



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

**DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN
MODELO DE SIMULACIÓN DISCRETA
Y UNA HEURÍSTICA DE OPTIMIZACIÓN
PARA MEJORAR LA ROBUSTEZ DE
ITINERARIOS DE TRANSPORTE AÉREO**

RODOLFO ALEJANDRO CUEVAS CORTÉS

Tesis para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
PEDRO GAZMURI SCHLEYER

Santiago de Chile, diciembre, 2011

© 2011, Rodolfo Alejandro Cuevas Cortés



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

**DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN
MODELO DE SIMULACIÓN DISCRETA Y UNA
HEURÍSTICA DE OPTIMIZACIÓN PARA
MEJORAR LA ROBUSTEZ DE ITINERARIOS DE
TRANSPORTE AÉREO**

RODOLFO ALEJANDRO CUEVAS CORTÉS

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

PEDRO GAZMURI SCHLEYER

JUAN CARLOS HERRERA MALDONADO

PABLO ZEGERS FERNÁNDEZ

SERGIO ENRIQUE GUTIÉRREZ CID

Para completar las exigencias del grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, diciembre, 2011

A mi esposa, por su continuo apoyo y comprensión.

AGRADECIMIENTOS

Mi sincera gratitud a mi profesor supervisor Pedro Gazmuri por sus consejos, motivación y disposición constante a colaborar. También por las oportunidades de presentar este proyecto ante valiosas audiencias.

Agradezco también a los profesores Juan Carlos Herrera, Pablo Zegers y Sergio Gutiérrez por sus valiosos consejos y comentarios, que han hecho más completo este documento.

Agradezco también a Miguel Ángel Martínez y Gustavo Rodríguez, ingenieros UC, quienes el año 2008 tomaron la iniciativa de impulsar el desarrollo de un simulador de itinerarios para LAN Airlines, el cual hoy es un software utilizado ampliamente por la compañía. Al respecto, agradezco a los ejecutivos de LAN Pablo Araneda y Miguel Abarca por su gestión en el proyecto.

Por último, agradezco a mi familia por su continuo apoyo, consejos y oraciones. En especial a mi esposa Andrea Reyes por estar a mi lado durante todo el proceso de esta investigación, y por colaborar con la revisión de este documento.

INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE TABLAS	vi
INDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT	ix
GLOSARIO.....	x
1. Introducción.....	1
1.1. Planificación de Itinerarios de Transporte Aéreo.....	2
1.2. Control de Operaciones.....	3
1.3. Planificación Robusta.....	6
1.4. Contribución del trabajo.....	8
1.5. Esquema de la tesis	8
2. Revisión Bibliográfica	10
3. Modelo de Simulación de Itinerarios.....	18
3.1. Descripción del sistema.....	19
3.1.1. Procesos de un vuelo	19
3.1.2. Tiempos de un vuelo	20
3.1.3. Aviones	24
3.1.4. Conexiones.....	25
3.1.5. Control de operaciones.....	27
3.2. Bases del modelo.....	31
3.2.1. Límites	31
3.2.2. Componentes y variables de estado	33
3.2.3. Eventos.....	35
3.3. Modelación de interrupciones.....	38

3.3.1. Atrasos independientes.....	39
3.3.2. Atrasos reaccionarios	43
3.4. Modelación de planes de contingencia.....	45
3.4.1. Rotación	47
3.4.2. Uso de avión de reserva	50
3.4.3. Uso de tripulación de reserva.....	51
3.5. Medidas de desempeño	52
3.5.1. Puntualidad.....	52
3.5.2. Minutos de atraso	54
3.5.3. Estadísticas de algoritmo de recuperación	54
3.6. Validación	55
3.6.1. Metodología	55
3.6.2. Resultados	58
4. Heurística de optimización para reprogramación de vuelos	67
4.1. Formulación general del problema.....	68
4.2. Heurística	73
4.2.1. Estructura general.....	74
4.2.2. Estrategia de selección de vuelos	76
4.2.3. Optimización local por vuelo	79
4.3. Resultados	82
4.3.1. Sensibilidad respecto al número de iteraciones	85
4.3.2. Sensibilidad respecto al límite de variación por vuelo.....	89
4.4. Comparación de resultados	90
5. Conclusiones	97
BIBLIOGRAFIA.....	100

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1-1: Desempeño operacional de los vuelos de las 20 mayores aerolíneas de EE.UU	5
Tabla 2-1: Principales Investigaciones de Planificación Robusta de Itinerarios de Transporte Aéreo.....	17
Tabla 3-1: Factores explicativos y distribución asociados a cada variable aleatoria	42
Tabla 3-2: Ejemplo matriz de tiempo de espera de pasajeros en conexión (hrs)	45
Tabla 3-3: Descripción de instancias utilizadas en la validación de MSI.....	56
Tabla 3-4: Parámetros utilizados en la validación de MSI.....	57
Tabla 3-5: Matriz de tiempo de espera de pasajeros para validación de MSI (hrs)	57
Tabla 3-6: Calibración de variables aleatorias	58
Tabla 3-7: Resultados validación puntualidad total	59
Tabla 3-8: Resultados validación puntualidad por aeropuertos	61
Tabla 3-9: Explicación de la impuntualidad de instancia #1	62
Tabla 3-10: Explicación de la impuntualidad de instancia #2	62
Tabla 3-11: Explicación de la impuntualidad de instancia #3	63
Tabla 3-12: Estadísticos de rotaciones por escenario.....	64
Tabla 3-13: Comparación de la puntualidad con y sin algoritmo de recuperación.....	65
Tabla 3-14: Efecto de algoritmo de recuperación en total de minutos de atraso	65
Tabla 4-1: Mejora de solución óptima respecto a minutos totales de atraso	83
Tabla 4-2: Mejora de solución óptima respecto a puntualidad	83
Tabla 4-3: Mejora de solución óptima respecto a planes de contingencia simulados	84
Tabla 4-4: Resultados obtenidos por Chiraphadhanakul & Eggenberg (2009)	92
Tabla 4-5: Resultados obtenidos por Chiraphadhanakul (2010).....	94
Tabla 4-6: Resultados de heurística a itinerario marzo 2009 sin considerar planes de contingencia	95

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1-1: Principales procesos de una aerolínea	1
Figura 1-2: Trade-off entre costos de planificación y operación en función de la holgura ..	7
Figura 3-1: Procesos principales de un vuelo.....	19
Figura 3-2: Tiempos de programación y operación de un vuelo con atraso reaccionario ..	20
Figura 3-3: Tiempos de programación y operación de un vuelo con holgura resultante	21
Figura 3-4: Ejemplo de itinerario programado a un avión	25
Figura 3-5: Conexión de tripulantes con cambio de avión.....	26
Figura 3-6: Modelación de una conexión.....	27
Figura 3-7: Funciones principales en un Centro de Control Operacional (CCO).....	28
Figura 3-8: Ejemplo de rotación de vuelos entre dos aviones.....	30
Figura 3-9: Modelación de un itinerario centrado en el vuelo en operación.....	34
Figura 3-10: Diagrama de flujo de eventos de un vuelo	37
Figura 3-11: Algoritmo de recuperación	46
Figura 3-12: Variación histórica de la puntualidad mensual entre los años 2005 y 2008...	60
Figura 4-1: Diagrama de flujo de la heurística.....	76
Figura 4-2: Ejemplo de optimización secuencial para el itinerario diario de un avión.....	78
Figura 4-3: Frecuencias relativas de la cantidad de vuelos por nivel de variación.....	85
Figura 4-4: Evolutivo de la reducción de minutos de atraso por cada iteración	86
Figura 4-5: Evolutivo de la reducción de minutos de atraso de la primera instancia	88
Figura 4-6: Evolutivo de la reducción de minutos de atraso de la segunda instancia.....	88
Figura 4-7: Evolutivo de la reducción de minutos de atraso de la tercera instancia	88
Figura 4-8: Sensibilidad de reducción del atraso respecto a límite de variación	89
Figura 4-9: Sensibilidad de ganancia de puntualidad respecto a límite de variación	90

RESUMEN

Las aerolíneas planifican sus itinerarios con el objetivo de maximizar sus beneficios. Para esto se considera utilizar al máximo el tiempo disponible de sus aviones, teniendo en cuenta eventuales interrupciones que afectan la operación. El punto de equilibrio entre beneficios de explotación y costos de operación se logra localizando eficientemente tiempos de holgura entre los vuelos programados, de manera de minimizar el impacto de los atrasos propagados.

La planificación de itinerarios ha evolucionado desde un enfoque determinístico, que asumía que cada vuelo operaría sin interrupciones, a uno estocástico, que añade la posibilidad de interrupciones. Este último enfoque es conocido en la literatura como *Planificación Robusta de Itinerarios*.

En este trabajo se propone una heurística basada en simulación para la planificación robusta de itinerarios de transporte aéreo. La heurística propone variaciones marginales en el tiempo de despegue de los vuelos que componen el itinerario, con el objetivo de minimizar el atraso propagado. Esta acción conlleva a una localización de holguras consecuente con el atraso esperado por vuelo. La aplicabilidad de los cambios propuestos por la heurística tiene su sustento en el modelo de simulación propuesto en este trabajo, que considera conexiones de pasajeros y tripulantes, y que aplica planes de contingencia para la recuperación del itinerario.

Utilizando datos de *LAN Airlines* se evaluó la calidad de la metodología propuesta respecto a aumento de puntualidad y reducción de minutos de atraso. Se muestra que variaciones marginales en los tiempos de despegue de un subconjunto del total de vuelos pueden mejorar el desempeño operacional de todo el itinerario. Por último, se demuestra que la consideración de planes de contingencia es fundamental para una correcta evaluación de las soluciones, pues su aplicación es de alto impacto en el desempeño operacional resultante.

Palabras clave: *Planificación robusta, simulación de itinerarios, reprogramación de vuelos, localización de holguras, planes de contingencia, algoritmo de recuperación.*

ABSTRACT

Airlines plan their schedules in order to maximize their profits. For this, they consider to use the maximum time available of their aircraft, taking into account any disruptions that affect the operation.

The schedule planning has evolved from a deterministic approach, which assumed that the balance between operating profit and costs is achieved by efficiently locating slack time between flights scheduled, so to minimize the impact of reactionary delays each flight would operate without disruption, toward a stochastic approach, which adds the possibility of disruption. This latter approach is known in the literature as *Robust Airline Schedule Planning*.

In this work is proposed a simulation-based heuristic for robust airline schedule planning. The heuristic proposes marginal variations in departure time of the flights that make up the schedule, in order to minimize reactionary delays. This action leads to a consistent slack allocation to each flight's delay expected value. The applicability of changes proposed by the heuristic has its basis in the simulation model proposed in this work, which considers connections for passengers and crews, and applying contingency plans for schedule recovery.

The quality of the proposed methodology was evaluated using data from *LAN Airlines*, respect to improvement in punctuality and delay minutes reduction. It shows that minor variations in the departure time of a subset of the total flights can improve the operational performance of the whole schedule. Finally, it shows that inclusion of contingency plans is essential for a proper assessment of the solutions, because its application has a high impact on the resulting operational performance.

Keywords: *robust planning, schedule simulation, flight rescheduling, slack relocation, disruption management, recovery algorithm.*

GLOSARIO

1. **CCO**: Centro de control operacional.
2. **Check in**: procedimiento en el que un pasajero reporta su llegada al aeropuerto.
3. **Disrupción**: evento que impide operar como fue planificado.
4. **HBT**: Hour Block Time: es el tiempo de vuelo del avión, desde que sacan los calzos en origen (topes de rueda para inmovilizar el avión), hasta que vuelven a poner los calzos en destino.
5. **HORV**: Heurística de Optimización para Reprogramación de Vuelos. Nombre dado a la heurística presentada en este trabajo.
6. **MSI**: Modelo de Simulación de Itinerarios. Nombre dado al modelo de simulación presentado en este trabajo.
7. **OTP**: On Time Performance. Métrica usada para medir la puntualidad de salida de un itinerario, relativizada a un nivel aceptable de minutos de atraso.
8. **PRI**: Planificación Robusta de Itinerarios.
9. **RRH**: Relocalización Robusta de Holguras.
10. **Réplica**: repetición del proceso de simulación sobre un mismo escenario, pero con distinta secuencia de aleatoriedad.
11. **Semilla**: número entero que determina una secuencia de números aleatorios.
12. **T/A**: Turn Around: período de tiempo en que un avión permanece en tierra entre dos vuelos consecutivos. Comienza con la postura de los calzos y termina con el retiro de estos para comenzar un nuevo vuelo.

1. INTRODUCCIÓN

La industria aérea ha sido uno de los principales factores de impulso del desarrollo y globalización del mundo actual. Su alta velocidad y alcance ha permitido conectar prácticamente todas las ciudades del mundo. De acuerdo a ACI¹ el año 2010 se transportaron más de 5 billones de pasajeros a nivel mundial, y para el año 2030 se esperan más de 11 billones de pasajeros.

A pesar de los altos y crecientes volúmenes de venta, las aerolíneas obtienen bajos márgenes de utilidad debido a su alto costo fijo, creciente precio del petróleo y a la volatilidad de la demanda, la cual es muy sensible a ciclos económicos. Esto ha provocado fusiones entre aerolíneas para reducir costos, aumentar la competitividad y afrontar mejor la creciente competencia y guerra de precios. Un caso emblemático ha sido la fusión entre *Continental Airlines* y *United Airlines* anunciada el año 2010, que ha creado la mayor aerolínea del mundo, con más de 370 destinos en 59 países.

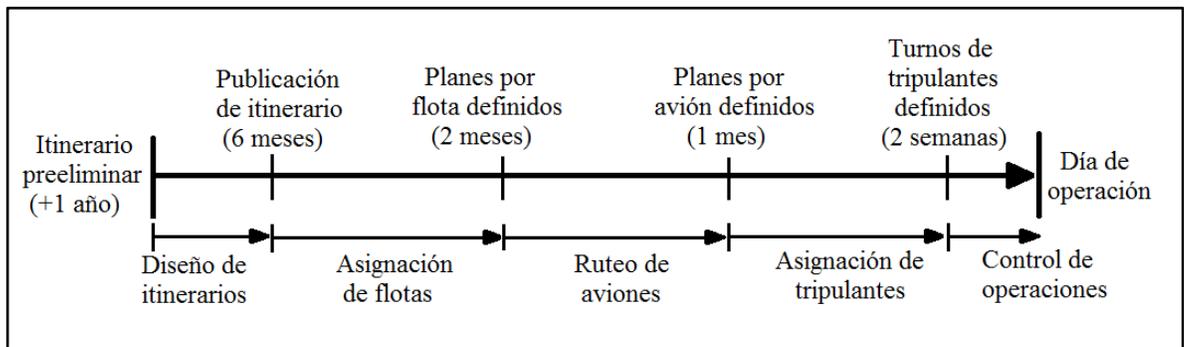


Figura 1-1: Principales procesos de una aerolínea

La investigación de operaciones ha sido una aliada esencial para las aerolíneas en sus esfuerzos por maximizar sus utilidades. La Figura 1-1 muestra los principales procesos que efectúa una aerolínea hasta el día de operación. Estas pueden dividirse en dos grandes etapas: *Planificación de Itinerarios* y *Control de Operaciones*. Un itinerario se

¹ ACI: Airports Council International

compone de vuelos programados entre un conjunto de aviones, tripulantes y pasajeros. Un vuelo se define en función de un aeropuerto de origen y destino, con un horario programado de despegue y de llegada.

1.1. Planificación de Itinerarios de Transporte Aéreo

Antes de la operación, se efectúa un complejo proceso de planificación de los principales recursos de una aerolínea: aviones y tripulantes. Tal proceso puede dividirse en 4 etapas secuenciales:

1. Diseño de itinerarios: en esta etapa se define la oferta de vuelos para cada mercado (pares origen-destino), en términos de frecuencia y tiempo de despegue. La oferta depende de factores como tamaño y composición de flotas, competencia y demanda en cada mercado, localización de bases de mantenimiento, y tripulaciones. También influye el plan estratégico de la compañía, por ejemplo, expandirse a nivel internacional o consolidarse a nivel local. Esta etapa finaliza con la publicación comercial de los itinerarios, unos 6 meses antes de la operación.

2. Asignación de flotas: en esta etapa se decide qué tipo de avión asignar a cada vuelo, haciendo calzar la demanda de cada vuelo con la capacidad de cada flota. Hay dos costos relevantes: el de operar el vuelo con cierta flota; y, dadas las diferencias de capacidad de cada flota, la eventual pérdida por asientos vacíos.

3. Ruteo de aviones: en esta etapa se construye el itinerario diario para cada avión, considerando la necesidad de mantenimiento, que por ley deben aplicarse a cada avión después de ciertas horas de vuelo.

4. Asignación de tripulantes: en esta etapa se asigna una secuencia de vuelos a un equipo de tripulantes, respetando restricciones laborales específicas, como máximo de horas de servicio diarias y por semana, vacaciones, etc.

Cada una de estas etapas es resuelta de manera independiente, generalmente con técnicas de optimización. Se han hecho algunos esfuerzos por integrar conjuntos

de dos etapas, pero con fuertes supuestos que afectan la calidad de las soluciones. Cada etapa representa un gran desafío en sí misma, ya que los problemas reales son de gran tamaño y de alta complejidad computacional.

1.2. Control de Operaciones

A pesar del gran esfuerzo hecho en la planificación, la mayoría de las veces no se cumplen los itinerarios planificados, debido a que las aerolíneas operan en un entorno propenso a interrupciones². Frente a cada interrupción, la aerolínea debe reaccionar con un plan de contingencia, los cuales involucran acciones sobre aviones, tripulantes y/o pasajeros. *Disruption Management* es un área de la investigación operativa dedicada al estudio de los planes de contingencia. Clausen et al. (2010) presentan una completa síntesis del estado del arte sobre este tema, categorizando los esfuerzos en *Gestión Reactiva y Planificación Robusta de Itinerarios* (PRI en lo posterior). La primera trata toda la investigación de operaciones al servicio de generar planes de contingencia óptimos. La segunda, en cambio, trata de metodologías proactivas que hacen los itinerarios más resistentes ante posibles interrupciones.

Son cientos las posibles causas de atraso que pueden afectar a cada vuelo. Las principales se deben a la indisponibilidad de aviones y tripulantes; a eventos meteorológicos críticos; a congestión aeroportuaria en las pistas y sistemas de *check-in*; y al retraso de procesos de *Turn Around*³ (T/A) del avión como desembarque, aseo, movimientos de equipaje, carga de gasolina, acomodación de pasajeros a bordo, etc.

Es posible categorizar estos atrasos en dos tipos:

² Término técnico usado para referirse a todos los eventos que provocan atrasos en un vuelo.

³ Turn around: término técnico referido a tiempo que permanece un avión en un determinado aeropuerto entre dos vuelos consecutivos.

1. Atrasos independientes: todos aquellos provocados por factores externos y/o procesos internos de la aerolínea, que no dependen de las conexiones de aviones, tripulantes y pasajeros.
2. Atrasos reaccionarios: atrasos provocados por la propagación de un atraso independiente, debido a la conexión de aviones, tripulantes y pasajeros.

El desempeño operacional de un itinerario es medido a través de la puntualidad de salida de sus vuelos. La métrica global usada para medir la puntualidad es llamada *On Time Performance* (OTP), la que es relativizada a un nivel aceptable de minutos de atraso. La más común es OTP15, que indica el porcentaje de los vuelos que no tuvieron un atraso mayor a 15 minutos. Esta medida es muy importante dentro de las aerolíneas, ya que es usada internacionalmente para comparar su nivel de servicio respecto a la competencia. La puntualidad de llegada no será considerada en lo posterior de este trabajo, ya que no es usada en la literatura y es menos relevante para las aerolíneas en comparación a la de salida.

Cada aerolínea tiene un *Centro de Control de Operaciones* (CCO), que vela por la correcta ejecución de cada vuelo. El curso de acción natural, cada vez que ocurre una disrupción, es reasignar secuencialmente aviones, tripulantes y pasajeros, haciendo modificaciones en los planes originales para minimizar el impacto de los atrasos. La creación de planes de contingencia es una tarea altamente compleja que debe hacerse contra el tiempo, por lo que frecuentemente no se toman decisiones óptimas. Este problema, llamado en la literatura *Airline Recovery Problem*, ha sido foco de muchos esfuerzos de investigación, ya que los costos involucrados son altísimos.

En la Tabla 1-1 se muestran estadísticas del desempeño operacional correspondientes a 20 de las principales aerolíneas de Estados Unidos entre 2004 y 2010. Dentro de este periodo se observa una tendencia al alza de las horas de atraso reaccionario con respecto al total de los atrasos, desde el 32,44% el año 2004, a un 39,51% el año 2010. De acuerdo al *Joint Economic Committee* (JEC)

de los Estados Unidos, el año 2007, cada hora de atraso costó en promedio US\$9.535 por concepto de valor del tiempo de pasajeros, gastos extra de gasolina y de recursos humanos, y costos indirectos sobre otras industrias. Considerando todas las aerolíneas y vuelos durante ese año, el costo estimado asociado a los atrasos superó los 41 billones de dólares.

