Análisis de diferencia de dotación real y óptima por cargo, escenario de Santiago

Cargo	Dotación		
	Real	Óptimo	Déficit
Operadores Internación	30	30	0
Internadores Físicos	12	13	1
Internadores Documentales	10	11	1
Operadores Bodega	20	25	5
Servicio al Cliente	2	2	0
Chequeadores	5	9	4
Counter	12	15	2

A continuación, las tablas 4.6, 4.7 y 4.8 muestran los resultados del segundo escenario de forma desagregada en seis sub tablas, una por cada tipo de cargo. De antemano, cabe señalar que este escenario, a diferencia del anterior, asigna turnos mixtos en cuanto a duración, lo que se traduce en que se demandan turnos de 7.5 y de 9 horas. Esto es una dificultad extra para el modelo propuesto respecto a las horas trabajadas semanales por funcionario, donde no se puede superar las 45 horas en 7 días movibles, pero se intenta maximizar este indicador. Es por ello que, a nivel teórico, lo mejor sería asignar 5 turnos de 9 horas, o 6 turnos de 7.5 horas, pues cualquier otro caso implicaría asignar turnos libres extra.

Las mayores diferencias se observan en el criterio de cobertura, donde para todos los cargos el modelo mejora respecto a la construcción manual entre 15.3 y 59.3 p.p. Esto se debe a dos principales motivos: primero, el modelo asigna de mejor manera los turnos; y segundo, la empresa, con el fin de intentar satisfacer la demanda, asigna turnos que no están programados según la planificación, por lo que el número de turnos con déficit de cobertura es mayor, y así, la diferencia es mayor. Por otro lado, también se aprecia en todos los cargos una mejora en cuanto a los días libres asignados por empleado, reduciendo entre 0.5 y 1.6 libres. Es notorio que, entre los resultados entregados por el modelo, para cada cargo coinciden los indicadores de demanda sin cubrir y el número de turnos con déficit de cobertura, lo cual se debe a que cada turno programado resultó con déficit de a lo más 1 funcionario. En cuanto a las

diferencias negativas entre ambas asignaciones, la asignación manual solo supera en eficacia el número máximo de trabajadores llamados diariamente en dos cargos, operadores de internación e internadores documentales, lo que se puede explicar por la prioridad de asignación que tiene el modelo propuesto, donde primero se debe cubrir la demanda y luego llamar a la máxima cantidad de funcionarios a trabajar.

Finalmente, tal como se ve en las sub tablas, los cargos de operador de bodega, servicio al cliente y counter presentan resultados que se diferencian de los demás, como por ejemplo en los criterios días libres promedio por empleado y cobertura de demanda. Lo anterior se debe a que se construyen a partir de turnos mixtos en duración, o netamente de 9 horas. El modelo propuesto demuestra poder trabajar de mejor forma con este desafío, asignando de forma más eficiente los turnos. Ejemplo de lo anterior es la asignación de turnos de un solo tipo al mismo funcionario en semanas completas, minimizando así los turnos libres, lo cual no ocurre en la construcción manual en su totalidad.

Tabla 4.6: Comparación detallada de resultados por cargo, Santiago (1)

Operadores de internación

KPI	Manual	Model	Mejoras
Días libres promedio por empleado	6.4	5.8	-0.6
Fracción diaria de trabajadores	71.0 %	73.1 %	2.1 p.p.
Número de turnos sin déficit de cobertura	115	155	40
Número de turnos sin déficit de cobertura %	74.2 %	100.0 %	25.8 p.p.
Demanda sin cubrir (suma de Usd)	47	0	-47
Mínimo diario de trabajadores	18	20	2
Máximo diario de trabajadores	30	28	-2
Promedio diario de trabajadores	21	22	1
Ocupación real de funcionarios	1.05	1.09	0.04

Internadores físicos

KPI	Manual	Model	Mejoras
Días libres promedio por empleado	6.4	5.7	-0.7
Fracción diaria de trabajadores	71.8 %	75.3 %	3.5 p.p.
Número de turnos sin déficit de cobertura	101	120	19
Número de turnos sin déficit de cobertura %	81.5 %	96.8 %	15.3 p.p.
Demanda sin cubrir (suma de Usd)	23	4	-19
Mínimo diario de trabajadores	7	8	1
Máximo diario de trabajadores	12	12	0
Promedio diario de trabajadores	9	9	0
Ocupación real de funcionarios	0.96	1.00	0.04