Tabla 1-1: Desempeño operacional de los vuelos de las 20 mayores aerolíneas de EE.UU

Año	Cantidad de vuelos	OTP15 total	Parte OTP15 reaccionario	Atraso total (hrs)	Atraso reaccionario (hrs)	% Horas atraso reaccionario
2004	6.775.447	19,87%	5,72%	1.141.526	370.302	32,44%
2005	6.949.104	20,57%	6,19%	1.241.174	420.886	33,91%
2006	7.069.472	22,67%	7,43%	1.441.168	533.114	36,99%
2007	7.126.412	24,44%	8,28%	1.622.387	613.449	37,81%
2008	6.715.312	21,94%	7,27%	1.394.934	511.013	36,63%
2009	6.164.209	19,04%	6,29%	1.061.408	386.251	36,39%
2010	6.156.172	18,21%	6,55%	1.005.479	397.283	39,51%

Fuente: Bureau of Transportation Statistics (2011)

Los altos costos inherentes a las interrupciones justifican los esfuerzos del CCO por normalizar la contingencia. Las principales acciones posibles incluyen:

- Rotación: consiste en cambiar las rutas (o cadenas de vuelos) programadas de cada avión para disminuir el atraso propagado.
- Reprogramación de vuelos: consiste en propagar un atraso reaccionario, generalmente si este es menor a una cota máxima establecida.
- Cancelación de ciclos de vuelos: consiste en cancelar vuelos consecutivos. Medida adoptada especialmente si la cantidad de vuelos afectados no es mayor que tres.
- Uso de aviones y/o tripulantes de reserva: en las principales estaciones se programa la estadía de recursos sin vuelos asignados durante un día o una parte del día, para su uso eventual ante interrupciones.

- Relocalización de aviones y/o tripulantes: consiste en mover recursos entre aeropuertos (en general cercanos) para asegurar la operación de vuelos afectados por interrupciones. En el caso de los aviones, estos vuelan sin pasajeros a bordo. En el caso de los tripulantes, son transportados como pasajeros.

1.3. Planificación Robusta

Gestionar planes de contingencia es un enfoque reactivo en *Disruption Management*. Durante los últimos tres años, ha habido un vuelco hacia un paradigma proactivo: *Planificación Robusta de Itinerarios*. Se trata de planificar el itinerario considerando explícitamente las posibilidades de interrupciones, de manera de minimizar los efectos de los atrasos independientes. Como consecuencia, se propagarán menos atrasos y serán necesarios menos esfuerzos para la contingencia.

La PRI busca incluir tópicos operacionales, como los atrasos y planes de contingencia, al proceso típico de planificación de 4 etapas. El tiempo transcurrido entre el aterrizaje de un vuelo y el despegue del siguiente puede dividirse en dos partes:

1. *T/A* mínimo: tiempo mínimo que el avión debe estar detenido en la loza del aeropuerto entre dos vuelos conectados.
2. Holgura: margen de tiempo destinado a absorber probables atrasos reaccionarios y retrasos en los procesos terrestres.

La holgura es mirada de manera negativa en el proceso de planificación, ya que los principales recursos quedan ociosos. No obstante, para el CCO y los procesos operacionales terrestres (como mantenimiento) las holguras son muy requeridas. En términos monetarios, el costo de operación disminuye a medida que aumenta la holgura programada, mientras que el costo de planificación (derivado del costo de oportunidad por utilización de recursos) disminuye al minimizar la holgura

programada. Este *trade-off* entre costos de operación y planificación puede observarse en la Figura 1-2.

Todos los esfuerzos de PRI apuntan a encontrar la cantidad óptima de minutos de holgura, y a localizarla de manera eficiente, de manera de minimizar los costos totales. Cuando se han definido todos los vuelos del itinerario, la holgura total es constante. En este caso, la *Relocalización Robusta de Holguras* (RRH en lo posterior) es una alternativa de PRI que busca minimizar los atrasos reaccionarios, mediante la reprogramación marginal de los tiempos de despegue de cada vuelo y/o la reprogramación de rutas para cada avión.

El uso de la información histórica constituye un aspecto clave en PRI y especialmente en RRH para saber dónde localizar más holgura. Uno de sus principales usos se da en la calibración de modelos de simulación, destinados a la evaluación de distintos escenarios operacionales. Generalmente, estos modelos son simples, ya que se aplican varios meses antes de la operación. Básicamente, se generan interrupciones aleatorias que son propagadas en el itinerario, pero sin considerar planes de contingencia, ni conexiones de tripulantes y pasajeros entre los vuelos.

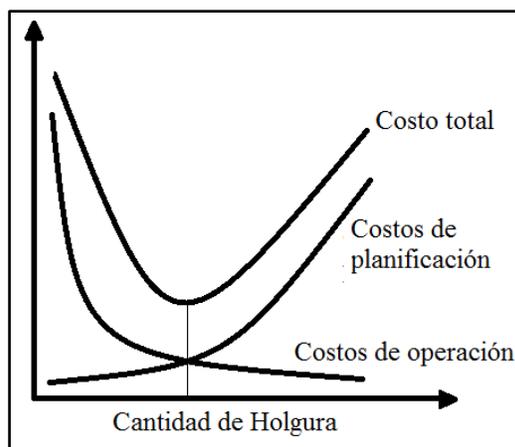


Figura 1-2: Trade-off entre costos de planificación y operación en función de la holgura

1.4. Contribución del trabajo

Las principales contribuciones del trabajo se resumen en los siguientes 4 puntos:

1. Creación de un modelo de simulación de itinerarios (MSI en lo posterior) que genera atrasos aleatorios y efectúa planes de contingencia ante atrasos reaccionarios, considerando vuelos conectados por aviones, tripulantes y pasajeros.
2. Creación de una heurística de RRH para minimizar el atraso reaccionario, mediante la reprogramación marginal del tiempo programado de despegue de los vuelos del itinerario. El método se basa en un algoritmo de búsqueda local que minimiza el atraso reaccionario de cada vuelo, el cual es estimado a partir de MSI.
3. Presentación de una alternativa de PRI que considera el efecto de planes de contingencia de manera directa en la evaluación de las soluciones propuestas por medio de MSI. La consideración de planes de contingencia es un tópico que no ha sido abordado en la literatura por lo complejo que resulta su incorporación a alternativas de modelación determinísticas.
4. Generación de un itinerario robusto y de altos beneficios para las aerolíneas respecto a: (1) reducción del atraso propagado, (2) mejora en la puntualidad, y (3) reducción de la cantidad de planes de contingencia generados. Según la Figura 1-1, esta solución sería aplicable hasta antes del hito de publicación del itinerario, ya que posteriormente no es posible modificar los tiempos de salida programados.

1.5. Esquema de la tesis

El resto de la tesis tiene la siguiente estructura. En el capítulo 2 se presenta una revisión bibliográfica sobre planificación robusta de itinerarios de transporte

aéreo, centrada en los trabajos relacionados con reprogramación de rutas y reprogramación de vuelos.

En el capítulo 3 se presentan las bases de MSI. Se detalla la modelación de los atrasos, las conexiones y la planificación de contingencia. También se presenta la validación del modelo de simulación, en base a la comparación de puntualidad y atrasos entre la simulación e información histórica.

En el capítulo 4 se presenta la heurística de optimización discreta usada para RRH. Se describen los procesos de optimización local del atraso propagado por vuelo y por avión, junto con sus principales supuestos y beneficios potenciales. A continuación, se muestran resultados de la aplicación de la heurística, comparándolos con otros trabajos que presentan resultados en términos de puntualidad y reducción de atraso propagado.

Finalmente, se presentan las principales conclusiones obtenidas a partir de este trabajo, junto con posibles extensiones para futuras investigaciones.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La PRI ha sido un área de investigación de alto dinamismo dentro de la última década. Los crecientes costos de operación han generado la necesidad de crear planes que consideren las posibilidades de los distintos tipos de interrupciones y su eventual propagación entre los vuelos conectados.

Gran parte de los trabajos se han centrado en la tercera etapa de planificación, en torno a dos posibles acciones factibles de realizar sobre un itinerario dado: reprogramación de rutas y reprogramación de vuelos. Si bien la mayoría utiliza modelos de simulación para testear las soluciones propuestas, en general, no se considera la existencia de planes de contingencia, lo que es un aspecto negativo considerando que estos tienen alto impacto en el desempeño operacional del itinerario.

La Tabla 2-1 resume las características más relevantes de los principales trabajos de optimización robusta de itinerarios, con respecto a los objetivos de optimización, al método de solución utilizado y al tipo de problema abordado.

Una de las primeras aproximaciones a la PRI es propuesta por Ageeva (2000), quien define la robustez como el total de rutas programadas que se cruzan en un mismo aeropuerto. Tal métrica es maximizada para aumentar las posibilidades de hacer rotaciones en la contingencia. Con este objetivo plantea un modelo de optimización entera mixta (MIP en lo posterior) para la reprogramación de rutas de cada avión. Sus resultados indican que su medida de robustez es mejorada un 35%. No obstante, no muestra efectos concretos de sus soluciones en la puntualidad o el atraso propagado.

Rosenberger et al. (2002) presentan las bases de un modelo de simulación llamado *Simair*. El objetivo del modelo es proporcionar una herramienta para evaluar un itinerario desde el punto de vista operacional, y probar distintas prioridades de planes de contingencia. El modelo representa de manera explícita aviones, vuelos y conexiones tanto de tripulantes como de pasajeros. A diferencia de MSI, este simulador representa con mayor detalle las dinámicas operativas de los vuelos y en especial los

planes de contingencia; pero, requiere un alto nivel de detalle de información, lo que acota su utilidad como máximo hasta un mes antes de la operación.

Sarmadi (2004) propone un MIP para el problema RRH, combinando reasignación de rutas y reprogramación de tiempos de despegue, con el objetivo de minimizar el atraso propagado, tanto en vuelos como en pasajeros. Usa el valor esperado del atraso entre dos vuelos para incorporar interrupciones al modelo. El atraso es propagado dentro del itinerario programado de cada avión, sin considerar otro tipo de conexiones. Para modelar las opciones de reprogramación de tiempos de despegue, se crean copias de cada vuelo para cada opción de reprogramación, de las cuales el modelo debe elegir sólo una. La aplicación del modelo en un caso real reduce un 3,15% el atraso propagado.

Rosenberger et al. (2004) proponen un modelo robusto de asignación de flotas, mediante el cual demuestran que itinerarios con ciclos cortos y bajo nivel de conectividad entre grandes centros aeroportuarios, reducen significativamente las posibilidades de atraso propagado. Para comparar distintas soluciones utilizan el simulador *SimAir*.

Lan et al. (2006) presentan dos MIP para el problema RRH. El primer modelo es de reprogramación de rutas, manteniendo fijos los tiempos programados de cada vuelo. De manera similar a Sarmadi (2004), usa el valor esperado del atraso entre dos vuelos para incorporar interrupciones al modelo. Prueba dos objetivos por separado, minimización de atraso propagado y minimización de pasajeros que pierden conexión. Como resultado muestra una reducción del 44% en el primer objetivo y 10% en el otro. El segundo modelo es de reprogramación de tiempos de despegue, manteniendo fijas las rutas por avión. Usa distintas copias de cada vuelo para representar las posibilidades de variación en el tiempo de despegue. En este caso, prueban sólo como función objetivo minimizar la cantidad de pasajeros que pierden conexión, obteniendo mejoras entre el 20% y 40%. Para ambos modelos utilizan técnicas de *Branch & Price* para la resolución, debido a que el problema es muy grande para instancias reales de 300 vuelos diarios. No se hace uso de herramientas de simulación para la comparación de las soluciones propuestas.

Lee, et al (2007) proponen un algoritmo genético para la reprogramación de vuelos. La holgura total del itinerario es factible de aumentar, ya que los horarios de los vuelos extremos de cada avión en cada día están irrestrictos. La optimización propuesta es de carácter multiobjetivo, usando (1) el porcentaje de vuelos con atraso de llegada mayor que cero, y (2) el porcentaje de tiempo extra de los tripulantes. Su algoritmo se basa en iteraciones para producir soluciones factibles que son evaluadas con un simulador, que en este caso es *Simair*. Dada la naturaleza del algoritmo genético, los tiempos de resolución son altísimos. Para una instancia de prueba de 441 vuelos semanales el tiempo de resolución fue de 90 horas, mejorando un 8% la puntualidad de llegada.

Lapp et al. (2008) presenta un algoritmo recursivo para calcular el efecto de un atraso independiente como atraso propagado en el resto del itinerario, considerando conexiones de tripulantes. La recursión se da respecto a la posibilidad de avance del atraso propagado hacia sus conexiones, hasta que todo el atraso es absorbido por las holguras. El algoritmo es usado para validar los resultados del modelo propuesto por Abdelgayni (2010), considerando atrasos máximos de 1 hora. Dado que simula sólo la propagación de los atrasos, sin considerar planes de contingencia, el desempeño es muy bueno, corriendo 1000 réplicas de un itinerario de 500 vuelos en 5 segundos.

Eggenberg y Salani (2009) proponen un MIP para RRH basado en la reprogramación de rutas, más una extensión del mismo para reprogramación de vuelos. En ambos se incorpora la robustez en la función objetivo mediante la maximización de la holgura total, y alternativamente, la maximización de la suma de las holguras mínimas por avión. Para la reprogramación de vuelos, se penaliza la variación de minutos respecto al itinerario original. Sus resultados muestran como, independientemente de datos históricos, se mejoran las métricas objetivo propuestas. Los problemas son resueltos por generación de columnas, con tiempos de procesamiento de hasta 20 minutos.

Chiraphadhanakul y Eggenberg (2009) presentan un extenso estudio sobre 4 factores claves en la evaluación de la robustez: métricas, modelos, tipo de evaluación y uso de datos históricos. Comparan los modelos de reprogramación de rutas y tiempos de despegue propuestos por Lan et al. (2006) y, posteriormente, por Eggenberg y Salani

(2009). En los modelos combinan distintos objetivos como minimización de atraso propagado y maximización de holguras programadas. Luego, presentan una extensa lista de métricas a priori y a posteriori de robustez, las que son obtenidas luego de la simulación de las soluciones propuestas por cada modelo. Interesantemente, muestran que modelos que hacen reprogramación de tiempos de vuelo son mejores que los que reprograman rutas con respecto al total de atraso propagado. Concluyen que no hay métricas dominantes, y que hay algunas con correlación negativa. También, hacen notar que se obtienen mejores resultados al explotar la información histórica como precedente útil para asignar convenientemente las holguras.

Weide (2009) propone un modelo integrado de PRI para el problema de ruteo de aviones y asignación de tripulantes (tercera y cuarta etapa del proceso de planificación), considerando ventanas de tiempo de variación para los tiempos de despegue de cada vuelo. Incorpora dos novedosas métricas relacionadas con la robustez: (1) cantidad de vuelos consecutivos que son programados con T/A mínimo, y (2) cantidad de cambios de avión que debe hacer una misma tripulación dentro de un turno. El autor propone minimizar estas métricas para aumentar la robustez del itinerario. También hace notar que en la práctica, para que la solución sea aplicable debe optimizarse una semana completa de itinerario, considerando restricciones de sincronización de vuelos, es decir, que para cada día los mismos vuelos sean programados a la misma hora. Las soluciones obtenidas son simuladas para validar la robustez obtenida. El modelo de simulación genera atrasos por estación y hora del día, propagando el atraso en base a las conexiones de tripulantes y aviones, pero sin simular planes de contingencia. Las instancias más complejas consideran sólo 139 vuelos por día, y tardan alrededor de 20 minutos en resolverse, obteniéndose reducciones simuladas del atraso propagado en torno al 14%.

Sohoni et al. (2009) proponen un modelo de reprogramación de HBT^4 , considerando simultáneamente variaciones en tiempos de despegue y llegada por vuelo, opción que permite incrementar las holguras planificadas mediante la reducción de los tiempos de

⁴ HBT (Hour Block Time): tiempo programado de vuelo, desde que quitan las calzas del tren de aterrizaje del avión antes del despegue, hasta que son fijadas luego del aterrizaje.

vuelo iniciales. Proponen dos modelos de programación entera estocástica. En ambos definen un nivel de servicio definido en función de la cantidad de conexiones de pasajeros que no son violadas, y una función de margen operacional que incorpora demandas y tarifas por vuelo, distintos tipos de clase y el gasto en combustible en función de la duración del vuelo programado. El primer modelo minimiza costos operacionales sujeto a un nivel de servicio mínimo; el segundo maximiza el nivel de servicio sujeto a un mínimo de margen operacional. La modelación de las conexiones de pasajeros no considera la opción de espera por pasajeros. Para resolver el problema utilizan la técnica de generación de planos cortantes, logrando buenas soluciones con tiempos de resolución entre 167 y 3.921 segundos para instancias entre 450 y 1.500 vuelos diarios. Los resultados no son simulados, por lo que no presentan resultados en términos de OTP o reducción de atraso propagado.

Burke et al. (2010) presentan un algoritmo genético de optimización de carácter multiobjetivo para resolver RRH, permitiendo tanto reprogramación de rutas como de tiempos de despegue de cada vuelo. La robustez va incorporada en la función objetivo a través de dos conceptos: seguridad y flexibilidad. El primero se relaciona con la capacidad de absorber mediante holguras los efectos de las interrupciones. El segundo tiene que ver con las opciones posibles para mitigar los efectos de una interrupción a través de planes de contingencia. Para probar las soluciones utilizan un modelo de simulación que reproduce algunos planes de contingencia (rotaciones, cancelaciones y retrasos), pero que no considera ningún tipo de conexión. Obtienen mejoras en OTP en torno al 1% sobre itinerarios de entre 172 y 504 vuelos, permitiendo variaciones de ± 10 minutos por vuelo. Los tiempos de resolución oscilan entre 7 y 98 minutos.

Cuevas (2010) presenta *SimuLAN*, un modelo de simulación estocástica discreta desarrollado para *LAN Airlines*, el cual es la base de este trabajo. El objetivo del modelo es poder evaluar los niveles de puntualidad de un itinerario, generando una conexión entre la planificación comercial y el CCO de la compañía. El modelo representa de manera explícita aviones y vuelos, y simula la ejecución de rotaciones y uso aviones de reserva. A diferencia de MSI, *SimuLAN* no representa conexiones de tripulantes ni de pasajeros, y no considera la programación de mantenimientos, por lo

que sobreestima la puntualidad al ocupar estos tiempos como holguras para la recuperación del itinerario.

Marla y Barnhart (2010) proponen 3 MIP para RRH permitiendo únicamente reprogramación de rutas de aviones. Las soluciones son evaluadas con un simulador independiente de los modelos que sólo propagan atraso. El primer modelo minimiza el valor esperado del atraso reaccionario, usando un enfoque similar al propuesto por Lan et al. (2006). El segundo modelo introduce incertidumbre respecto al evento de retrasarse más de 90 minutos (considerado por los autores como el límite para cancelar un vuelo). El objetivo es maximizar la probabilidad de que el atraso sea menor que 90 minutos. El tercer modelo es una variación del anterior, incorporando restricciones para cada vuelo para que el atraso esperado no sobrepase cierto límite establecido. Hacen pruebas con itinerarios de entre 38 y 50 vuelos, obteniendo mejoras de OTP en torno al 2%, pero con altos tiempos de resolución que en algunos casos superan las 10 horas.

AhmadBeygi et al. (2010) presentan un modelo de programación lineal para RRH basado en la reprogramación de tiempos programados de despegue de cada vuelo. La modelación se basa en restricciones que mantienen la factibilidad del itinerario, y limitan la variación del inicio de cada vuelo en un radio de minutos parametrizable. Proponen una función objetivo relacionada con la robustez, definida como la suma de los atrasos propagados ponderados por su probabilidad de ocurrencia. La calidad de la función objetivo es testada con un modelo de simulación simple de propagación de atrasos. Realizan pruebas con dos itinerarios, logrando reducciones de hasta un 50% en su función objetivo de atraso propagado, con bajos tiempos de resolución (a lo más 8 segundos). Las debilidades de su modelo radican en no incluir los diversos planes de contingencia, no considerar conexiones de pasajeros, y sobreestimar el atraso propagado al considerarlo siempre como la suma de todos los atrasos incidentes. No hay resultados sobre puntualidad y cantidad de reprogramaciones efectuadas.

Chiraphadhanakul (2010) propone 3 MIP para RRH. (1) Modelo robusto de reprogramación de rutas (basado en Lan, 2006), minimiza el atraso propagado esperado por ruta y maximiza la holgura total programada. El atraso propagado no considera

conexiones de pasajeros ni de tripulantes. (2) Modelo robusto de reprogramación de tiempos de despegue de vuelos: permite variarlos en una ventana de tiempo limitada (con el supuesto de que la demanda es invariante), usando los mismos objetivos del modelo anterior. (3) Modelo robusto de reajuste de HBT: es una extensión del modelo anterior, que permite además variar el tiempo programado de llegada de cada vuelo. Aparte de los dos objetivos anteriores, propone minimizar el atraso esperado de llegada. Hace pruebas con itinerarios de entre 211 y 268 vuelos diarios, y usa un modelo de simulación simple (sin planes de contingencia) para comparar los resultados en base a métricas de OTP y atraso propagado. En especial, para el segundo modelo obtiene mejoras de 1.8% en OTP y reduce un 20% el atraso propagado.

Tabla 2-1: Principales Investigaciones de Planificación Robusta de Itinerarios de Transporte Aéreo

Autor	Año	Principales objetivos	Método de solución	Tipo de problema			
				Reprogramación de tiempos de despegue	Reprogramación de rutas	Reprogramación de HBT	Reprogramación simultánea de rutas y tiempos de despegue
Ageeva	2000	Maximizar posibilidades de recovery	MIP		x		
Sarmadi	2004	Minimizar atraso propagado de aviones y pasajeros	MIP				x
Rosenberger et al.	2004	Minimizar conectividad entre hubs	MIP		x		
Lan et al.	2006	Minimización de atraso propagado y pasajeros que pierden conexión	MIP (Branch & Price)	x	x		
Lee et al.	2007	Minimización puntualidad de llegada y tiempo extra de tripulantes	Algoritmo genético	x			
Eggenberg y Salani	2009	Maximización de holgura total y holgura mínima por avión	MIP (Generación de columnas)		x		x
Chiraphadhanakul y Eggenberg	2009	Minimización de atraso propagado; maximización de holguras	MIP (Generación de columnas)	x	x		x
Weide	2009	Minimización de vuelos seguidos con T/A mínimo; minimización de cambios de avión de una misma tripulación	MIP (Generación de columnas, Branch & Price)				x
Sohoni et al.	2009	Minimización de costos operacionales; minimización de conexiones de pasajeros perdidas.	MIP (planos cortantes)			x	
Burke et al.	2010	Minimización de atraso propagado; maximización de opciones de recovery.	Algoritmo genético				x
Marla y Barnhart	2010	Minimización de atraso propagado	MIP		x		
AhmadBeygi et al.	2010	Minimización de atraso propagado	Programación lineal	x			
Chiraphadhanakul	2010	Minimiza atraso propagado de salida y de llegada; maximiza holgura total programada	Programación lineal	x	x	x	

3. MODELO DE SIMULACIÓN DE ITINERARIOS

El modelo de simulación discreta presentado en esta sección (MSI), tiene como objetivo principal evaluar el desempeño operacional de un itinerario de transporte aéreo en el mediano plazo, de entre 3 y 6 meses previos a la operación. Los esfuerzos de modelación se enfocan en representar la operación del sistema dentro de un contexto de planificación, donde la cantidad y calidad de la información disponible es limitada.

En la literatura destacan dos tipos de modelos de simulación referentes a las aerolíneas. El primer tipo es aplicado durante la operación misma, con el objetivo de estimar la propagación de atrasos reales y evaluar la conveniencia de distintos planes de contingencia factibles. Para estos fines, se requiere mucha información en tiempo real. Por ejemplo, la posición exacta de aviones, tripulantes y pasajeros, junto con el estado operacional de cada aeropuerto, que, por ejemplo, puede estar afectado por disrupciones meteorológicas. Los principales exponentes incluyen: Rosenberger et al. (2002), Lee et al. (2003), Jacobs, Verbraeck & Mulder (2005), Abdelghany et al. (2008), y Castro & Oliveira (2011). El segundo tipo es aplicado en un contexto de planificación, para evaluar la propagación de atrasos hipotéticos y estimar la puntualidad. No obstante, estos modelos no consideran dinámicas operativas como conexiones entre vuelos y la aplicación de planes de contingencia. El nivel de detalle requerido en este tipo de modelos es bajo, siendo su base el itinerario programado e información histórica, la cual es usada para generar atrasos aleatorios por vuelo. Al respecto destacan los trabajos de Wu (2005), Lapp et al. (2008), Weide (2009), Burke et al. (2010), Cuevas (2010), y Marla & Barnhart (2010).

El modelo de simulación desarrollado en esta investigación combina elementos de ambos tipos de modelos, dando lugar a uno que es aplicable a la planificación y que, además, considera aspectos claves de la operación. El esfuerzo para generar un modelo más detallado se justifica debido a su posterior uso en una heurística de optimización, que a partir de sus resultados, minimiza el atraso propagado de un itinerario.

A continuación, se describen los principales procesos y relaciones del sistema de itinerarios respecto a su planificación y operación. Posteriormente, en base a estas definiciones, se describe y valida el modelo de simulación.

3.1. Descripción del sistema

3.1.1. Procesos de un vuelo

El vuelo es la unidad básica de modelación en la simulación. Un vuelo es una ventana de tiempo definida entre un par origen-destino. Como se aprecia en la Figura 3-1, un vuelo está conformado por dos procesos en serie: *Turn Around Time* (TAT) y *Hour Block Time* (HBT).



Figura 3-1: Procesos principales de un vuelo

El TAT incluye todos los procesos que ocurren cuando el avión está en tierra antes de cada vuelo, ya sea en el aeropuerto, en el avión, en los tripulantes o en los pasajeros. Por ejemplo: embarque/desembarque de pasajeros, carga/descarga de equipaje, carga de combustible, aseo del avión, ingreso/egreso de productos de servicio, mantenimiento de rutina, control de tráfico aéreo, inicio/fin de turnos de tripulantes, etc. La dinámica entre estos procesos es compleja, pudiendo algunos estar en serie y otros en paralelo.

Por otra parte, el HBT puede dividirse en tres procesos en serie claramente definidos:

1. *Taxi in time*: se inicia cuando se quitan los seguros de las ruedas del avión, y termina cuando el avión despega las ruedas de la pista de aterrizaje.
2. *Air time*: proceso de vuelo del avión. Su tiempo total depende de la distancia recorrida entre el par origen-destino, la velocidad del avión y factores meteorológicos.
3. *Taxi out time*: se inicia cuando el avión toca tierra en la pista de aterrizaje, y termina cuando se colocan los seguros de las ruedas del avión.

La planificación de un vuelo dentro de un itinerario incluye únicamente el instante de inicio y el de término del HBT correspondiente. El detalle de las operaciones previas es particular de cada vuelo, por lo que no se registra el inicio puntual del TAT. La única información disponible es el tiempo mínimo requerido para las operaciones previas al inicio del HBT.

3.1.2. Tiempos de un vuelo

En general, como resultado de las diferentes interrupciones, un vuelo no resulta como se programa. El registro y análisis de los atrasos requiere de una definición rigurosa de los tiempos programados y resultantes de cada vuelo. Las figuras 3-2 y 3-3 muestran dos escenarios característicos de un itinerario. El primero muestra la propagación de un atraso, y el segundo el incremento de una holgura.

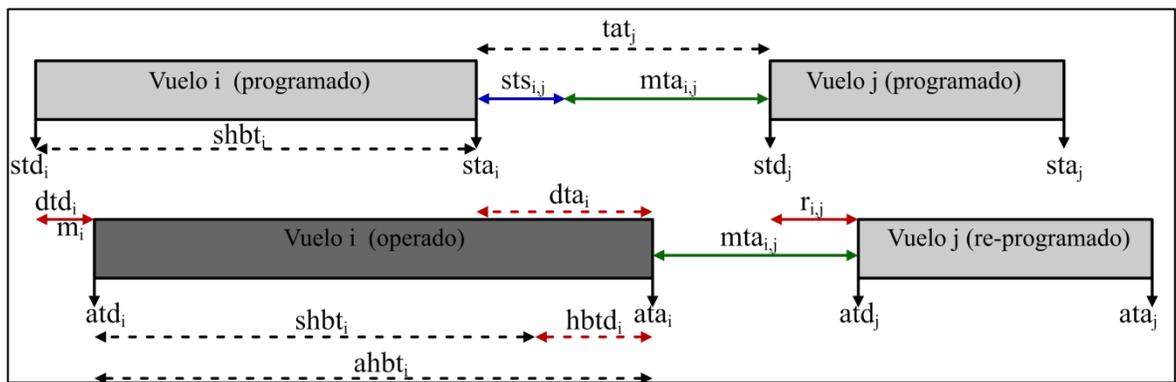


Figura 3-2: Tiempos de programación y operación de un vuelo con atraso reaccionario

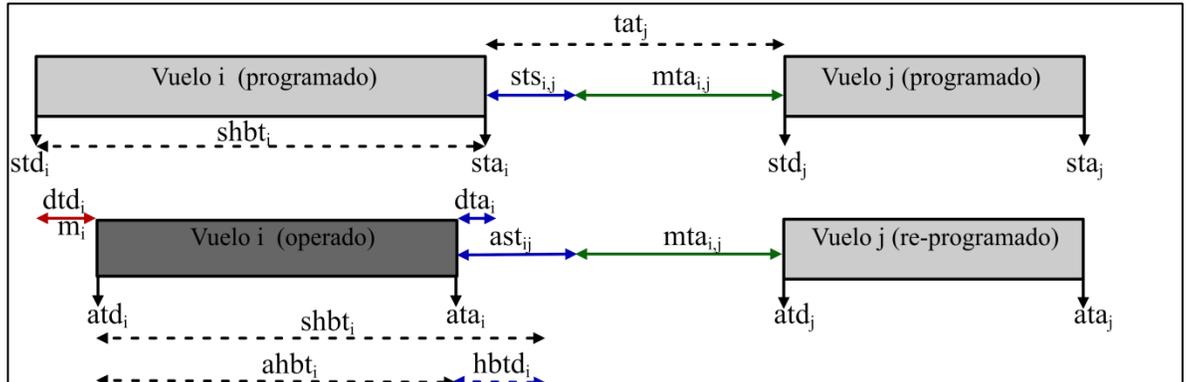


Figura 3-3: Tiempos de programación y operación de un vuelo con holgura resultante

std_i (*Scheduled time of departure*): Tiempo programado de despegue del vuelo i .

sta_i (*Scheduled time of arrival*): Tiempo programado de llegada del vuelo i .

atd_i (*Actual time of departure*): Tiempo resultante de despegue del vuelo i .

ata_i (*Actual time of arrival*): Tiempo resultante de llegada de vuelo i .

dtd_i (*Delay time of departure*): Atraso de despegue de vuelo i .

dta_i (*Delay time of arrival*): Atraso de llegada de vuelo i .

tat_j (*Scheduled turn around time*): Tiempo programado en tierra del vuelo i .

$shbt_i$ (*Scheduled hour block time*): Tiempo programado de HBT del vuelo i .

$ahbt_i$ (*Actual hour block time*): Tiempo resultante de HBT del vuelo i .

hbt_d_i (*Hour block time difference*): Diferencia entre HBT resultante y programado correspondiente al vuelo i .

$mta_{i,j}$ (*Minimal turn around time*): Tiempo mínimo de TAT entre vuelos i y j .

$sts_{i,j}$ (*Scheduled Slack Time*): Holgura programada entre vuelos i y j .

$ast_{i,j}$ (*Actual Slack Time*): Holgura resultante entre vuelos i y j , antes de la operación del vuelo j .

$r_{i,j}$: Atraso reaccionario propagado desde vuelo i a vuelo j .

m_i : Atraso independiente que afecta la salida del vuelo i .

En base a las definiciones anteriores, es posible establecer las siguientes relaciones:

$$sta_i = std_i + shbt_i \quad (3.1)$$

$$ata_i = atd_i + ahbt_i \quad (3.2)$$

$$atd_i = std_i + dtd_i \quad (3.3)$$

$$ata_i = sta_i + dta_i \quad (3.4)$$

$$hbtd_i = ahbt_i - shbt_i \quad (3.5)$$

$$dtd_j = m_j + r_{i,j} \quad (3.6)$$

$$tat_j = mta_{i,j} + sts_{i,j} \quad (3.7)$$

$$std_j - std_i = shbt_i + mta_{i,j} + sts_{i,j} \quad (3.8)$$

Las ecuaciones (3.1) y (3.2) relacionan el tiempo de despegue y llegada con los tiempos de vuelo programados y resultantes respectivamente. Las ecuaciones (3.3) y (3.4) relacionan los atrasos de despegue y llegada con los tiempos programados y resultantes respectivos. La relación (3.5) entrega la diferencia entre el tiempo de vuelo programado y resultante, la cual puede ser positiva o negativa. La relación (3.6) descompone el atraso de despegue en una componente independiente más otra reaccionaria. Con esto se muestra la interdependencia entre los vuelos dentro del itinerario, ya que cada atraso de despegue puede depender de los vuelos anteriores y, así mismo, afectar a varios vuelos futuros. La relación (3.7) descompone el TAT total en un T/A mínimo más una holgura programada. Cuando un atraso es propagado, se debe mantener el mínimo de T/A entre dos vuelos conectados, reduciendo a cero la holgura si fuera necesario. Por último, la relación (3.8) descompone en tres partes el tiempo de ciclo entre dos despegues consecutivos: tiempo de vuelo, T/A mínimo y holgura. Los esfuerzos

para mejorar la puntualidad se aplican en cada componente, ya sea reduciendo el tiempo de vuelo mediante mayores velocidades; agilizando los procesos de T/A para reducir los mínimos planificados; e introduciendo más tiempo de holgura para absorber eventuales atrasos reaccionarios.

En general, todos los atrasos y desviaciones de la programación original son variables estocásticas dentro de MSI. No obstante, es posible reducir el análisis de la estocasticidad de los tiempos considerando sólo dos variables independientes: m_i y hbt_d_i . Por ejemplo, para la holgura resultante y el atraso reaccionario se tiene que:

$$ast_{i,j} = \max\{0, \quad sts_{ij} - dtd_i - hbt_d_i\} \quad (3.9)$$

$$r_{i,j} = \max\{0, \quad dtd_i + hbt_d_i - sts_{ij}\} \quad (3.10)$$

Asumiendo un vuelo k previo al vuelo i , puede reemplazarse dtd_j usando la expresión (3.6):

$$ast_{i,j} = \max\{0, \quad sts_{ij} - r_{k,i} - m_i - hbt_d_i\} \quad (3.11)$$

$$r_{i,j} = \max\{0, \quad r_{k,i} + m_i + hbt_d_i - sts_{ij}\} \quad (3.12)$$

Es decir, el atraso reaccionario depende de:

1. Atraso total del vuelo inicial, que puede descomponerse en un atraso independiente más el atraso reaccionario del vuelo anterior.
2. Diferencia resultante de HBT, la cual puede incrementar o reducir el atraso reaccionario.
3. Holgura programada entre estos vuelos.

Por otra parte, en (3.12) puede apreciarse el *efecto dominó*, inherente al sistema de itinerarios, ya que el atraso reaccionario $r_{i,j}$ depende del atraso reaccionario $r_{k,i}$ proveniente del vuelo anterior. Así, un atraso de alta magnitud puede propagarse a varios vuelos futuros.

Puede observarse que la suma del atraso reaccionario y la holgura resultante resulta constante en todos los casos, es decir:

$$ast_{i,j} + r_{i,j} = |sts_{ij} - dtd_i - hbtd_i| \quad (3.13)$$

Esto muestra que existe un *trade-off* en cada vuelo entre la holgura resultante y el atraso reaccionario. En términos de costo, la expresión (3.13) contrasta el costo de oportunidad, referente al uso de activos de la aerolínea, contra los costos del atraso reaccionario. El costo del tiempo de un minuto de atraso tiene variadas componentes como horas extras de tripulantes, combustible, valor del tiempo de pasajeros, etc.

3.1.3. Aviones

Los aviones son el principal activo de las aerolíneas. Cada uno está categorizado dentro de una flota, la cual determina para cada avión su nivel de autonomía (horas continuas de vuelo) y su cantidad de asientos disponibles. Por ejemplo, hay flotas destinadas al servicio doméstico⁵ (por ejemplo Boeing 737) que operan vuelos de alta frecuencia diaria, distancias cortas y pocos asientos. Por otra parte, hay otras destinadas al servicio internacional (por ejemplo, Boeing 767), las cuales recorren largas distancias, con bajas frecuencias, pero con mayor cantidad de asientos.

Cada avión tiene un itinerario programado, el cual está compuesto por una secuencia de vuelos y tiempos en tierra. En estos últimos, son programadas ventanas de tiempo especialmente destinadas al mantenimiento periódico de las aeronaves. Cada una requiere varios tipos de mantención, los cuales son efectuados estrictamente después de cierta cantidad de millas o vuelos.

Los altos estándares de calidad requeridos para la seguridad de los aviones generan mantenimientos no programados. Si en alguna revisión de rutina se detecta algún riesgo, el avión queda retenido hasta que cumpla con los estándares. Estos mantenimientos no programados son una disrupción que

⁵ Servicio doméstico: referente al mercado de transporte aéreo interno de un país.

generalmente inhabilita un avión por varias horas, generando grandes atrasos reaccionarios en la red de vuelos.

3.1.4. Conexiones

Una conexión es una relación entre dos vuelos que tienen en común el mismo avión, los tripulantes y/o un conjunto no vacío de pasajeros. En general, un vuelo puede tener múltiples conexiones, tanto en la estación de origen como en la de destino.

Las conexiones de avión se dan de manera natural en el itinerario programado de cada avión, el cual define para cada vuelo un antecesor y sucesor. Este tipo de conexión es la que genera más atrasos, ya que no se puede operar un vuelo sin un avión disponible. El itinerario programado de un avión está compuesto por un conjunto de vuelos conectados en serie. La Figura 3-4 muestra el itinerario programado de un avión que opera en los aeropuertos *A*, *B* y *C*.

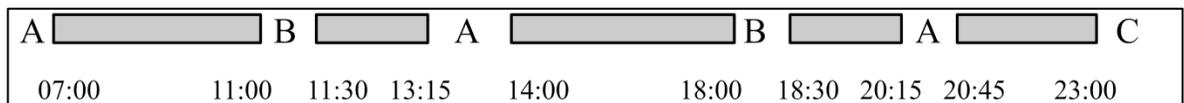


Figura 3-4: Ejemplo de itinerario programado a un avión

Las conexiones de tripulantes se originan en la programación diaria de turnos de trabajo de los tripulantes. En general, un grupo de tripulantes puede abordar más de un avión en cada turno. Los trasbordos programados generan atrasos, ya que se debe esperar el arribo de una tripulación desde otro avión. Desde el punto de vista de un vuelo, se considera que tiene conexiones de tripulantes siempre y cuando estos cambien de avión. Figura 3-5 ilustra el cruce entre el itinerario de aviones y la programación de tripulantes. Para los aviones, las secuencias de estaciones superior e inferior (respectivamente *A-B-A-B-A-C* y *C-D-A-D-A*) son

compartidas por dos tripulaciones que se cruzan en la estación A, las cuales tienen programadas las secuencias de vuelos *A-B-A-D-A* (clara) y *C-D-A-B-A-C* (oscura).

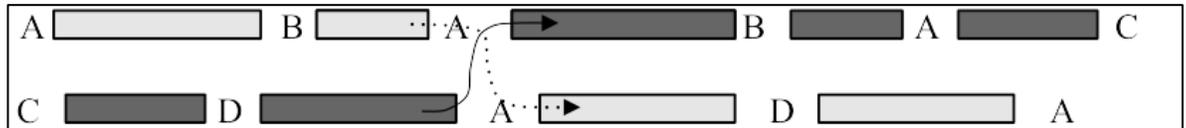


Figura 3-5: Conexión de tripulantes con cambio de avión

Las conexiones de pasajeros se deben a que el viaje de algunos pasajeros está compuesto por más de un vuelo y más de un avión. Al respecto se presentan tres situaciones. Primero, que un grupo de pasajeros deba esperar en un aeropuerto la llegada de un vuelo retrasado. Segundo, que un vuelo deba retrasarse para esperar a un grupo de pasajeros provenientes de un vuelo con atraso reaccionario. Y tercero, que un grupo de pasajeros a bordo de un vuelo atrasado pierda su conexión. Esto ocurre cuando el costo de esperarlos es mayor al costo del quiebre de conexión.

Un componente clave en las conexiones son los *hubs* o centros de conexión. Un *hub* es un aeropuerto importante del que salen y llegan muchos vuelos. Además, gran parte de los tripulantes inician y terminan su jornada en algún *hub*. Generalmente, los itinerarios de un avión tienen una cadena de vuelos secuenciales entre dos *hubs*, o un ciclo que inicia y termina en el mismo *hub*. Los vuelos interiores en estas cadenas y ciclos se llaman *vuelos de tránsito*, ya que tanto tripulantes como la mayoría de los pasajeros permanecen dentro del avión.

En términos analíticos, las conexiones amplifican la propagación de un atraso. AhmadBeygi et al. (2007) introducen el concepto de *Árbol de Propagación* como toda la red de vuelos afectada por un atraso. Asociado a este concepto se define el *Factor Multiplicador de un Atraso (FMA)* como la cantidad de vuelos afectados

por el atraso del vuelo raíz. Mientras más conectada sea la red de vuelos, mayores serán los *FMA* observados.

En términos analíticos se usará la siguiente notación para una conexión:

v_c^- : vuelo inicial de la conexión c .

v_c^+ : vuelo final de la conexión c .

t_c : tiempo de interconexión.

tm_c : tiempo mínimo de interconexión.

p_c : cantidad de pasajeros de la conexión.

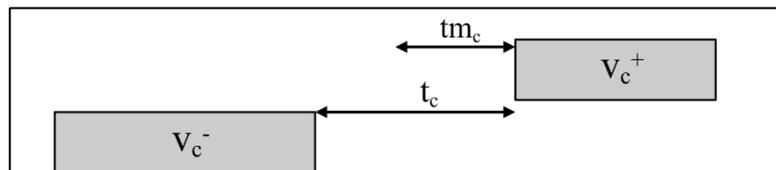


Figura 3-6: Modelación de una conexión

3.1.5. Control de operaciones

La operación del itinerario requiere del monitoreo y control de cada recurso, con el objetivo de asegurar la ejecución del itinerario programado a mínimo costo.

En general, las aerolíneas tienen un *Centro de Control de Operaciones* (CCO), departamento dedicado exclusivamente al control de la operación. Su principal acción es crear planes de contingencia frente a disrupciones. Dentro del CCO existen 4 funciones que interactúan continuamente entre sí (Figura 3-7).

1. Controlador de aviones: encargado de asegurar la disponibilidad de aviones para cada vuelo. Monitorea procesos claves del avión como mantenimiento y carga de combustible.

2. Controlador de tripulantes: encargado de asegurar la disponibilidad de tripulantes para cada vuelo. Monitorea el cumplimiento de los planes de trabajo de cada tripulante, de manera de respetar las normas laborales de la aerolínea.
3. Controlador de pasajeros: encargado de asegurar el cumplimiento de los planes de vuelo de cada pasajero. Además, se encarga de coordinar la ejecución de los planes de compensación a pasajeros afectados por las interrupciones.
4. Coordinador central: encargado de coordinar la operación de los tres anteriores y de ejecutar los planes de contingencia.