Internadores documentales

KPI	Manual	Model	Mejoras
Días libres promedio por empleado	6.1	5.6	-0.5
Fracción diaria de trabajadores	69.0 %	72.6 %	3.6 p.p.
Número de turnos sin déficit de cobertura	124	152	28
Número de turnos sin déficit de cobertura %	80.0 %	98.1 %	18.1 p.p.
Demanda sin cubrir (suma de Usd)	31	3	-28
Mínimo diario de trabajadores	6	6	0
Máximo diario de trabajadores	10	9	-1
Promedio diario de trabajadores	7	7	0
Ocupación real de funcionarios	0.96	1.02	0.06

Tabla 4.7: Comparación detallada de resultados por cargo, Santiago (2)

Operadores de bodega

KPI	Manual	Model	Mejoras
Días libres promedio por empleado	6.4	5.4	-1.0
Fracción diaria de trabajadores	72.7 %	76.8 %	4.1 p.p.
Número de turnos sin déficit de cobertura	112	148	36
Número de turnos sin déficit de cobertura %	65.9 %	87.1 %	21.2 p.p.
Demanda sin cubrir (suma de Usd)	109	22	-87
Mínimo diario de trabajadores	6	7	1
Máximo diario de trabajadores	20	20	0
Promedio diario de trabajadores	15	15	0
Ocupación real de funcionarios	0.95	1.01	0.06

Servicio al cliente

KPI	Manual	Model	Mejoras
Días libres promedio por empleado	8.5	8.0	-0.5
Fracción diaria de trabajadores	72.6 %	74.2 %	1.6 p.p.
Número de turnos sin déficit de cobertura	11	27	16
Número de turnos sin déficit de cobertura %	40.7 %	100.0 %	59.3 p.p.
Demanda sin cubrir (suma de Usd)	17	0	-17
Mínimo diario de trabajadores	0	0	0
Máximo diario de trabajadores	2	2	0
Promedio diario de trabajadores	1	1	0
Ocupación real de funcionarios	0.96	1.00	0.04

Chequeadores

KPI	Manual	Model	Mejoras
Días libres promedio por empleado	7.2	5.6	-1.6
Fracción diaria de trabajadores	74.8 %	80.0 %	5.2 p.p.
Número de turnos sin déficit de cobertura	45	50	28
Número de turnos sin déficit de cobertura %	61.6 %	68.5 %	18.1 p.p.
Demanda sin cubrir (suma de Usd)	36	23	-28
Mínimo diario de trabajadores	0	1	1
Máximo diario de trabajadores	5	5	0
Promedio diario de trabajadores	4	4	0
Ocupación real de funcionarios	0.95	0.98	0.03

Tabla 4.8: Comparación detallada de resultados por cargo, Santiago (3)

Counter

KPI	Manual	Model	Mejoras
Días libres promedio por empleado	8.3	7.3	-1.0
Fracción diaria de trabajadores	69.9 %	73.4 %	3.5 p.p.
Número de turnos sin déficit de cobertura	19	53	34
Número de turnos sin déficit de cobertura %	26.0 %	72.6 %	46.6 p.p.
Demanda sin cubrir (suma de Usd)	80	20	-60
Mínimo diario de trabajadores	0	0	0
Máximo diario de trabajadores	12	12	0
Promedio diario de trabajadores	8	9	1
Ocupación real de funcionarios	0.95	0.98	0.03

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

La asignación de turnos es una de las tareas más complejas en las operaciones de una industria, y más aún en una tan volátil como lo es la del transporte aéreo, sujeta a cambios inesperados en cuanto a la dotación de funcionarios y la llegada de vuelos. En el caso del grupo Latam Airlines S.A., el desempeño de la operación se ha visto comprometido frente a la demanda semi estocástica y, sobre todo, frente al déficit de dotación de funcionarios para poder satisfacerla de forma eficiente.