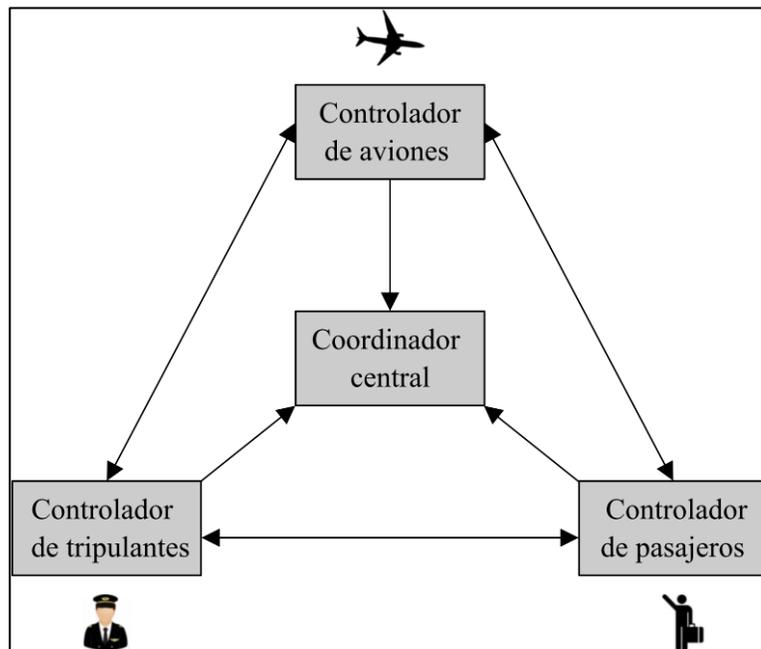


Figura 3-7: Funciones principales en un Centro de Control Operacional (CCO)

Ante cada interrupción, el CCO debe evaluar sus potenciales efectos y crear planes de contingencia alineados con los objetivos de la aerolínea. Cuando no existen planes

factibles, se asumen las consecuencias de la interrupción, es decir, se propaga el atraso. Los planes de contingencia se derivan de dos acciones generales: reasignación de recursos y reprogramación de vuelos. El primero se refiere a modificar el avión y/o los tripulantes asignados a un vuelo; y el segundo, a cambiar los tiempos programados de un conjunto de vuelos (lo que en algunos casos equivale a propagar el atraso). A continuación, se detallan los principales planes de contingencia usados por las aerolíneas.

i. Rotación

Una rotación consiste en el intercambio de cadenas de vuelo entre dos aviones, de manera que el atraso total resultante disminuya. La Figura 3-8 ilustra un ejemplo de rotación. Se tiene el avión A_R afectado con un atraso en el vuelo $EZE-SCL$ que retrasa todos los vuelos posteriores (notar diferencia entre su itinerario programado y resultante). Por otra parte, se tiene el avión A_S cuyo vuelo $ARI-SCL$ resultó sin retraso. Una excelente opción de rotación es permutar los vuelos $SCL-LIM$ y $LIM-SCL$ del avión A_R con los vuelos $SCL-LSC$, $LSC-IQQ$ e $IQQ-SCL$ del avión A_S . Tal operación logra mitigar todos los atrasos reaccionarios de los vuelos afectados en el avión A_R , y permite mantener la programación de los vuelos del avión A_S .

ii. Recursos de reserva

Con el objetivo de minimizar los efectos de las interrupciones, las aerolíneas disponen de aviones y tripulantes de reserva localizados en los *hubs* de la red de vuelos.

Un avión de reserva queda estacionado en un determinado aeropuerto durante varias horas, estando disponible para operar a cualquier destino que permita su capacidad de transporte.

Los tripulantes de reserva son un grupo de tripulantes apartados especialmente para la contingencia. Durante un día laboral cumplen su jornada en la ciudad de su domicilio. Cuando son necesarios, deben ser transportados al aeropuerto para

prestar sus servicios. Por tanto, ante una interrupción debe considerarse un tiempo de alistamiento (que puede ser de hasta dos horas) desde el aviso hasta que están disponibles para la operación de un vuelo.

				T_{sim}								
Antes de rotación												
Avión Ar (Fr)	Programado	EZE	█	SCL	█	LIM	█	SCL	█	EZE		
	Operado	EZE	█	SCL	▨	LIM	▨	SCL	█	EZE		
Avión As (Fs)	Programado	ARI	█	SCL	█	LSC	█	IQQ	█	SCL	█	LSC
	Operado	ARI	█	SCL	▨	LSC	▨	IQQ	▨	SCL	█	LSC
Después de rotación												
Avión Ar (Fr)	Programado	EZE	█	SCL	█	LIM	█	SCL	█	EZE		
	Operado	EZE	█	SCL	▨	LSC	▨	IQQ	▨	SCL	█	EZE
Avión As (Fs)	Programado	ARI	█	SCL	█	LSC	█	IQQ	█	SCL	█	LSC
	Operado	ARI	█	SCL	▨	LIM	▨	SCL	█	LSC		

Figura 3-8: Ejemplo de rotación de vuelos entre dos aviones

iii. Relocalización de aviones

La relocalización de aviones consiste en trasladar un avión sin pasajeros para operar un vuelo en el que, por ejemplo, se han presentado problemas mecánicos. La operación de un vuelo sin pasajeros es obviamente de alto costo, por lo que este tipo de acción se limita a casos en el que el costo de oportunidad del vuelo afectado es alto y el gasto operacional es bajo.

iv. Reprogramación

La reprogramación establece un nuevo horario para un vuelo o una cadena de vuelos retrasada. También es posible reprogramar a pasajeros sin conexión o sobrantes por sobreventa de pasajes. En todos los casos, la reprogramación es comunicada a los pasajeros afectados, los cuales reciben una compensación por

parte de la aerolínea. Por lo general, esta es una acción de alto costo. Por ejemplo, en la figura anterior, si los vuelos *SCL-LIM* y *LIM-SCL* del avión A_R sufrieran un atraso demasiado grande como para hacer una rotación, se podrían reprogramar para el día siguiente, siendo asignados a algún avión de reserva. Como resultado adicional, el vuelo *SCL-EZE* volvería a su programación inicial.

v. **Cancelación**

La cancelación de vuelos consiste en no operar uno o más vuelos programados. Las razones para tomar esta decisión son, por lo general, de fuerza mayor. Como por ejemplo, condiciones meteorológicas adversas de alto riesgo, huelgas en aeropuertos o problemas de seguridad. La mayoría de las veces, se cancela todo un ciclo de vuelos.

3.2. Bases del modelo

El modelo de simulación presentado a continuación trata de adaptarse y representar de la mejor manera los aspectos del sistema explicados en la sección anterior, con el objetivo de estimar indicadores de robustez del itinerario.

Todo modelo de simulación discreta se basa en transiciones discretas hechas a través de eventos que modifican las variables de estado que describen al sistema. En esta sección se presentan las bases de MSI en lo referente a límites, componentes representadas, variables de estado, eventos, modelación de los atrasos y planes de contingencia, y las medidas de desempeño registradas en cada réplica.

3.2.1. Límites

En primer lugar, se supone que la aplicación del modelo será entre 3 y 12 meses previos a la operación, ya que su utilidad está enfocada a la planificación robusta. Este requerimiento de anticipación condiciona la información efectivamente

disponible y útil para representar las complejas dinámicas que se presentan el día de las operaciones. Dentro del horizonte de tiempo señalado, se supone disponible la siguiente información:

1. Itinerario programado, que puede ser visto por avión como una secuencia de vuelos, mantenimientos programados y tiempos de reserva.
2. Programación tentativa de las secuencias de vuelos conectadas por un mismo grupo de tripulantes.
3. *T/A* mínimos definidos para cada aeropuerto y flota.
4. Información histórica de la operación de vuelos. Incluye:
 - Tiempos resultantes de despegue y aterrizaje de cada vuelo.
 - Atrasos, específicamente su causa y magnitud.
 - Cantidad de pasajeros en conexión entre pares de vuelos conectados.

Esta información impone límites prácticos a lo que se puede modelar. Particularmente, no será posible representar de manera explícita las tripulaciones y los pasajeros. Tampoco hay información respecto a los procesos en tierra realizados antes de cada vuelo, ni información de la operación de otras aerolíneas, ni información referente al estado de operación de los aeropuertos o a sus complejas dinámicas internas de servicio.

La cantidad de días factibles de simular se define en base al itinerario programado. Para fines de análisis, podría ir desde un día hasta un mes. Para fines prácticos lo ideal es una semana, ya que los itinerarios de una aerolínea presentan una estructura semanal periódica. Es decir, un mismo vuelo será programado todas las semanas dentro de un mes en el mismo día y a la misma hora.

3.2.2. Componentes y variables de estado

El MSI se basa en la representación explícita de cinco componentes: aeropuertos, vuelos, conexiones, mantenimientos programados y aviones. Estos componentes se guían por el *tiempo actual de simulación* (T_{sim}), que es la principal variable de estado del sistema. Por su parte, cada componente tiene variables de estado particulares que son modificadas por los eventos del modelo de simulación.

La representación explícita de los aeropuertos tiene como objetivo modelar el estado del tiempo y la posibilidad de operación. Cada aeropuerto tiene una variable de estado que indica si es posible operar o no. Tal variable es actualizada después de una cantidad parametrizable de horas. El mecanismo de actualización es detallado en la sección 3.3.1.

El itinerario está estructurado por aviones, a los que se les asigna una lista ligada de vuelos. Para esto, se define un *vuelo raíz* por avión, que indica el inicio de su itinerario, y un *vuelo en operación*, que indica el vuelo en ejecución respecto al tiempo de simulación. Esta estructura permite recorrer todo el itinerario desde el vuelo raíz.

Un vuelo se define por un par origen destino y los tiempos característicos descritos en la sección 3.1.2 (despegue y aterrizaje programados y resultantes). Cada vuelo tiene un avión programado, al que es asignado inicialmente según el itinerario, y un avión de operación, que puede ser distinto al anterior a causa de los planes de contingencia. Además, cada vuelo tiene asociado un vuelo anterior y uno posterior, definidos según la ordenación temporal del itinerario de su avión programado. Por último, cada vuelo tiene asociado un conjunto de conexiones anteriores y posteriores, que pueden ser de tripulantes o pasajeros. Las variables de estado de un vuelo son el avión de operación y los tiempos resultantes despegue y aterrizaje. Estas variables son modificadas por las interrupciones y los planes de contingencia.

Los mantenimientos programados tienen una representación temporal idéntica a un vuelo. No obstante, se asume invariante su duración. De manera estricta un mantenimiento programado pertenece exclusivamente al avión programado y debe ejecutarse en la estación planificada. Para ligarlos al itinerario, cada mantenimiento programado tiene asociado un *vuelo anterior*. Las variables de estado de los mantenimientos son únicamente los tiempos de inicio y término resultantes.

Las conexiones tanto de tripulantes como de pasajeros se caracterizan en base a los atributos descritos en la sección 3.1.4. Cada tipo de conexión tiene una dinámica propia de propagación del atraso, las que son detalladas en la sección 3.3.2. No hay variables de estado asociadas a las conexiones. Toda la dinámica de estas es manejada desde los vuelos que las definen.

La Figura 3-9 ejemplifica la modelación de un itinerario de un avión, centrada en su vuelo en operación. Se pueden apreciar tres vuelos conectados hacia atrás (el vuelo antecesor del mismo avión, una conexión de pasajeros y una de tripulantes), y tres conectados hacia adelante (el vuelo sucesor más dos conexiones de pasajeros). Además, existe un mantenimiento programado posterior al vuelo en operación.

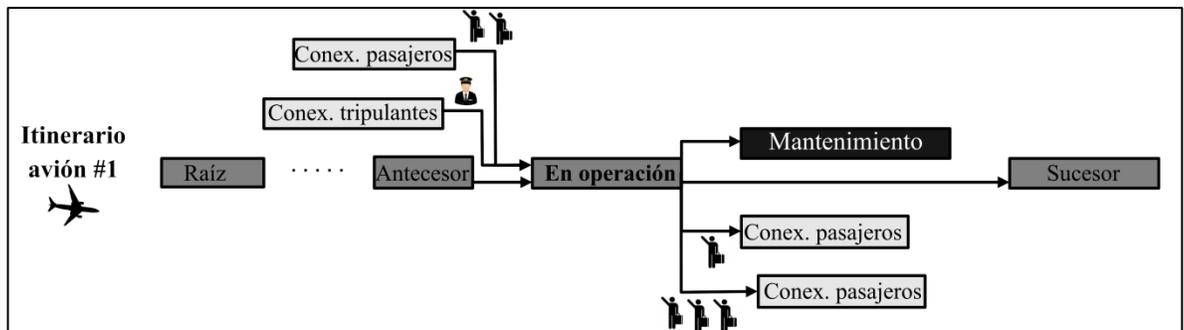


Figura 3-9: Modelación de un itinerario centrado en el vuelo en operación

3.2.3.Eventos

A través de los eventos se representan los principales procesos de un itinerario y se va guiando la simulación de manera cronológica. Cada evento tiene asociado un tiempo específico de ejecución, más un conjunto de acciones que modifican las variables de estado del sistema. Al momento de ejecutar un evento, se actualiza el tiempo actual de simulación al tiempo programado del evento.

El control de la simulación se basa en un conjunto de listas de eventos definidas por avión para cada vuelo en operación. Esta estructuración permite avanzar cronológicamente en la simulación y coordinadamente entre los aviones, actualizando el tiempo de simulación al tiempo de ejecución del evento más próximo entre todos los aviones. La simulación finalizará cuando ya no queden eventos, es decir, cuando todos los vuelos de cada avión hayan sido finalizados.

Dentro del modelo se distinguen seis tipos de eventos:

i. Iniciar vuelo (IV)

Evento asociado al tiempo en tierra de un vuelo. En primer lugar, se actualiza T_{sim} al tiempo resultante de despegue, el cual ya incorpora posibles atrasos reaccionarios. Luego, se simulan todas las interrupciones que afectan al vuelo, tanto a su despegue como a la duración de su HBT.

ii. Ejecutar despegue (ED)

Evento asociado al despegue de un vuelo. Se actualizan los tiempos resultantes de despegue y aterrizaje. Luego, se actualiza T_{sim} al tiempo resultante de despegue.

iii. Ejecutar aterrizaje (EA)

Evento asociado al aterrizaje de un vuelo. Se actualiza T_{sim} al tiempo resultante de aterrizaje y, si hubiere atraso propagado, se ejecuta el algoritmo de recuperación que simula los planes de contingencia. La propagación del atraso

continúa hasta que sea eliminado por algún plan propuesto o absorbido por alguna holgura. Finalmente, se actualiza el vuelo en operación del avión.

iv. Iniciar mantenimiento (IM)

Evento asociado al inicio del mantenimiento programado de un avión. La única acción es actualizar el tiempo de simulación al tiempo resultante del inicio del mantenimiento, el que pudo haber sido reprogramado a causa de un atraso reaccionario.

v. Finalizar mantenimiento (FM)

Evento asociado al término del mantenimiento programado de un avión. La única acción es actualizar el tiempo de simulación al tiempo resultante del fin del mantenimiento.

vi. Actualizar estado de operación (AO)

Evento asociado a la actualización del estado de operación de cada aeropuerto. Estos eventos están separados por un intervalo constante de minutos (T_{ao}), por ejemplo 360 minutos. A diferencia de los eventos anteriores, el evento *AO* es manejado de manera independiente de los aviones mediante una lista con todos tiempos de ejecución ordenados de manera cronológica.

La Figura 3-10 muestra un diagrama de flujo de la operación de un vuelo, visto como si sus eventos fueran ejecutados de manera secuencial. En la práctica, entre cada evento representado se ejecutan eventos de otros aviones. Por ejemplo, entre los eventos ED y EA de un vuelo de 10 horas de duración podría haber cientos de otros eventos. De esta manera se garantiza que el reloj de la simulación no retroceda.

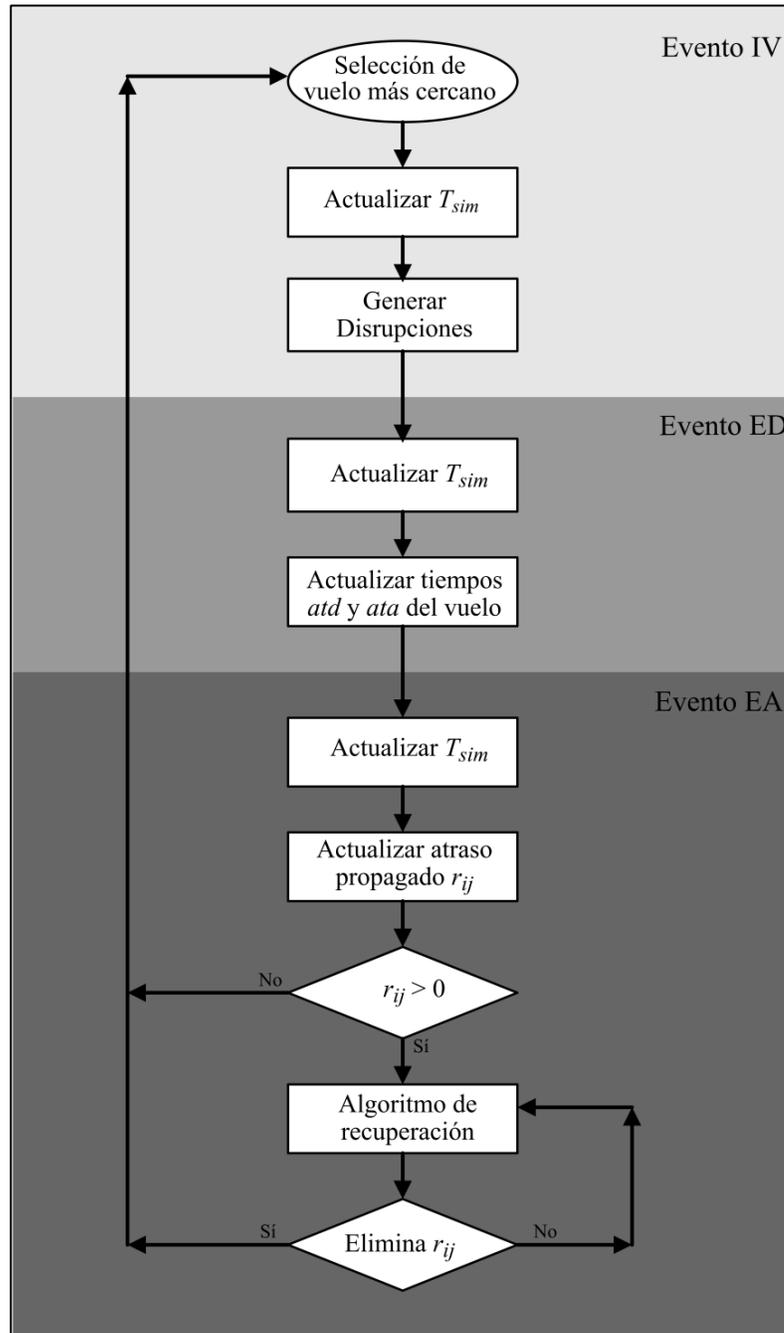


Figura 3-10: Diagrama de flujo de eventos de un vuelo

3.3. Modelación de interrupciones

Las interrupciones fueron modeladas en base al análisis de información histórica disponible de *LAN Airlines*. Para cada vuelo se tenía el registro de todas las causas de atraso posibles, junto con la magnitud del atraso asociado. Se observó en varios vuelos más de una causa de atraso simultánea, llegando incluso hasta 5 causas de atraso distintas en un mismo vuelo. Por otra parte, se observó que muchos vuelos despegaban antes de lo programado. Esta es una práctica común en las operaciones que permite ganar minutos de holgura. Si está todo listo para despegar, no se espera a que se cumpla el tiempo programado exacto para iniciar un vuelo.

Respecto a las causas mismas de atraso, se tenía registro de más de 160 causas de atraso distintas. Tales causas de atraso fueron agrupadas en 7 causas de atraso principales:

1. Reaccionario: corresponde al atraso propagado directamente debido al atraso del avión que debía operar el vuelo, sin considerar los atrasos por diferencia de HBT.
2. Conexiones: corresponde al atraso producido por espera de tripulantes y pasajeros en conexión.
3. Diferencia de HBT: corresponde al atraso propagado por el mayor tiempo de vuelo resultante del vuelo antecesor.
4. Mantenimiento: corresponde a todas las causas de atraso provocadas por desperfectos mecánicos de las aeronaves.
5. Operaciones en aeropuerto: corresponde a todas las causas de atraso asociadas a procesos aeroportuarios. Sus principales componentes incluyen control de tráfico aéreo y embarque/desembarque de pasajeros, carga/descarga de equipaje.

6. Meteorología: corresponde a todas las causas de atraso asociadas a condiciones meteorológicas que impiden el curso normal de las operaciones. Estas incluyen principalmente la presencia de neblina, hielo en la pista y fuertes vientos.
7. Otras: corresponde a las causas de atraso que no caben dentro de las categorías anteriores. Por ejemplo, huelgas, pasajeros enfermos, daños externos a la aeronave, etc.

De las causas de atraso anteriores, las últimas cinco corresponden a atrasos independientes generados aleatoriamente a partir de distribuciones calibradas con información histórica. En cambio, tanto el atraso reaccionario como el de conexiones son dependientes de los atrasos anteriores, ya que se obtienen de interacciones explícitas entre los componentes del sistema. A continuación, se detalla la modelación de cada una de las causas de atraso.

3.3.1. Atrasos independientes

Metodología general

De manera general, para cada causa de atraso independiente incluida en MSI, se utilizó una metodología basada en la generación de variables aleatorias a partir de información histórica. Los detalles de tal metodología se detallan a continuación.

Sean:

H: conjunto datos de información histórica de todos los vuelos.

D: conjunto de disrupciones consideradas.

F: conjunto de atributos asociados a un dato histórico. Por ejemplo $F = \{flota, fecha, hora, mes, aeropuerto\}$.

C_f : conjunto de valores posibles del atributo f . Por ejemplo, para el atributo *mes* se tiene que $C_{mes} = \{Enero, Febrero, \dots, Diciembre\}$.

H_d : conjunto de datos históricos con atraso debido a una disrupción de tipo d .

$H_{c,f}$: partición de H respecto al valor f del atributo C . Por ejemplo, $H_{mes,enero}$ equivale a los datos de todos los vuelos del mes de enero de cualquier año.

F_d : conjunto de factores explicativos de la disrupción de tipo d . Por ejemplo: {aeropuerto origen, mes del año}.

$C_{\{F_d\}}$: conjunto de las combinaciones posibles entre los factores explicativos de la disrupción de tipo d . Por ejemplo, si $F_d = \{mes, dia\ de\ la\ semana\}$ entonces $C_{\{F_d\}} = \{\{Enero, Lunes\}, \{Enero, Martes\}, \dots, \{Diciembre, Domingo\}\}$.

$H_{C\{F_d\}}$: partición de H respecto a los valores posibles de F_d . Por ejemplo, $H_{\{Enero, Lunes\}}$ equivale a todos los datos de todos los vuelos del mes de enero operados en un día lunes de la semana.

$H_{d,C\{F_d\}}$: partición de H_d respecto a los valores posibles de F_d . Por ejemplo, $H_{Meteorología, \{Santiago, Enero\}}$ es el conjunto de todos los datos que presentaron una disrupción meteorológica en el aeropuerto de Santiago durante el mes de enero.

$P_d(C\{F_d\})$: función discreta de probabilidades de ocurrencia de una disrupción de tipo d . Se asume que para cada combinación de factores en $C\{F_d\}$ existe una única probabilidad de ocurrencia de la disrupción de tipo d .

Para cada disrupción de tipo d , la metodología propuesta consiste en:

1. Determinar el mínimo conjunto de factores explicativos que permitan explicar la variabilidad observada en los datos de sus atrasos. Es decir, determinar F_d .
2. Obtener los conjuntos de datos $H_{d,C\{F_d\}}$ y $H_{C\{F_d\}}$.
3. Construir $P_d(C\{F_d\})$. Para cada subconjunto de factores $\psi \in C\{F_d\}$ se tiene que:

$$p_{d,\psi} = \frac{\#(H_{d,\psi})}{\#(H_\psi)} \quad (3.14)^6$$

En caso que $\#(H_\psi) = 0$ se asume $p_{d,\psi} = 0$.

⁶ El operador $\#()$ indica para un determinado conjunto su cardinalidad o cantidad de elementos.

4. Determinar la distribución del atraso en base a los datos de $H_{d,C\{F_d\}}$.
Dependiendo de la función determinada para el atraso, calibrar los parámetros de la distribución con los datos de $H_{d,C\{F_d\}}$ (por ejemplo, media muestral y varianza).

La determinación de factores F_d es clave en la modelación de cada disrupción. Se debe considerar un conjunto de factores que expliquen la variabilidad de los datos, pero que minimicen la cantidad de subconjuntos de factores ψ sin datos.

Aplicación

Esta metodología fue aplicada para generar aleatoriamente disrupciones asociadas a cada una de las 5 causas de atraso independientes. Además, se define el *Adelanto* como una variable aleatoria usada para simular los despegues previos al tiempo programado de cada vuelo.

Para cada una de las variables aleatorias se determinó su conjunto de factores explicativos en base a la experiencia de analistas de la aerolínea. Por otra parte, la distribución de las variables aleatorias fue calibrada con herramientas estadísticas para realizar test de bondad. La Tabla 3-1 muestra los conjunto de factores explicativos y distribuciones calibradas para cada variable aleatoria.

Como se mencionó anteriormente, el estado del tiempo de cada aeropuerto es actualizado cada cierto intervalo constante de minutos. Esto se hace en base a la probabilidad de *Meteorología* conocida para cada aeropuerto, mes y periodo del día, las que son obtenidas cada vez que se ejecuta un evento de actualización operacional. Luego, para cada aeropuerto, si esta probabilidad es menor a una variable aleatoria uniforme $U(0,1)$, se establecerá su estado del tiempo como malo hasta la próxima actualización. En lo posterior, cada vuelo que salga o llegue a un aeropuerto afectado tendrá obligatoriamente una disrupción meteorológica de una duración generada aleatoriamente en base a la distribución log-normal correspondiente. Si tanto el aeropuerto de origen como el de destino

no están operativos, la magnitud del atraso total será el máximo entre los atrasos generados en cada aeropuerto.

Tabla 3-1: Factores explicativos y distribución asociados a cada variable aleatoria

Variable aleatoria	Factores explicativos	Distribución
Diferencia HBT	Flota Par origen destino	Normal
Mantenimiento	Flota	Log-normal
Operaciones en aeropuerto	Aeropuerto origen Mes Hora del día	Log-normal
Meteorología	Aeropuerto origen Aeropuerto destino Mes Periodo del día ⁷	Log-normal
Otros	Aeropuerto origen Hora del día	Log-normal
Adelanto	Aeropuerto origen	Gamma

Por otra parte, dentro del evento *Iniciar Vuelo* se generan los atrasos independientes de cada vuelo. En primer lugar, se extraen los factores propios del vuelo en operación, (flota, origen, destino, hora, etc.) y se obtienen los parámetros de cada disrupción (probabilidad, media y desviación estándar). En el caso del HBT se genera directamente la magnitud del tiempo de vuelo con la media y desviación estándar calibrada, sin importar la probabilidad. Para el resto de las disrupciones (excepto *Meteorología*) si la probabilidad de disrupción es menor a una variable aleatoria uniforme $U(0,1)$ se genera un atraso con la media y desviación estándar correspondiente. Luego, se asume que el atraso total será la suma de todos los atrasos generados, incluyendo el posible atraso de

⁷ Se consideran 4 periodos del día: mañana, día, tarde y noche.

Meteorología. Por último, si es cero el atraso resultante (independiente más reaccionario), se genera un *Adelanto* aleatorio si la probabilidad de adelanto, dado que no hubo atraso, es menor a una variable aleatoria uniforme $U(0,1)$.

3.3.2. Atrasos reaccionarios

En MSI el atraso reaccionario se obtiene en base a la propagación de los atrasos independientes en la red de vuelos. Según la ecuación (3.12) y asumiendo que no hay atraso reaccionario inicial:

$$r_{i,j} = \max\{0, m_i + hbtd_i - sts_{ij}\} \quad (3.15)$$

Puede observarse que el atraso reaccionario depende de dos variables aleatorias independientes: m_i (atraso independiente en el despegue) y $hbtd_i$ (diferencia de HBT).

Para el caso del atraso por conexiones, dada una conexión c que conecta el vuelo i con el j , el atraso reaccionario por conexiones se obtiene de manera similar a (3.15), reemplazando la holgura sts_{ij} por el tiempo de interconexión t_c .

$$r_{i,j} = \max\{0, m_i + hbtd_i - t_c\} \quad (3.16)$$

En el caso particular de las conexiones de pasajeros que cambian de avión, el atraso reaccionario de la conexión depende de una decisión operacional. El operador central del CCO debe evaluar si asumir el atraso y esperar a los pasajeros, o no retrasar el vuelo y que los pasajeros pierdan el vuelo. Tal decisión es incorporada a MSI en base a la siguiente metodología.

Metodología de decisión para conexiones de pasajeros

Considérese la notación para las conexiones representada en la Figura 3-6, más los siguientes atributos:

\hat{r}_c : Atraso reaccionario potencial (según ecuación 3.15).

\hat{p}_c : Cantidad de pasajeros. Variable aleatoria de distribución normal con media μ_c y desviación estándar σ_c calibrada en base a información histórica.

z_c : Cantidad de horas entre el inicio del vuelo v_c^+ de la conexión y el vuelo más próximo que tenga el mismo par origen destino que v_c^+ .

En base a estos atributos se decidirá cuántas horas se está dispuesto a esperar a los pasajeros conectados. Para esto se definen dos conjuntos:

R_p : conjunto de rangos de cantidad de pasajeros. Por ejemplo: $\{[0,10), [10,20), [20,\infty]\}$.

R_z : conjunto de rangos de cantidad de horas el hasta próximo vuelo del mismo par origen destino. Por ejemplo: $\{[0,2), [2,4), [4,\infty)\}$.

E : matriz de cantidad horas de espera definida sobre los rangos R_p y R_z . Tal matriz representa el nivel de tolerancia operacional de horas que se está dispuesto a atrasar un vuelo para esperar a un grupo de pasajeros. La Tabla 3-2 presenta un ejemplo que permite visualizar esta matriz.

Esta matriz está compuesta por elementos $e_{p,z}$ que indican la cantidad de horas que se está dispuesto a esperar a una conexión c , tal que (\hat{p}_c, z_c) pertenecen al rango de pasajeros y horas hasta el próximo vuelo que definen (p,z) .

Entonces, para cada conexión de pasajeros c existirá un valor e_c de tolerancia operacional de espera del vuelo posterior v_c^+ . Finalmente, se esperará v_c^+ si $\hat{p}_c \leq e_c$. En caso contrario, se romperá la conexión y los pasajeros deberán esperar hasta el próximo vuelo. Por ejemplo, en base a la tabla anterior, si un vuelo A viene atrasado 3 horas con 15 pasajeros que conectan con un vuelo B que se repetirá dentro de 6 horas, la matriz E indicará para tales condiciones esperar a lo más 2 horas, por lo que el vuelo B se irá sin esperar a los pasajeros conectados, los que deberán esperar hasta el próximo vuelo.

Tabla 3-2: Ejemplo matriz de tiempo de espera de pasajeros en conexión (hrs)

		Rango horas hasta próximo vuelo		
		[0,2)	[2,4)	[4,∞)
Rango pasajeros	[0,10)	0	0.5	1
	[10,20)	0.5	1	2
	[20,∞)	1	2	3

La calibración de la matriz de espera requiere la experiencia de los operadores del CCO, y debe considerar la componente de costo asociada al *trade off* de esperar a un grupo pasajeros contra hacerlos esperar el próximo vuelo.

3.4. Modelación de planes de contingencia

La modelación de planes de contingencia ante interrupciones se centra en el algoritmo de recuperación ejecutado en el evento *Ejecutar Aterrizaje* (véase evento *EA* en Figura 3-10). El principal objetivo del algoritmo de recuperación es minimizar el atraso propagado, a través de reprogramaciones de los aviones y tripulantes en cada vuelo potencialmente afectado. Para los aviones se incluyen dos tipos de planes posibles: rotaciones de vuelos y uso de aviones de reserva. Para los tripulantes, dado que no es conocida su ruta diaria de trabajo, se simula solamente el uso de tripulantes de reserva. La Figura 3-11 muestra el flujo de decisión de los distintos planes de contingencia incluidos en el algoritmo de recuperación.

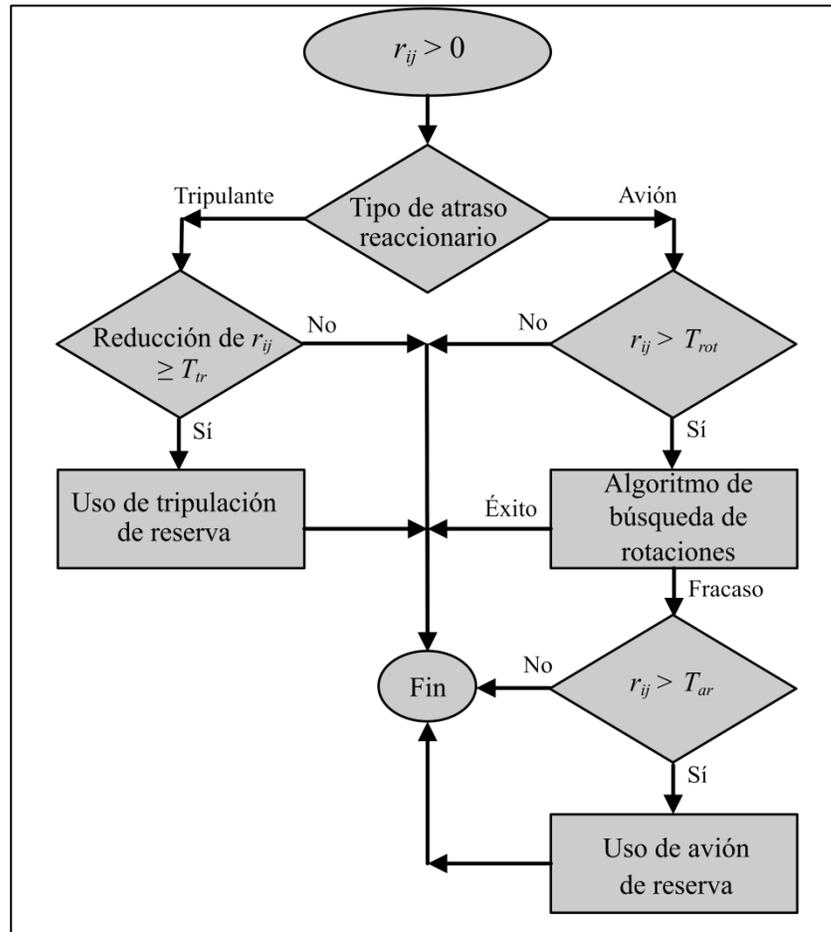


Figura 3-11: Algoritmo de recuperación

La cancelación de vuelos y relocalización de aviones son planes que no se incluyen en este modelo. Estos no fueron simulados debido a que son planes poco frecuentes y requieren de una evaluación económica en base a información no disponible en el horizonte de planificación. En particular, la cancelación de vuelos se hace ante algunos eventos aislados que inhabilitan la operación durante largos periodos de tiempo (por ejemplo, huelgas o fenómenos naturales). Esta información no está registrada en los datos de operación de cada vuelo. Por otra parte, la relocalización de aviones se hace para casos particulares ocurridos en aeropuertos de tránsito, en los que no es posible operar un vuelo (por ejemplo,

debido a problemas mecánicos ocurridos en un aeropuerto de tránsito), y donde el costo asociado a los pasajeros afectados es mayor al costo de operar un avión vacío. Para estos fines se requiere información particular de los costos de atraso y compensaciones por tipo de pasajero y aeropuerto, definidos para distintos niveles de retraso.

3.4.1. Rotación

Una rotación es un intercambio de cadenas de vuelo entre dos aviones realizada para producir una mejora en las condiciones operacionales mediante la reducción del atraso total provocado por un atraso reaccionario.

Cada vez que un atraso reaccionario supera cierto valor definido de tolerancia de rotación (T_{rot}), se ejecuta el algoritmo de búsqueda de rotaciones, mediante el cual se determina la mejor rotación posible en un instante dado de la simulación. El algoritmo de búsqueda de rotaciones tiene 4 etapas: búsqueda exhaustiva, filtro por restricciones, evaluación y aplicación. Antes de explicar cada una de estas etapas, considérese la siguiente notación.

A : conjunto de aviones del itinerario.

A_R : avión afectado por el atraso reaccionario.

A_S : avión de búsqueda seleccionado.

F_R : flota a la que pertenece A_R .

F_S : flota a la que pertenece A_S .

p_{F_1, F_2} : compatibilidad operacional entre flotas F_1, F_2 . 1 si lo es, 0 si no.

q_{A_1, A_2} : compatibilidad operacional entre aviones A_1, A_2 . 1 si lo es, 0 si no.

V_i^R : vuelo inicial de la cadena a rotar de A_R .

V_i^S : vuelo inicial de la cadena a rotar de A_S .

V_f^R : vuelo final de la cadena a rotar de A_R .

V_f^S : vuelo final de la cadena a rotar de A_S .

N_R : número de vuelos de A_R seleccionados para una rotación.

N_S : número de vuelos de A_S seleccionados para una rotación.

W_{RS} : conjunto de rotaciones avión A_R y A_S .

W_R : conjunto de todas las rotaciones para A_R . Se tiene que $W = \bigcup_{s \in A} W_{RS}$

G_w : minutos de atraso recuperados si se efectúa la rotación w .

Cabe señalar, que el valor G_w de cada rotación es obtenido mediante una evaluación de la aplicación de la rotación al itinerario, mediante la cual se obtiene la diferencia de minutos de atraso totales del sistema que se obtendrían en caso de aplicar tal rotación.

i. Búsqueda exhaustiva

Para cada avión A_S distinto de A_R , se determina el conjunto W_{RS} de rotaciones útiles, es decir, que para toda rotación w en W_{RS} :

1. El aeropuerto de origen de V_i^R sea el mismo de V_i^S , y que el aeropuerto de destino de V_f^R sea el mismo de V_f^S . Por ejemplo, el aeropuerto de la rotación de la Figura 3-8 es *SCL*.
2. El tiempo de despegue programado de todos los vuelos de la rotación sean mayores que el tiempo actual de simulación (T_{sim}).
3. $G_w > 0$ para toda rotación w en W_{RS} .

ii. Filtro por restricciones

Cada rotación w en W se considera válida siempre y cuando cumpla las siguientes restricciones:

1. Factibilidad de mantenimiento: se debe asegurar que no hayan mantenimientos programados entre las cadenas de vuelos a rotar. Como los mantenimientos

programados son propios de cada avión, al reasignar vuelos entre aviones se impediría la ejecución del mantenimiento.

2. Factibilidad de conexiones: se debe asegurar que los vuelos extremos de las cadenas a rotar $(V_i^R, V_i^S, V_f^R, V_f^S)$, no sean parte de vuelos de tránsito, es decir, que no corten conexiones que compartan el mismo avión.
3. Compatibilidad de flotas: las flotas F_R y F_S de los aviones de la rotación deben ser compatibles, es decir, que $p_{F1,F2}=1$. Este parámetro depende principalmente de la autonomía y capacidad de pasajeros de cada flota. Por ejemplo, la flota *Airbus 320* es compatible con la flota *Airbus 318*.
4. Compatibilidad de aviones: los aviones a rotar A_R y A_S deben ser compatibles, es decir, que $q_{F1,F2}=1$. Este parámetro depende de restricciones legales asociadas a cada avión. Se tiene que cada avión pertenece a un operador comercial de la aerolínea, el cuál puede operar en un determinado conjunto de países. Luego, en función de ese operador comercial se establecen restricciones a algunos aviones para entrar a determinados espacios aéreos.

iii. Evaluación

Como resultado de la fase anterior se tendrá un conjunto W reducido de rotaciones válidas. Para cada rotación w en W se define su *valor discriminante* como:

$$D(w) = G_w - k \cdot N_R(w) \cdot N_S(w) \quad (3.17)$$

Donde k es el *factor discriminante*, parámetro que debe ser calibrado de manera que sea razonable la relación entre la ganancia en minutos de atraso y la cantidad de vuelos rotados.

Esta función refleja el hecho de que es preferible hacer una rotación con pocos vuelos que una de muchos vuelos cuando la ganancia de minutos de atraso es la misma. En este sentido, el parámetro k se asocia a la relación entre el costo

operacional de reasignar los vuelos de la rotación entre los aviones involucrados, y el costo de un minuto de atraso.

Luego, la mejor rotación será la que maximice el valor discriminante $D(w)$ y que además cumpla que $D(w) \geq 0$. Así, $D(w)$ es un filtro adicional que fija una cota inferior para la ganancia de minutos requerida en función de la cantidad de vuelos rotados en cada avión.

iv. Aplicación

Finalmente, se aplica la mejor rotación dentro del escenario simulado. Para esto se reasignan los vuelos entre V_i^R y V_f^R al avión A_S , y entre aquellos entre V_i^S y V_f^S al avión A_R , tratando ajustar para cada vuelo el tiempo resultante de despegue lo más cercano posible al programado.

Si como resultado del algoritmo no hubiera ninguna rotación al final de cualquiera de sus etapas, se propaga el atraso reaccionario, y se aplica el algoritmo de recuperación a los vuelos sucesores bajo la misma lógica inicial, hasta que no quede atraso reaccionario.

En el caso de la Figura 3-8 se tiene que $N_R=2$ y $N_S=3$. Si suponemos $k=2$, la rotación sería aplicada sólo si la reducción de minutos de atraso G_w es al menos de 12 minutos, lo que implica $D(w) \geq 0$.

3.4.2. Uso de avión de reserva

El uso de aviones de reserva puede ser visto como un caso particular de rotación en la que uno de los aviones sólo recibe un conjunto de vuelos. Como restricción adicional, se requiere que el inicio y fin de la cadena de vuelos intercambiada debe coincidir con la base del aeropuerto en el que está posicionado el avión de reserva.

Este plan se ejecutará siempre y cuando no haya ninguna rotación factible y, además, el atraso incidente supere la tolerancia de aviones de reserva (T_{ar}).

3.4.3. Uso de tripulación de reserva

Los tripulantes de reserva están localizados en los principales centros de conexión del itinerario y se usan en dos escenarios distintos.

En primer lugar, su uso está asociado al uso de aviones de reserva. Se asume que cada avión de reserva tiene disponibles tripulantes de reserva para operar los vuelos reasignados.

En segundo lugar, se usan turnos de reserva para evitar la propagación de atrasos reaccionarios por conexiones de tripulantes. En este caso, debe considerarse el tiempo de setup del inicio del turno (T_{setup}), que incluye el transporte más el equipamiento de los tripulantes. Se asume que será conveniente llamar a un turno de reserva cuando la reducción de minutos de atraso sobre el vuelo directamente afectado sea mayor a cierto mínimo de minutos definidos por el parámetro T_{tr} . En términos analíticos, se activará un turno de reserva cuando se cumpla la siguiente condición:

$$\max(ata_{v_-} + t_c - atd_{v_+}, 0) - \max(T_{sim} + T_{setup} - atd_{v_+}, 0) \geq T_{tr} \quad (3.18)$$

Dónde:

$\max(ata_{v_-} + t_c - atd_{v_+}, 0)$: atraso reaccionario propagado debido a la conexión.