Con el fin de poder anticiparse estratégicamente a estos desafíos, es necesario para la empresa contar con una herramienta tecnológica que optimice de forma automática y eficiente la asignación de los roles de turno. Con este objetivo, se modeló un problema de programación lineal entero mixto con los principales parámetros entregados por la empresa, y las restricciones legales, operacionales, y de bienestar.

Se realizaron dos experimentos con el fin de medir la eficiencia del modelo propuesto: un escenario para el negocio de importaciones de FAST AIR, para el Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez, correspondiente al mes de agosto; y un escenario de prueba para el negocio doméstico en el aeropuerto de Punta Arenas, correspondiente al mes de julio, el cual se simuló a modo de comparación para evaluar hasta qué punto el modelo tiene un buen desempeño. Los resultados obtenidos muestran que el modelo es más eficiente que la construcción manual en ambos casos, y además logra respetar los turnos que demanda la planificación previa mensual. La forma de resolución implementada, basada en la división del problema maestro en sub problemas por cargo, logró disminuir el tiempo de ejecución y llegar de forma eficiente al óptimo en todos los escenarios (GAP nulo) a pesar del déficit de dotación de funcionarios. La cobertura de demanda mejoró en promedio más de 20 puntos porcentuales y los días libres por empleado se disminuyeron en 0.5 días en promedio aproximadamente.

En conclusión, la solución propuesta mostró mejoras en cuanto a cobertura de demanda, tiempo de creación del rol de turnos, cumplimiento de las legalidades y reglas operacionales

y disminución implícita de costos.

A modo de recomendación, se propone como trabajo futuro desarrollar un modelo de rostering más flexible, que sea capaz de decidir qué turnos utilizar en la asignación y cuáles no, es decir, integrar la planificación de turnos dentro del modelo dada una demanda diaria de trabajo.

Bibliografía

Almacenes de Carga. FastAir. www.almacenesfastair.com, (accessed: 2022-12-01).

Costa, G. et al. (2004). Horarios de trabajo flexibles, salud y bienestar en Europa: algunas consideraciones de un proyecto SALTSA. *Cronobiología Internacional*, 21(6), 831-844.

Belien, J. et al. (2012). Integrated staffing and scheduling for an aircraft line maintenance problem. *Computers & Operations Research*, 40, 1023-1033.

Cavada, J., Cortés, C., Henríquez, G., & Rey, P. (2023). A ground crew shift rostering model for Santiago International Airport. *Operational Research*, Springer, vol. 23(1), pages 1-26.

Côté, M., Gendron, B. & Rousseau, L. (2013). Grammar-Based Column Generation for Personalized Multi-Activity Shift Scheduling. *Inform Journal on Computing*, 25(3).

Dowling, D., Krishnamoorthy, M., Mackenzie, H., & Sier, D. (1997). Staff rostering at a large international airport. *Annals of Operations Research*, 72, 125-147.

Gözde, Alp., & Alkaya, A. (2019). Improving the Quality of Personnel Scheduling by Incorporating Fairness. *International Journal of Modeling and Optimization*, vol. 9, no. 2.

Gross, C., Fugener, A., & Brunner, J. (2018). Online rescheduling of physicians in hospitals. *Flex Serv Manuf J*, 30, 296–328.

Lapègue, T., Bellenguez-Morineau, O., & Prot, D. (2013). A constraint-based approach for the shift design personnel task scheduling problem with equity. *Computers & Operations Research*, 40, 2450-2465.

LATAM Airlines. LATAM GROUP. www.latamairlines.com/cl/es/sobre-latam, (accessed: 2022-11-15).

Liu, Y., & Wang, L. (2019). Improving efficiency and satisfaction in airport ground handling: The impact of shift work schedules. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 49(6), 534-554.

Subsecretaría de Transportes. (2006) Tráfico Aéreo. <https://www.subtrans.gob.cl/estadisticas/trafico-aereo.html>, (accessed: 2022-11-15).

Czeisler, C., Weitzman E., Moore-Ede M., Zimmerman J., & Knauer R. (1980). Human sleep: its duration and organization depend on its circadian phase. *Science*. 12;210(4475):1264-7.

Zulley J., Wever R., & Aschoff J. (1981). The dependence of onset and duration of sleep on the circadian rhythm of rectal temperature. *Pflugers Arch*, 391(4):314-8.