$\max(T_{sim} + T_{setup} - atd_{v_+}, 0)$: atraso potencial provocado por el tiempo de setup del turno de reserva. Se supone que el llamado al turno se efectúa en el tiempo actual de simulación T_{sim} .

Cabe destacar que hay un stock limitado de tripulantes de reserva en cada centro de conexión. Luego, en primera instancia, será posible activar un turno de reserva siempre y cuando haya algún tripulante disponible.

3.5. Medidas de desempeño

Las medidas de desempeño obtenidas de MSI se relacionan con la robustez del itinerario. Éstas se dividen en tres grupos: puntualidad, minutos de atraso y estadísticas de algoritmo de recuperación.

Dentro de la simulación cada una de estas medidas es una variable aleatoria. Para que los resultados simulados tengan relevancia estadística es necesario correr varias réplicas. A continuación, se describen las medidas de desempeño capturadas dentro de cada réplica de simulación.

3.5.1. Puntualidad

La puntualidad es el principal indicador del nivel de servicio de las aerolíneas. También conocida como *On Time Performace (OTP)*, la puntualidad de un itinerario se define como el porcentaje de vuelos que presentan un atraso menor o igual a un determinado estándar de minutos de atraso. Así, por ejemplo, *OTP15* es el porcentaje de vuelos que despegan con un atraso menor o igual a 15 minutos. Para fines de control y gestión, la puntualidad se estima para diversos subconjuntos del itinerario, por ejemplo, por flota, matrícula, aeropuerto, día de la semana, hora del día, etc.

En términos analíticos, para cada réplica de la simulación se definen:

F : subconjunto de vuelos sobre los que se estima la puntualidad.

N : total de vuelos en F .

$d_{t,f}$: minutos de desviación del tiempo resultante de despegue con respecto al tiempo programado de despegue.

α : estándar de puntualidad

$\delta_f(\alpha)$: función que indica para el vuelo f si cumple o no el estándar α de puntualidad. Es decir:

$$\delta_f(\alpha) = \begin{cases} 1 & \text{si } dtd_f \leq \alpha \\ 0 & \text{si no} \end{cases} \quad (3.19)$$

En base a estos parámetros se estima la puntualidad como:

$$OTP_F(\alpha) = \frac{\sum_{f \in F} \delta_f(\alpha)}{N} \quad (3.20)$$

Por otra parte, se define la *impuntualidad (IMP)* como el suplemento de la puntualidad. Es decir:

$$IMP_F(\alpha) = 1 - OTP_F(\alpha) = 1 - \frac{\sum_{f \in F} \delta_f(\alpha)}{N} \quad (3.21)$$

En particular, interesa conocer cómo se distribuye la impuntualidad entre todas las posibles causas de atraso. Tal concepto será llamado *explicación de la impuntualidad*, y estará en función del estándar de puntualidad α , y de una disrupción de tipo d . Sea:

m_f^d : minutos de atraso sobre el vuelo f atribuidos a la disrupción de tipo d .

$\varphi_f(d, \alpha)$: función que indica para el vuelo f qué porcentaje de atraso es explicada por la disrupción de tipo d , siempre que el atraso total no cumpla el estándar α de puntualidad. Es decir:

$$\varphi(p, \alpha) = \begin{cases} \frac{m_f^d}{dtd_f} & \text{si } dtd_f > \alpha \\ 0 & \text{si no} \end{cases} \quad (3.22)$$

Luego, la explicación de la impuntualidad de la disrupción tipo d será:

$$IMP_F(d, \alpha) = \frac{\sum_{f \in F} \varphi(d, \alpha)}{N} \quad (3.23)$$

Los estándares de puntualidad calculados en cada réplica son *OTPO*, *OTP15* y *OTP60*. En particular, como medida de robustez del itinerario interesa la explicación de la impuntualidad asociada a los atrasos reaccionarios y a los independientes para cada uno de los estándares anteriores.

3.5.2. Minutos de atraso

Los minutos de atraso son una medida absoluta del atraso sobre un itinerario o algún subconjunto de vuelos. En base a la notación definida para la puntualidad, se define la cantidad de minutos de atraso de disrupción de tipo d sobre un subconjunto de F del itinerario como:

$$MA_F(d) = \sum_{f \in F} m_f^d \quad (3.24)$$

En particular, en cada réplica se estima el total de minutos de atrasos reaccionarios e independientes, pudiéndose desagregar por flota, avión, aeropuertos, etc.

3.5.3. Estadísticas de algoritmo de recuperación

Dentro de cada réplica de simulación se obtiene información de cada rotación realizada. A partir de esta información se obtiene:

1. Promedio de rotaciones diarias realizadas.
2. Promedio de minutos de atraso reaccionario incidente por rotación.
3. Promedio de vuelos rotados por rotación.
4. Promedio de vuelos beneficiados por rotación, donde un vuelo beneficiado es todo aquel que logra reducir parte o la totalidad de su atraso.
5. Promedio de minutos de atraso disminuidos por rotación.

Ante distintos itinerarios, estas métricas permiten comparar la complejidad operacional de cada itinerario. Mientras más complejo sea el escenario eventualmente se harán más rotaciones. Es esperable que una mejora proactiva en la robustez del itinerario reduzca consecuentemente la carga operacional asociada a la gestión de disrupciones.

3.6. Validación

En esta sección se presenta la metodología y resultados de la validación de MSI. La metodología presentada permite detectar fortalezas y debilidades del modelo, que deben considerarse posteriormente en la optimización robusta que lo usa.

En primer lugar, hay que destacar que actualmente existe una versión de MSI adaptada para *LAN Airlines*, una de las principales aerolíneas de Latinoamérica. MSI ha sido usado para variados análisis de robustez de itinerarios como apoyo a la toma de decisiones. Por tanto, este modelo ha sido validado por analistas del sector de las aerolíneas.

No obstante, todo modelo de simulación requiere de un proceso de validación que certifique la calidad del modelo. Sargent R. (2008) propone que un modelo es conceptualmente válido si:

1. Las teorías y supuestos que sustentan el modelo son correctos.
2. La representación de entidades, estructuras, lógica y relaciones matemáticas y causales del modelo son razonables para su finalidad.

Pero, más allá de los conceptos e interacciones representadas en el modelo, es preciso verificar que su aplicación a situaciones reales de resultados coherentes. A continuación, se explica la metodología usada de validación.

3.6.1. Metodología

La metodología de validación propuesta se basa en los siguientes dos métodos planteados por Sargent R. (2008):

1. Validación de eventos: los eventos generados por el modelo son comparados con las ocurrencias históricas para determinar si son similares.
2. Validación predictiva: el modelo es usado para predecir el comportamiento del sistema. Luego, se compara con los datos históricos.

El primer método se aplica para validar la correcta generación de interrupciones y propagación del atraso reaccionario. También, se aplica para validar la correcta ejecución del algoritmo de recuperación. El segundo método se aplica para validar la puntualidad de distintos itinerarios. Si la generación de interrupciones estuviera sesgada, habría un consecuente traspaso de error a la puntualidad. No obstante, una generación de atrasos insesgada no garantiza que la puntualidad sea correcta, debido a las dinámicas internas del sistema representadas a través del modelo.

Se realizaron tres pruebas sobre itinerarios de marzo, junio y julio del año 2009 respectivamente. La Tabla 3-3 muestra información referente al tamaño de cada instancia simulada.

Tabla 3-3: Descripción de instancias utilizadas en la validación de MSI

Instancia	1	2	3
Mes	Marzo	Junio	Julio
Días	12	9	8
Flotas	5	5	5
Aviones	81	86	90
Aeropuertos	70	73	71
Vuelos	4.231	3.133	3.114
Conexiones pasajeros	825	636	831
Conexiones tripulantes	152	58	85
Aviones reserva diarios	0	1	0
Tiene mantenimientos programados	No	Sí	No

En cada prueba se hicieron 100 réplicas de simulación. Los parámetros específicos de la simulación y la matriz de espera de pasajeros se resumen en las tablas 3-4 y 3-5 respectivamente.

En los tres casos de prueba se calibró un único set de parámetros para las distribuciones que generan las distintas interrupciones. La calibración se basó en

un set de datos correspondientes a la operación de la aerolínea entre los años 2005 y 2008.

La Tabla 3-6 muestra aspectos relevantes de la calibración, como la cantidad de datos disponibles, la cantidad de calibraciones requeridas y efectivamente ajustadas con significancia estadística. La baja proporción de calibraciones realizadas de algunas disrupciones se debe a la operación poco frecuente en algunos aeropuertos, y otras al hecho objetivo de que no hay registro de disrupciones. Por ejemplo, entre las 1:00 AM y 6:00 AM no hay operación en ningún aeropuerto; también, en los meses de verano no hay disrupciones meteorológicas.

Tabla 3-4: Parámetros utilizados en la validación de MSI

Parámetro	Valor
Tolerancia rotaciones	10 min
Tolerancia avión de reserva	30 min
Tolerancia conexión tripulantes	10 min
Factor discriminante (k)	2
Turnos de reserva	2
Tiempo setup tripulantes de reserva	2 horas

Tabla 3-5: Matriz de tiempo de espera de pasajeros para validación de MSI (hrs)

		Rango horas hasta próximo vuelo		
		[0,4)	[4,24)	[24,∞)
Rango pasajeros	[0,20)	0	0,25	2
	[20,40)	0	0,5	2
	[40,∞)	0,25	1	10

Tabla 3-6: Calibración de variables aleatorias

Variable Aleatoria	Total datos	% relativo total vuelos	Calibraciones requeridas	Calibraciones efectivas
HBT	438.705	100%	462	462
Mantenimiento	19.503	4,4%	5	5
Operaciones en aeropuerto	74.027	16,9%	47.432	12.278
Meteorología	10.667	2,4%	8.544	1.031
Otros	15.602	3,6%	1.440	228
Adelanto	205.017	46,7%	89	81

Como se mencionó, los aspectos a validar del modelo serán:

1. Puntualidad: Se valida comparando la puntualidad real con la del modelo. Los estándares de puntualidad considerados serán *OTP0*, *OTP15* y *OTP60* sobre dos niveles de agregación: total y aeropuerto (se toman los 3 más importantes).
2. Causas de atraso: Se valida comparando la explicación de la impuntualidad real contra la simulada, para cada uno de los estándares señalados. En este caso sólo se utiliza el nivel de agregación total.
3. Algoritmo de recuperación: se muestran los estadísticos del algoritmo de recuperación referidos en la sección 3.5.3. Interesa valorar el impacto del algoritmo, considerando que cada día se ejecutan entre 8 y 12 rotaciones. Este dato se obtuvo de una entrevista con el operador central del CCO. Por otra parte, interesa conocer el impacto del algoritmo, comparando la puntualidad global entre dos escenarios: uno con y otro sin la aplicación del algoritmo.

3.6.2. Resultados

i. Puntualidad total

La Tabla 3-7 muestra los resultados generales de puntualidad para cada instancia y estándar de puntualidad. Para el estándar *OTP0* se observa que en promedio se

subestima la puntualidad de cada instancia, lo que ocurre en menor medida para el estándar *OTP15*. Esto se atribuye a que la puntualidad del periodo de calibración fue, en promedio, menor a la registrada el año 2009.

Tabla 3-7: Resultados validación puntualidad total

Estándar	Instancia	Puntualidad observada	Puntualidad simulada	Diferencia	Intervalo de confianza (95%)	Precisión relativa
OTPO	1	74,0%	58,5%	15,5%	58,1% - 58,9%	0,6%
	2	63,5%	59,1%	4,4%	58,7% - 59,6%	0,8%
	3	69,6%	58,5%	11,1%	58,1% - 59,0%	0,7%
OTP15	1	87,7%	85,0%	2,7%	84,5% - 85,6%	0,7%
	2	86,3%	84,1%	2,2%	83,5% - 84,5%	0,7%
	3	88,1%	84,3%	3,8%	83,6% - 85,0%	0,8%
OTP60	1	95,6%	97,1%	-1,5%	96,9% - 97,3%	0,2%
	2	96,3%	95,9%	0,4%	95,6% - 96,2%	0,3%
	3	96,2%	96,2%	0,0%	95,9% - 96,5%	0,3%

Además, como se observa en la Figura 3-12, la variabilidad histórica de la puntualidad mensual es mayor mientras menor sea el estándar. Así mismo, se observa que las diferencias de puntualidad aumentan a medida que baja el estándar utilizado. Si bien no hay exactitud predictiva en algunos estándares, esto no invalida el modelo, ya que las diferencias de estimación no afectan su finalidad. Lo que interesa es comparar itinerarios estructuralmente distintos en términos de robustez frente a interrupciones, y no pronosticar la puntualidad. En este sentido, MSI está hecho para replicar las causas de atraso independientes del pasado, y no para anticipar variaciones futuras de estas causas de atraso.

Cabe destacar que los niveles de precisión relativa son bajos, lo que es bueno, considerando que se realizaron 100 réplicas por experimento. A pesar de que cada intervalo de confianza es estrecho, los rangos de variación observados dentro de las réplicas son del orden de magnitud presente en la puntualidad histórica.

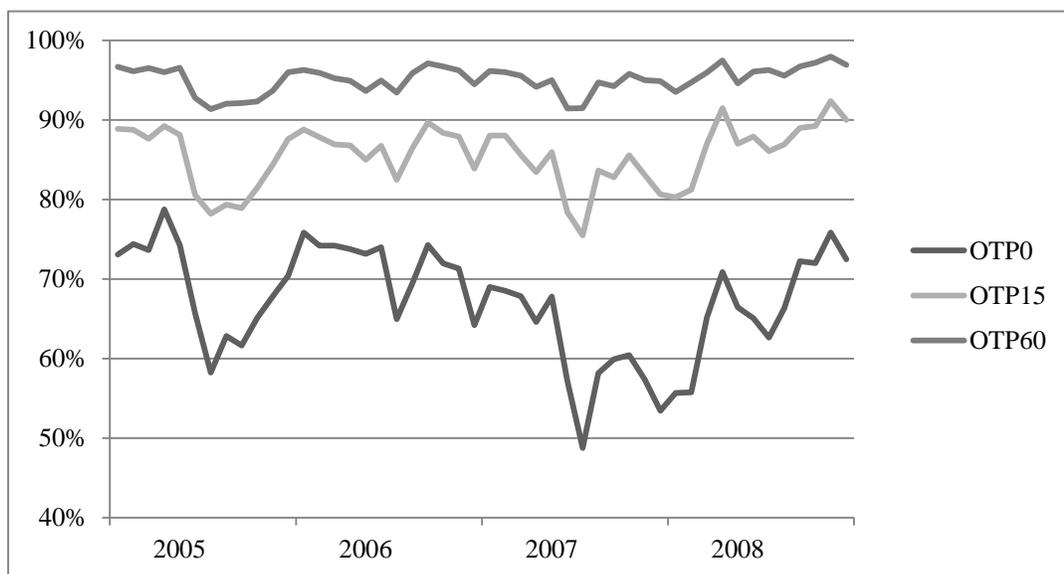


Figura 3-12: Variación histórica de la puntualidad mensual entre los años 2005 y 2008

ii. Puntualidad aeropuertos principales

La Tabla 3-8 presenta los resultados de puntualidad de cada instancia, obtenidos para los principales aeropuertos en que opera la aerolínea: Santiago (SCL), Lima (LIM) y Buenos Aires (AEP).

En este caso se puede observar la alta variabilidad de la puntualidad entre cada aeropuerto, lo que valida los esfuerzos en la modelación de las interrupciones para rescatar su variabilidad.

De manera similar al caso anterior, la exactitud predictiva del modelo es baja, aunque en algunos casos hubo bastante cercanía a la realidad. No obstante, tanto las altas como las bajas diferencias pueden atribuirse más a la variabilidad real de la puntualidad que a errores en el modelo. En particular, la puntualidad OTP0 del tercer aeropuerto fue en todos los casos subestimada. Esto se debe a que los años 2006 y 2007 los niveles de puntualidad en esta estación fueron muy bajos (del orden del 50%) en comparación a los observados el año 2009.

Finalmente, se observa que la magnitud de las diferencias decrece a medida que el estándar de puntualidad es menos exigente. En particular, el estándar OTP60 presenta las menores diferencias en cada instancia de prueba.

Tabla 3-8: Resultados validación puntualidad por aeropuertos

Instancia	Estándar	Aeropuerto	Puntualidad observada	Puntualidad simulada	Diferencia
1	OTP0	SCL	75,2%	70,3%	4,9%
		LIM	81,0%	57,7%	23,3%
		AEP	57,1%	48,3%	8,8%
	OTP15	SCL	87,6%	90,6%	-3,0%
		LIM	91,8%	86,1%	5,7%
		AEP	82,3%	75,2%	7,1%
	OTP60	SCL	95,9%	98,2%	-2,3%
		LIM	96,7%	97,0%	-0,3%
		AEP	94,0%	96,5%	-2,5%
2	OTP0	SCL	64,5%	70,3%	-5,8%
		LIM	60,3%	53,4%	6,9%
		AEP	66,3%	58,7%	7,6%
	OTP15	SCL	89,0%	88,9%	0,1%
		LIM	87,9%	83,3%	4,6%
		AEP	82,4%	84,3%	-1,9%
	OTP60	SCL	97,4%	97,0%	0,4%
		LIM	97,1%	96,4%	0,7%
		AEP	94,1%	97,2%	-3,1%
3	OTP0	SCL	70,4%	67,8%	2,6%
		LIM	65,0%	58,3%	6,7%
		AEP	70,9%	53,3%	17,6%
	OTP15	SCL	89,6%	87,7%	1,9%
		LIM	88,5%	88,3%	0,2%
		AEP	86,5%	75,2%	11,3%
	OTP60	SCL	96,9%	96,9%	0,0%
		LIM	96,6%	97,6%	-1,0%
		AEP	96,5%	95,5%	1,0%

iii. Causas de atraso

En las siguientes tablas se presentan los resultados de explicación de la impuntualidad de cada instancia, considerando todos los vuelos del itinerario. La explicación de la impuntualidad se divide entre las 5 causas de atraso independientes (diferencia HBT, mantenimiento, operaciones en aeropuerto, meteorología y otros), más 3 causas reaccionarias (reaccionario de avión, conexiones de pasajeros y conexiones de tripulantes).

Tabla 3-9: Explicación de la impuntualidad de instancia #1

Disrupción	OTP0		OTP15		OTP60	
	Real	Simulada	Real	Simulada	Real	Simulada
Diferencia HBT	3,3%	11,0%	0,6%	2,1%	0,0%	0,1%
Mantenimiento	2,6%	1,5%	1,8%	1,2%	0,9%	0,5%
Operaciones en aeropuerto	7,6%	12,4%	2,0%	3,4%	0,2%	0,3%
Meteorología	0,7%	1,0%	0,6%	0,9%	0,3%	0,5%
Otros	1,3%	1,2%	0,6%	0,5%	0,2%	0,1%
Reaccionario	9,4%	13,6%	6,2%	6,4%	2,5%	1,5%
Conexiones pasajeros	0,7%	0,1%	0,2%	0,1%	0,1%	0,0%
Conexiones tripulantes	0,4%	0,7%	0,3%	0,4%	0,2%	0,0%

Tabla 3-10: Explicación de la impuntualidad de instancia #2

Disrupción	OTP0		OTP15		OTP60	
	Real	Simulada	Real	Simulada	Real	Simulada
Diferencia HBT	3,4%	10,0%	0,9%	1,9%	0,1%	0,1%
Mantenimiento	1,8%	1,6%	1,0%	1,3%	0,4%	0,4%
Operaciones en aeropuerto	11,8%	12,3%	2,6%	3,1%	0,3%	0,3%
Meteorología	1,7%	1,8%	1,3%	1,7%	0,6%	0,9%
Otros	1,8%	1,2%	0,6%	0,6%	0,1%	0,1%
Reaccionario	14,7%	13,4%	7,1%	7,0%	2,1%	2,2%
Conexiones pasajeros	0,9%	0,2%	0,2%	0,1%	0,1%	0,0%
Conexiones tripulantes	0,3%	0,4%	0,2%	0,2%	0,0%	0,0%

Tabla 3-11: Explicación de la impuntualidad de instancia #3

Disrupción	OTPO		OTP15		OTP60	
	Real	Simulada	Real	Simulada	Real	Simulada
Diferencia HBT	2,8%	9,3%	0,5%	1,6%	0,0%	0,1%
Mantenimiento	1,6%	1,5%	0,9%	1,2%	0,4%	0,5%
Operaciones en aeropuerto	8,3%	14,6%	1,5%	4,3%	0,1%	0,4%
Meteorología	2,2%	1,6%	1,7%	1,5%	0,8%	0,8%
Otros	1,5%	1,2%	0,6%	0,6%	0,2%	0,1%
Reaccionario	13,0%	12,3%	6,4%	6,1%	2,2%	1,9%
Conexiones pasajeros	0,8%	0,2%	0,2%	0,1%	0,0%	0,0%
Conexiones tripulantes	0,4%	0,6%	0,2%	0,4%	0,1%	0,0%

En términos absolutos el atraso reaccionario simulado es muy cercano al real en cada instancia de validación. Entonces, lo que explica las diferencias de puntualidad observadas en la Tabla 3-7, es el atraso independiente generado en la simulación.

Particularmente, se observan altas diferencias en *Diferencia HBT* y *Operaciones en aeropuerto*. Tales diferencias pueden ser explicadas por mejoras operacionales y mayor eficiencia en la ejecución de los procesos de TAT y HBT. Por otra parte, hay una correlación natural entre estos atrasos, ya que es más probable que haya más atrasos por HBT en un escenario de muchos atrasos independientes, pues los T/A son ajustados al mínimo y las diferencias de HBT se transforman en atrasos reaccionarios.

Por otra parte, se aprecia un sesgo en el atraso por *Conexiones de Pasajeros*, ya que en todos los casos el atraso simulado es menor al real. Esto puede atribuirse a que hay menos conexiones representadas en la simulación con respecto a la realidad, o a que los valores calibrados de la matriz de espera son menores a los reales, es decir, la disposición real a esperar es mayor a la calibrada.

Por último, los atrasos de *Mantenimiento*, *Meteorología*, *Conexiones de Tripulantes* y *Otros*, presentan niveles de atraso simulados análogos a la realidad

en cada instancia y estándar analizado. En particular, los dos primeros son las causas de atraso que relativamente provocan más atrasos reaccionarios. Se puede observar que la impuntualidad OTP60 del atraso reaccionario guarda directa relación las impuntualidades de *Mantenimiento* y *Meteorología*, que en todos los casos son las mayores después del reaccionario.

iv. Algoritmo de recuperación

La Tabla 3-12 resume los estadísticos de la aplicación del algoritmo de recuperación en cada una de las instancias de prueba. Se observa que la cantidad de rotaciones simuladas en cada instancia está dentro del rango real de rotaciones realizadas (entre 6 y 12), dato obtenido de una entrevista con uno de los operadores del CCO de *LAN Airlines*. En particular, la instancia 2 presenta menos rotaciones debido a los mantenimientos programados definidos en el itinerario, que restringen la elaboración de planes de recuperación.

La comparación de puntualidad con y sin algoritmo de recuperación se hizo usando la técnica de control de aleatoriedad denominada *Números Aleatorios Comunes*. Esta consiste en generar las mismas condiciones de aleatoriedad entre pares de réplicas de experimentos paralelos. Con esto se generará el mismo atraso independiente en cada vuelo dentro de una misma réplica, por lo que las diferencias en puntualidad reflejarán con exactitud el efecto de aplicar el algoritmo de recuperación. La Tabla 3-13 compara la puntualidad de cada instancia de prueba respecto a la aplicación del algoritmo de recuperación.

Tabla 3-12: Estadísticos de rotaciones por escenario

Instancia	1	2	3
Promedio de rotaciones diarias	9,1	6,9	10,8
Promedio reaccionario incidente por rotación (min)	36,3	44,3	40,2
Promedio de vuelos rotados por rotación	11,4	10,7	8,7
Promedio de vuelos beneficiados por rotación	3,1	3,0	2,7
Promedio ganancia atraso por rotación (min)	90,5	109,0	108,4

Debido a que los intervalos de confianza de la diferencia de puntualidad por réplica no contienen el cero, se puede concluir que el efecto de aplicar el algoritmo de recuperación es significativo. Las diferencias logradas de puntualidad son considerables, especialmente para la primera instancia.

Tabla 3-13: Comparación de la puntualidad con y sin algoritmo de recuperación

Estándar	Instancia	Puntualidad con algoritmo de recuperación	Puntualidad sin algoritmo de recuperación	Intervalo de confianza de la diferencia
OTPO	1	58,5%	53,8%	4,6% - 4,9%
	2	59,1%	56,3%	2,7% - 3,0%
	3	58,0%	54,8%	3,0% - 3,4%
OTP15	1	85,0%	79,8%	5,1% - 5,4%
	2	84,1%	81,2%	2,7% - 3,2%
	3	84,1%	80,2%	3,6% - 4,1%
OTP60	1	97,1%	95,9%	1,1% - 1,4%
	2	95,9%	94,5%	1,2% - 1,6%
	3	96,2%	94,7%	1,3% - 1,7%

En conclusión, el modelo es válido desde el punto de vista de su objetivo: evaluación de la robustez de un itinerario. La representación de las entidades del sistema permite evaluar distintos escenarios bajo un escenario común de aleatoriedad. Las diferencias de puntualidad en estos casos se atribuyen a cambios estructurales entre los itinerarios, como holguras y conexiones.

Tabla 3-14: Efecto de algoritmo de recuperación en total de minutos de atraso

Instancia	Minutos de atraso totales con algoritmo de recuperación	Minutos de atraso totales sin algoritmo de recuperación	Diferencia
1	40.517	53.211	12.694
2	33.033	40.970	7.938
3	33.091	43.843	10.752

Por otra parte, si se quiere usar MSI para pronosticar la puntualidad, éste no es válido. Al respecto, la tendencia es replicar las medias históricas de cada tipo de atraso independiente. No hay nada que permita capturar tendencias de aumento o disminución de cada tipo particular de atraso. Los resultados tendrán siempre alta correlación con los datos históricos correspondientes con el itinerario simulado. Esta relación se transmitirá, en parte, a los atrasos reaccionarios.

Por último, en todas las pruebas se observaron bajos niveles de precisión relativa de los intervalos de confianza, lo que indica que con 100 réplicas se logra suficiente representatividad estadística para estimar las medidas de desempeño analizadas.

4. HEURÍSTICA DE OPTIMIZACIÓN PARA REPROGRAMACIÓN DE VUELOS

En esta sección se presenta una heurística de optimización para el problema de *Redistribución Robusta de Holguras*. Como se mostró en el capítulo 2, existen dos recursos para resolver este problema: reprogramación de rutas y reprogramación de vuelos. La heurística propuesta se basa sólo en reprogramación de vuelos, opción considerada aplicable previo a la publicación comercial del itinerario, a lo menos 6 meses antes del día de la operación.

La reprogramación de vuelos consiste en modificar el tiempo programado de despegue, manteniendo constante la duración del bloque de vuelo (HBT). Esta acción permite reasignar holguras, logrando reducir el atraso propagado, mejorar la puntualidad, y disminuir costos operacionales asociados a planes de contingencia. El supuesto base de este problema es que la demanda y, por tanto, el ingreso esperado de cada vuelo, se mantienen constantes respecto a pequeñas variaciones en el tiempo programado de despegue. Así, por ejemplo, la demanda de un vuelo programado a las 10:30 sería la misma que si fuera programado a las 10:40.

Los principales aspectos de este problema son determinar qué vuelos necesitan más holgura, y en cuánto modificar su tiempo de despegue, manteniendo factible el itinerario respecto a los T/A mínimos, conexiones y mantenimientos programados. En este sentido, MSI provee métricas claves para determinar dónde y cuánta holgura planificar, y posteriormente, para evaluar la calidad de las soluciones propuestas en términos de reducción del valor esperado del atraso del sistema.

Además, como supuesto fuerte se obliga a mantener constante la holgura inicial del itinerario. Esto se logra manteniendo invariante el tiempo programado de los vuelos extremos de cada avión, o sea, del primer y último vuelo dentro de su itinerario.

A continuación, se presenta la formulación general del problema. Posteriormente, se describe la heurística propuesta para resolver el problema.

4.1. Formulación general del problema

La formulación general del problema presenta las restricciones consideradas en la heurística. Se asume como información base:

1. Un itinerario, compuesto por el plan de vuelo y mantenimiento de cada avión. Cada vuelo y mantenimiento posee un par origen destino y un tiempo planificado de salida y llegada.
2. Un conjunto de conexiones de tripulantes y pasajeros. Cada conexión tiene asociado un vuelo de inicio y de término.
3. Tiempos mínimos de conexión y T/A mínimos entre vuelos sucesivos de un mismo avión.
4. Desempeño operacional simulado de itinerario base. Corresponde al promedio de minutos de atraso reaccionario, atraso independiente y puntualidad de cada vuelo, más estadísticas de los planes de contingencia efectuados.

Por fines prácticos, el itinerario quedará definido en base a un conjunto de pares de vuelos conectados por avión. Por ejemplo, la secuencia de vuelos $S = A-B-C-D$ quedará definida como el conjunto de conexiones $C_S = \{A-B, B-C, C-D\}$. Esto permitirá asociar los mantenimientos programados a un par de vuelos específico.

Se considerará la siguiente notación para la formulación matemática de las restricciones y procedimientos de la heurística. Cabe destacar que la formulación propuesta es no lineal y con varias componentes estocásticas provenientes del modelo de simulación.

Conjuntos

V : conjunto de vuelos, $i \in V$.

A : conjunto de aviones, $a \in V$.

C_T : conjunto de conexiones de tripulantes, $t \in C_T$.

C_P : conjunto de conexiones de pasajeros, $p \in C_P$.

C_M : conjunto de conexiones de avión con mantenimiento programado en medio, $m \in C_M$.

C_N : conjunto de conexiones de avión sin mantenimiento programado en medio, $n \in C_N$.

Todas las conexiones anteriores se definen como un par (i, j) , donde $i, j \in V$.

Parámetros

$std(i)$: tiempo programado de despegue del vuelo i .

$sta(i)$: tiempo programado de llegada del vuelo i .

$tat(i)$: tiempo en tierra mínimo del vuelo i .

$tmt(i)$: duración de mantenimiento programado después del vuelo i .

$v_R(a)$: vuelo raíz para cada avión a .

$v_F(a)$: vuelo final para cada avión a (último vuelo programado en el itinerario).

$tc(t)$: tiempo mínimo de conexión para conexión de tripulantes t .

$tp(p)$: tiempo mínimo de conexión para conexión de pasajeros p .

$f(i)$: tiempo desde el despegue programado del vuelo i hasta el despegue programado más cercano de algún vuelo del mismo par origen-destino.

$\tilde{r}(i)$: atraso reaccionario promedio simulado en vuelo i .

$\tilde{m}(i)$: atraso independiente promedio simulado en vuelo i .

$\tilde{pax}(p)$: número promedio de pasajeros simulados para conexión p .

$\Delta_{min}(i)$: variación mínima posible del tiempo programado de despegue para el vuelo i .

$\Delta_{max}(i)$: variación máxima posible del tiempo programado de despegue para el vuelo i .

Variables de decisión

$\Delta(i)$: variación en minutos del tiempo programado de despegue para el vuelo i . Es una variable discreta y definida para un conjunto finito de valores factibles.

$\varepsilon(p)$: 1 si se está dispuesto a esperar a los pasajeros de la conexión p , 0 si no. Este valor se extrae de la matriz de tolerancia de espera definida en la sección anterior.

Variables auxiliares

$\tau(i)$: variable de impacto resultante del vuelo i con respecto a su tiempo reprogramado de despegue. Si es positiva es un atraso; si es negativa una holgura.

$\Psi(i)$: tiempo desde el despegue del vuelo i hasta el despegue más cercano de algún vuelo del mismo par origen-destino.

Función objetivo

El objetivo considerado en el problema es la minimización del tiempo esperado total de atraso. Esto supone la evaluación de las soluciones generadas por la heurística a través del modelo de simulación. Por tanto, la función objetivo puede expresarse como:

$$\min \sum_{i \in V} \tilde{m}(i) + \tilde{r}(i) \quad (4.1)$$

La componente reaccionaria del atraso depende en gran medida de la holgura planificada para cada vuelo, la cual es modificada al reprogramar el tiempo de despegue correspondiente.

Ahora bien, al relocalizar las holguras, no sólo se disminuye el atraso reaccionario, ya que algunas componentes del atraso independiente (específicamente meteorología, operaciones aeroportuarias y otros) dependen del horario simulado de despegue. Más adelante, se mostrará que las soluciones propuestas por la heurística producen mejoras en ambas componentes de atraso. Luego, como ambas componentes de la función objetivo dependen de la variación en el tiempo programado de despegue, la ecuación 4.1 puede escribirse como:

$$\min \sum_{i \in V} \tilde{m}(\Delta_i) + \tilde{r}(\Delta_i) \quad (4.2)$$

Para hacer una comparación justa entre cada simulación, se utiliza una conocida técnica de control de la aleatoriedad denominada *Números Aleatorios Comunes* (NAC). Esta técnica se basa en controlar las secuencias de números aleatorios generados, de manera que réplicas correspondientes de experimentos distintos sean comparables. Para lograr esto en MSI se asignó una semilla⁸ distintiva a cada réplica. En cada réplica, a partir de su semilla, se generaron semillas únicas para cada vuelo del itinerario. Por último, a partir de la semilla de cada vuelo, se generaron semillas específicas para cada variable aleatoria independiente.

Restricciones

En primera instancia, para una mejor comprensión, se presentan las restricciones del modelo sin considerar las interrupciones.

$$sta(i) + \Delta(i) + tat(j) \leq std(j) + \Delta(j) \quad \forall (i,j) \in C_N \quad (4.3)$$

$$sta(i) + \Delta(i) + tat(j) + tmt(i) \leq std(j) + \Delta(j) \quad \forall (i,j) \in C_M \quad (4.4)$$

$$sta(i) + \Delta(i) + tc(t) \leq std(j) + \Delta(j) \quad \forall t, (i,j) \in C_T \quad (4.5)$$

$$\varepsilon(p) = \varepsilon(\tilde{p}\tilde{x}(p), \Psi(j)) \quad \forall p, (i,j) \in C_P \quad (4.6)$$

$$\varepsilon(p) \cdot (sta(i) + \Delta(i) + tp(p)) \leq std(j) + \Delta(j) \quad \forall p, (i,j) \in C_P \quad (4.7)$$

$$\Psi(j) = f(j) + \Delta(i) \quad \forall p, (i,j) \in C_P \quad (4.8)$$

$$\Delta(v_R(a)) = 0 \quad \forall a \in A \quad (4.9)$$

$$\Delta(v_F(a)) = 0 \quad \forall a \in A \quad (4.10)$$

$$\Delta_{\min}(i) \leq \Delta(i) \leq \Delta_{\max}(i) \quad \forall i \in V \quad (4.11)$$

Las restricciones (4.3) y (4.4) aseguran el cumplimiento del T/A mínimo entre vuelos consecutivos de un mismo avión en los casos sin y con mantenimiento

⁸ La mayor parte de los generadores de números aleatorios son, en realidad, pseudoaleatorios: se calcula (o introduce internamente) un valor x_0 , llamado semilla, y, a partir de él, se genera una secuencia de números $\{x_1, x_2, x_3, \dots\}$ que es única para cada valor de x_0 .

respectivamente. En (4.3) el vuelo j debe despegar al menos $tat(j)$ minutos después del despegue del vuelo i . En cambio, en (4.4) se considera además la duración del mantenimiento programado.

La restricción (4.5) asegura que se cumpla el tiempo mínimo de conexión de tripulantes. De manera similar a (4.3) el vuelo j debe despegar al menos $tc(t)$ minutos después del vuelo i .

Las restricciones (4.6), (4.7) y (4.8) modelan (de manera no lineal) las conexiones de pasajeros. La restricción (4.6) modela la decisión de esperar pasajeros en conexión, la cual es una función no lineal de $\tilde{pax}(p)$ y $\Psi(j)$. La restricción (4.7) se activa cuando $\varepsilon(p) = 1$, lo cual asegura que se espere a los pasajeros conectados en el vuelo i , y se respete el tiempo mínimo de conexión $tp(p)$ antes del despegue del vuelo j . La restricción (4.8) entrega el tiempo resultante hasta el vuelo más cercano del mismo par origen destino.

Las restricciones (4.9) y (4.10) impiden la reprogramación de los vuelos extremos de cada avión. Así, se mantiene constante la holgura total del itinerario.

Por último, la restricción (4.11) acota la variación del tiempo de despegue de cada vuelo. Los límites elegidos deben asegurar la invariabilidad de la demanda para cualquier valor de $\Delta(i)$.

Para incorporar los parámetros de atraso y variables de impacto a las restricciones anteriores, se supondrá para cada par de vuelos conectado (i,j) que el atraso propagado al vuelo j (τ_j) depende de los atrasos (\tilde{m}_i y \tilde{r}_i) en el vuelo i . Esta forma de modelar el atraso se aproxima a la realidad operativa de una aerolínea, donde para cada vuelo en ejecución se conoce el atraso independiente y reaccionario, y el atraso potencial para los vuelos futuros basado en la proyección de los atrasos conocidos. Esta formulación de las restricciones es la base de la heurística propuesta en este trabajo.

Para cada conexión (i, j) se asumen conocidos $\tilde{m}(i)$ y $\tilde{r}(i)$. Así, la variable $\tau(j)$ dependerá de los resultados de la simulación. Al introducir esta información a las restricciones anteriores se obtienen las siguientes:

$$sta(i)+\Delta(i)+tat(j)+\tilde{m}(i)+\tilde{r}(i) = std(j)+\Delta(j)+\tau(j) \quad \forall (i,j) \in C_N \quad (4.12)$$

$$sta(i)+\Delta(i)+tat(j)+tmt(i)+\tilde{m}(i)+\tilde{r}(i) = std(j)+\Delta(j)+\tau(j) \quad \forall (i,j) \in C_M \quad (4.13)$$

$$sta(i)+\Delta(i)+tc(t)+\tilde{m}(i)+\tilde{r}(i) = std(j)+\Delta(j)+\tau(j) \quad \forall t, (i,j) \in C_T \quad (4.14)$$

$$\varepsilon(p) = \varepsilon(\tilde{pax}(p), \Psi(j)) \quad \forall p, (i,j) \in C_P \quad (4.15)$$

$$\varepsilon(p) \cdot (sta(i)+\Delta(i)+tp(p)+\tilde{m}(i)+\tilde{r}(i)) = std(j)+\Delta(j) + \tau(j) \quad \forall p, (i,j) \in C_P \quad (4.16)$$

$$\Psi(j) = f(j) + \Delta(i) - \max(0, sta(i)+\Delta(i)+tp(p)+\tilde{m}(i)+\tilde{r}(i) - std(j) - \Delta(j)) \quad \forall p, (i,j) \in C_P \quad (4.17)$$

$$\Delta(v_R(a)) = 0 \quad \forall a \in A \quad (4.18)$$

$$\Delta(v_F(a)) = 0 \quad \forall a \in A \quad (4.19)$$

$$\Delta_{\min}(i) \leq \Delta(i) \leq \Delta_{\max}(i) \quad \forall i \in V \quad (4.20)$$

El efecto de los atrasos $\tilde{m}(i)$ y $\tilde{r}(i)$ es similar en las restricciones (4.12), (4.13), (4.14) y (4.16): en todos los casos se incrementa el valor de la variable de impacto, lo que equivale a reducir la holgura y a aumentar el atraso. La restricción (4.17) considera adicionalmente el efecto del atraso potencial proveniente del vuelo inicial: $\max(0, sta(i)+\Delta(i)+tp(p)+\tilde{m}(i)+\tilde{r}(i) - std(j) - \Delta(j))$. Este atraso reduce el tiempo faltante para el vuelo más próximo a la conexión de pasajeros referida.

4.2. Heurística

A continuación, se describe la heurística de optimización para la reprogramación de vuelos (referida en lo posterior como HORV). La heurística resuelve el problema definido anteriormente, al determinar la variación óptima de cada

vuelo. HORV utiliza el modelo de simulación MSI para evaluar las soluciones propuestas, y como fuente de información de los atrasos reaccionarios e independientes de cada vuelo.

Se afirma que la metodología propuesta es robusta, ya que la solución generada produce beneficios en gran parte de los escenarios simulados. En este sentido, la valoración de las soluciones propuestas es fundamental para su implementación. Todos los detalles modelados en MSI son de alto valor para validar los cambios propuestos en el itinerario.

4.2.1. Estructura general

En la Figura 4-1 se ilustra la estructura general de la heurística propuesta. La información requerida es la misma del modelo de simulación (itinerario y parámetros de atrasos), más el límite de variación permitido de cada vuelo.

La heurística tiene un ciclo principal que se repite hasta cumplir un número máximo de iteraciones definido a priori. El proceso se inicia con la simulación del itinerario sin cambios, donde se obtienen los parámetros de atraso promedio reaccionario e independiente por vuelo, necesarios para la primera iteración de optimización del itinerario. Posteriormente, en cada iteración se realiza una optimización y una simulación del itinerario. En la optimización se propone una solución en términos de variación en minutos del instante programado de despegue de cada vuelo. En la simulación se evalúan los cambios propuestos por la optimización y se generan los parámetros de atraso a utilizar en la siguiente iteración, la cual manejará el itinerario modificado como punto de partida.

La optimización del itinerario se divide en optimizaciones sucesivas por avión. La heurística propone qué avión optimizar a partir de una estrategia de selección codiciosa, que elige los aviones con mayor atraso promedio por vuelo. Una vez elegido el avión, se procede a optimizar sus vuelos. Para esto se efectúa un ciclo que elige el vuelo cuya variación reduce en mayor medida el atraso propagado.

Una vez determinado el vuelo óptimo del ciclo, se fija su variación, la que es antecedente para los vuelos no optimizados. Las métricas de variación y reducción de atraso se obtienen mediante una optimización local aplicada a cada vuelo. En las secciones siguientes se describe en profundidad la metodología de selección de aviones y de optimización local de vuelos.

Una vez finalizado el ciclo de iteraciones, se determina la mejor solución como la correspondiente a la iteración que minimiza el total de minutos de atraso obtenidos en la simulación.

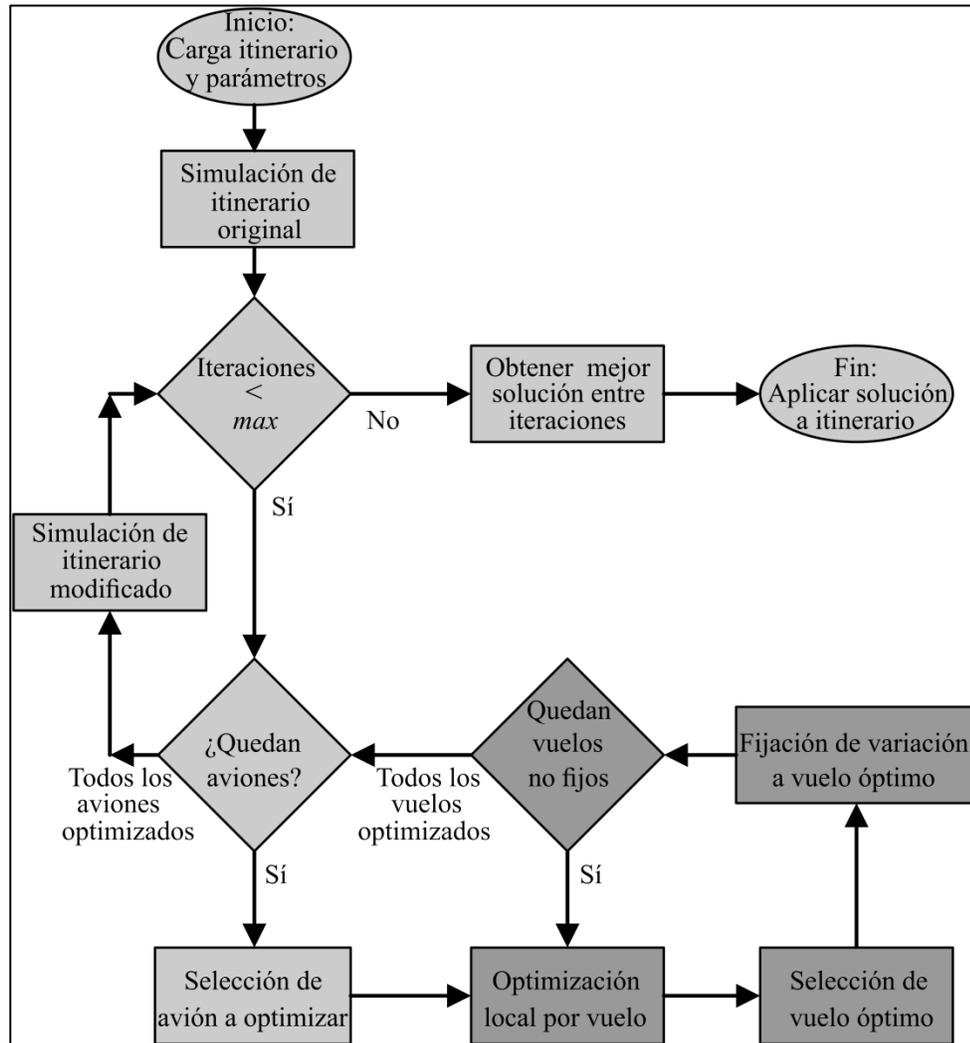


Figura 4-1: Diagrama de flujo de la heurística

4.2.2. Estrategia de selección de vuelos

El recorrido de vuelos se hace secuencialmente por avión. Es decir, se decide qué avión optimizar, y luego se optimizan todos sus vuelos. Dentro de cada avión se realiza un doble ciclo de optimización. En primer lugar, se obtienen las variaciones óptimas de cada vuelo, pero sin aplicarlas. Luego, se elige el vuelo de

mayor reducción de atraso y se aplica su variación óptima. El procedimiento se repite hasta que todos los vuelos del avión seleccionado han sido optimizados.

Selección del avión

La selección del avión a optimizar se basa en una regla simple de tipo codicioso, que consiste en seleccionar el avión con mayor promedio simulado de minutos de atraso por vuelo. Esta regla está alineada a la función objetivo, ya que los primeros aviones seleccionados tendrán más flexibilidad que los últimos, pues a medida que se avanza en la optimización, los vuelos optimizados van quedando fijos y condicionan el dominio de variación de los aviones no optimizados.

Selección del vuelo óptimo

En primer lugar, dado un avión seleccionado, se asocia a cada uno de sus vuelos un atributo de estado de optimización: fijo o variable. Inicialmente, cada vuelo es variable, o sea, es factible modificar su tiempo programado de despegue. El procedimiento de optimización de los vuelos del avión optimiza y fija de manera secuencial cada vuelo, en base a una estrategia codiciosa de selección del vuelo óptimo.

La estrategia parte con la estimación de la variación y la reducción de atraso de cada vuelo variable. Esta estimación es realizada mediante una secuencia de optimización local por vuelo (descrita en la sección siguiente), que es efectuada de manera independiente para cada vuelo. Luego, se elige el vuelo que maximiza la reducción de atraso y se fija la variación a la propuesta. Una vez optimizado un vuelo se etiqueta como cerrado y su variación queda fija. El procedimiento se repite hasta que todos los vuelos del avión están cerrados. Esto lleva a reasignar holguras a los vuelos que más lo necesitan y que contribuirán más a reducir el atraso total generado en el sistema.

La Figura 4-2 provee un ejemplo del procedimiento de optimización del itinerario diario de un avión, para un caso particular de 5 vuelos. La figura presenta una secuencia de optimización de 3 iteraciones. En este caso, se restringe a los vuelos

extremos a permanecer fijos, ya que así se mantiene constante la holgura total del avión.

Iteración #1	V_1	V_2 $\Delta_2 = -15$ $G_2 = 40$	V_3 $\Delta_3 = 10$ $G_3 = 20$	V_4 $\Delta_4 = 5$ $G_4 = 5$	V_5
Iteración #2	V_1	V_2 $\Delta_2^* = -15$ $G_2^* = 40$	V_3 $\Delta_3 = 5$ $G_3 = 10$	V_4 $\Delta_4 = 0$ $G_4 = 0$	V_5
Iteración #3	V_1	V_2 $\Delta_2^* = -15$ $G_2^* = 40$	V_3 $\Delta_3^* = 5$ $G_3^* = 10$	V_4 $\Delta_4 = 5$ $G_4 = 5$	V_5
Resultado	V_1	V_2 $\Delta_2^* = -15$ $G_2^* = 40$	V_3 $\Delta_3^* = 5$ $G_3^* = 10$	V_4 $\Delta_4^* = 5$ $G_4^* = 5$	V_5

Figura 4-2: Ejemplo de optimización secuencial para el itinerario diario de un avión.

En la primera iteración se obtiene la variación y reducción del atraso de cada vuelo variable. Por ejemplo, el tercer vuelo potencialmente reduciría 20 minutos su atraso al postergar en 10 minutos su tiempo programado de despegue. Luego, se decide fijar la variación del vuelo de mayor ganancia, que en este caso corresponde al segundo vuelo. En la siguiente iteración, se vuelve a optimizar de manera local cada vuelo, pero considerando la variación del segundo vuelo como antecedente. En general, las variaciones previas condicionan las ganancias de los vuelos no optimizados. En este caso, se decide adelantar el tercer vuelo en 5 minutos, lo que genera una ganancia esperada de 10 minutos de atraso. La última iteración del ejemplo resulta trivial, ya que queda libre sólo el cuarto vuelo, el

que es adelantado 5 minutos. Como resultado final, la relocalización de holguras permite reducir 55 minutos de atraso mediante la reprogramación marginal de tres vuelos.

4.2.3. Optimización local por vuelo

La optimización local se inicia cuando la estrategia de selección de vuelos evalúa a un vuelo objetivo i . Son parámetros conocidos de este vuelo el atraso reaccionario simulado ($\tilde{r}(i)$) y el independiente simulado ($\tilde{m}(i)$). La optimización es definida como local por dos motivos. Primero, porque no se modifica la variación del resto de los vuelos. Aquellos que ya han sido optimizados mantienen su óptimo local; los que no, su variación inicial. Segundo, porque los vuelos distintos del objetivo serán afectados sólo por el atraso promedio de i , es decir, $\tilde{m}(i) + \tilde{r}(i)$. Esto permite aislar el efecto de Δ_i .

El proceso de optimización se divide en tres fases:

i. Determinación del dominio

Como se fija la variación del resto del itinerario, y por tanto de los vuelos conectados al vuelo objetivo, hay casos en que no es posible variar el vuelo objetivo sin necesariamente tener que variar otros vuelos. Por ejemplo, si un vuelo no tiene holguras para moverse, no tiene sentido evaluar sus variaciones. Por tanto, en términos de factibilidad y desempeño, es conveniente conocer previamente los puntos factibles de variación.

En primer lugar, se establece que la variable de variación del vuelo objetivo (Δ_i) tendrá posibilidades finitas de asignación, las que son determinadas a priori según un intervalo de minutos de variación (δ). Por ejemplo, si los límites iniciales de invariabilidad de la demanda establecen que $-15 \leq \Delta_i \leq 15$, y se tiene que $\delta=5$, entonces $\Delta_i \in \{-15, -10, -5, 0, 5, 10, 15\}$. Este supuesto considera la realidad

comercial, ya que no tiene sentido vender un ticket de vuelo con salida programada, por ejemplo, a las 10:01 AM.

En segundo lugar, se obtiene la máxima variación posible de movimiento hacia adelante y atrás, considerando las holguras entre el vuelo objetivo y todas sus conexiones.

Por ejemplo, para el caso simple en que el vuelo j (objetivo) tiene una conexión adelante (con vuelo k) y una atrás (con vuelo i), interesa saber cuánto es el máximo de minutos para retrasar y adelantar el vuelo. De la ecuación (4.3) se obtiene una cota superior para $\Delta(j)$.

$$\Delta(j) \leq \text{std}(k) + \bar{\Delta}(k) - (\text{sta}(j) + \text{tat}(j)) \quad (4.21)$$

Es decir, el máximo adelanto permitido está acotado por la holgura posterior, donde se considera fija la variación $\bar{\Delta}(k)$.

De manera similar, se obtiene una cota inferior para $\Delta(j)$.

$$\Delta(j) \geq - \left(\text{std}(j) - (\text{sta}(i) + \bar{\Delta}(i) + \text{tat}(j)) \right) \quad (4.22)$$

Como $\Delta(j)$ es un retraso su valor debe ser negativo, lo que corresponde al otro lado de la ecuación, donde se tiene una holgura negativa y se considera fija la variación $\bar{\Delta}(i)$.

Entonces, para el caso simple donde el vuelo objetivo tiene dos conexiones se tendrá:

$$- \left(\text{std}(j) - (\text{sta}(i) + \bar{\Delta}(i) + \text{tat}(j)) \right) \leq \Delta(j) \leq \text{std}(k) + \bar{\Delta}(k) - (\text{sta}(j) + \text{tat}(j)) \quad (4.23)$$

En general, cada vuelo objetivo presentará una restricción de holgura con cada conexión definida en el itinerario. Como resultado, la variación estará acotada a la mínima holgura en cada dirección de movimiento. Finalmente, el dominio de variación $D(j)$ será la intersección entre las restricciones impuestas por las mínimas holguras y el conjunto de valores discretos de variación. Por ejemplo, si

a causa de las holguras se obtiene $-5 \leq \Delta(j) \leq 10$, se tendrá que el dominio de variación será $D(j) = \{-5, 0, 5, 10, \}$.

ii. Evaluación de soluciones

Para un vuelo objetivo j con dominio de variación $D(j)$, se toma cada valor posible de variación $\Delta_n(j)$ y se evalúa el atraso total propagado $A(j)$ producto del impacto del atraso simulado $\tilde{m}(i) + \tilde{r}(i)$ del vuelo anterior i al resto del itinerario. Este procedimiento se basa en las restricciones entre (4.12) y (4.20), por lo que considera todo tipo de conexiones. Producto del atraso simulado, se obtiene el atraso reaccionario $R(j)$ asociado al impacto $\tau(j)$, el que es propagado a cada conexión posterior del vuelo k . Dado que el impacto puede ser una holgura, $R(j)$ será la parte positiva de $\tau(j)$, es decir:

$$R(j) = \max(0, \tau(j)) \quad (4.24)$$

Se puede iterar de manera sucesiva hacia adelante interpretando $R(k)$ como el atraso reaccionario del vuelo k . Es decir, se hace $\tilde{r}(k)$ igual a $R(k)$, y $\tilde{m}(k)$ igual a cero. El procedimiento se repite hasta que $R(k)$ sea cero o no queden vuelos.

Por ejemplo, se evalúa la variación $\Delta_n(j)$ del despegue del vuelo objetivo j para una secuencia única de vuelos de un mismo avión $i-j-k$. De la ecuación (4.3) se tiene que:

$$\text{sta}(i) + \bar{\Delta}(i) + \text{tat}(j) + \tilde{m}(i) + \tilde{r}(i) = \text{std}(j) + \Delta_n(j) + \tau(j) \quad (4.25)$$

$$R(j) = \max\left(0, \text{sta}(i) + \bar{\Delta}(i) + \text{tat}(j) + \tilde{m}(i) + \tilde{r}(i) - \text{std}(j) - \Delta_n(j)\right) \quad (4.26)$$

Luego, para conexión entre j y k :

$$\text{sta}(j) + \Delta_n(j) + \text{tat}(k) + R(j) = \text{std}(k) + \bar{\Delta}(k) + \tau(k) \quad (4.27)$$

$$R(k) = \max\left(0, \text{sta}(j) + \Delta_n(j) + \text{tat}(k) + R(j) - \text{std}(k) - \bar{\Delta}(k)\right) \quad (4.28)$$

Luego, el atraso total propagado será:

$$A(j) = R(j) + R(k) \quad (4.29)$$

En general, conviene que $\Delta_n(j)$ sea positivo cuando la holgura anterior a j es baja respecto al atraso simulado $\tilde{m}(i)+\tilde{r}(i)$. En cambio, conviene que $\Delta_n(j)$ sea negativo cuando la holgura posterior a j es baja respecto al atraso reaccionario $R(j)$.

iii. Elección de solución óptima

Al iterar sobre todos los valores factibles de $\Delta_n(j)$ se obtiene una curva de atraso resultante con los $A(j)$ correspondientes. La variación óptima será la que minimice el atraso $A(j)$. Es decir,

$$\min_{\Delta_n(j) \in D(j)} A(\Delta_n(j)) \quad (4.30)$$

En caso de existir más de una solución óptima, por parsimonia se elige el valor más cercano a cero.

4.3. Resultados

Las pruebas se realizaron con los mismos itinerarios utilizados en la validación de MSI, correspondientes a los meses de marzo, junio y julio de 2009 (ver Tabla 3-3). En cada prueba se consideraron 10 iteraciones de la heurística, 100 réplicas de simulación por iteración y una ventana de variación de 30 minutos por vuelo (± 15 minutos de límites de variación).

En primer lugar, se presenta para cada instancia de prueba el nivel de desempeño de la solución óptima respecto a la situación base en términos de: (1) minutos reducidos de atraso, (2) puntualidad OTP0, OTP15 y OTP60, y (3) estadísticos simulados de planes de contingencia. Los resultados se presentan en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 respectivamente.

En la Tabla 4-1 se observa que, en promedio, la cantidad de minutos de atraso reducidos son un 6% del total y un 10% del reaccionario. Además, resulta evidente que gran parte de la reducción de atraso corresponde al atraso reaccionario. Contrariamente, el atraso independiente en las dos primeras

instancias disminuye, pero en la tercera aumenta. Esto se debe a que algunas de las interrupciones aleatorias dependen de la hora programada del vuelo, por lo que la variación de cada vuelo puede aumentar, mantener o disminuir el atraso independiente. Cabe destacar que se obtiene un ahorro promedio de 3,5 horas de atraso diario como resultado de la aplicación de la heurística.

Tabla 4-1: Mejora de solución óptima respecto a minutos totales de atraso

Instancia		Atraso total	Atraso reaccionario	Atraso independiente
1	Base	40.517	23.790	16.727
	Heurística	37.982	21.395	16.588
2	Base	33.011	19.118	13.893
	Heurística	30.839	17.060	13.778
3	Base	32.841	17.693	15.148
	Heurística	31.363	16.108	15.255

En la Tabla 4-2 se pueden apreciar mejoras de puntualidad en cada estándar para todas las instancias. Esto es un resultado esperable dada la estrecha relación entre la puntualidad y los minutos de atraso. En promedio las mejoras son de 3,17% en OTP0, 1,10% en OTP15 y 0,17% en OTP60. Esto es un aspecto muy positivo de la heurística, ya que la puntualidad es una métrica global de nivel de servicio usada para comparar distintas aerolíneas.

Tabla 4-2: Mejora de solución óptima respecto a puntualidad

Instancia		OTP0	OTP15	OTP60
1	Base	58,5%	85,0%	97,1%
	Heurística	61,6%	86,0%	97,3%
2	Base	59,1%	84,1%	95,9%
	Heurística	62,2%	85,3%	96,1%
3	Base	58,5%	84,3%	96,2%
	Heurística	61,8%	85,4%	96,3%

En la Tabla 4-3 se observan dos aspectos interesantes. Primero, una reducción del 9%, 7% y 6% en la cantidad total de rotaciones efectuadas por réplica para cada instancia respectiva. Segundo, se observa un aumento en los estadísticos por rotación de atraso reaccionario inicial, ganancia de minutos de atraso, vuelos beneficiados y vuelos rotados. Por tanto, debido a la reducción de atrasos producida por la heurística, por una parte se efectúan menos rotaciones, y, por otra parte, estas son más afectivas en reducir atrasos. En la práctica al reducir la necesidad de rotaciones, se genera un ahorro de costos operacionales asociados a la menor cantidad de recursos necesarios para efectuar los planes de contingencia (como aviones y/o turnos de reserva) y, en el largo plazo, un ahorro de holgura que permitiría ampliar la oferta de vuelos.

Tabla 4-3: Mejora de solución óptima respecto a planes de contingencia simulados

Instancia		Rotaciones por réplica	Reaccionario inicial por rotación (min)	Ganancia por rotación (min)	Vuelos beneficiados por rotación	Vuelos rotados por rotación
1	Base	125,1	34,9	140,4	3,2	11,3
	Heurística	114,3	35,6	158,8	3,4	11,5
2	Base	63,2	44,6	120,2	3,0	10,8
	Heurística	58,8	45,5	122,9	3,0	10,8
3	Base	87,3	40,3	183,6	2,7	8,8
	Heurística	81,7	41,8	192,7	2,6	9,1

Respecto a la solución misma, en la Figura 4-3 se presenta un histograma de frecuencias relativas de la cantidad de vuelos correspondientes a cada valor posible de variación. Se puede observar que hay mayor tendencia a aplazar los vuelos. Esto es consecuente con el hecho de que las tasas de atraso son mayores en las mañanas que en las tardes, por tanto conviene adelantar algunos vuelos en la mañana y aplazar el resto de los vuelos del día. Esta acción aumenta las holguras planificadas en la mañana, minimizando los efectos de los atrasos reaccionarios posteriormente. Por otra parte, se observa que la mayoría de los

vuelos varían entre -5 y 5 minutos. Esto se atribuye a que en la optimización local por vuelo se elige la mínima variación cuando la reducción de minutos de atraso proyectada es igual. También influye la estructura rígida del itinerario de algunos aviones, donde la mayoría de los vuelos programados carecen de holgura, lo que reduce el conjunto de variaciones posibles.

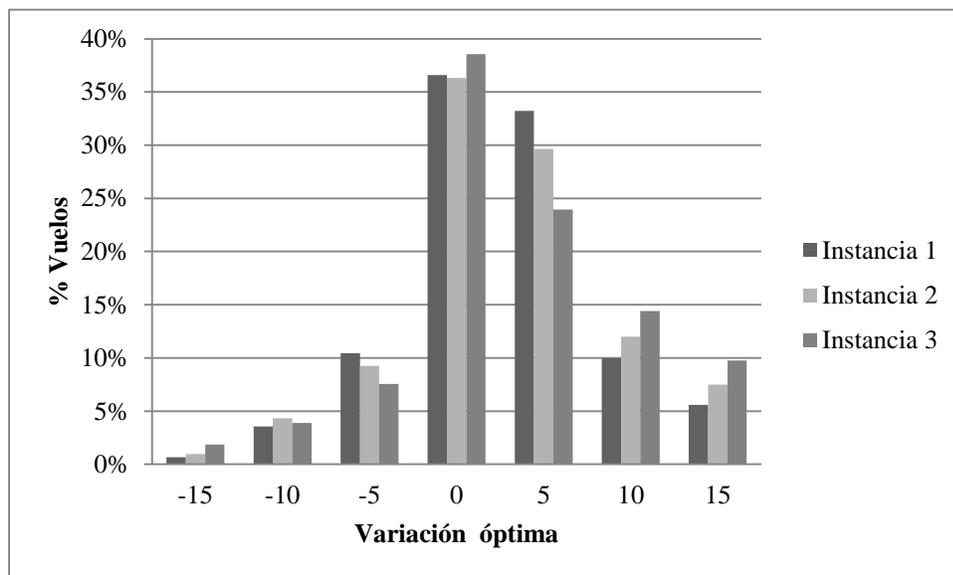


Figura 4-3: Frecuencias relativas de la cantidad de vuelos por nivel de variación

4.3.1. Sensibilidad respecto al número de iteraciones

En la Figura 4-4 se muestra la evolución de la reducción de minutos de atraso en cada iteración de la heurística para cada instancia. Se puede apreciar que la heurística no converge a un óptimo global, sino que itera desde cada solución propuesta a una nueva que, a causa del modelo de simulación, a veces resulta no ser mejor a la anterior. Los principales elementos que influyen en esto son: la simulación de planes de contingencia y la dependencia de los atrasos independientes respecto a la variable de decisión del problema.

Se observa que la solución óptima es alcanzada en la sexta, séptima y primera iteración en cada instancia respectiva. También se puede observar que en la primera iteración se consigue gran parte del beneficio total de la optimización completa: 74%, 81% y 100% en cada instancia respectivamente. De manera excepcional, en la instancia 3 se llega a la mejor solución en la primera iteración. Es decir, en ninguna de las iteraciones fue posible mejorar el desempeño de la primera, aunque de seguir iterando lo más probable hubiera sido encontrar una solución mejor.

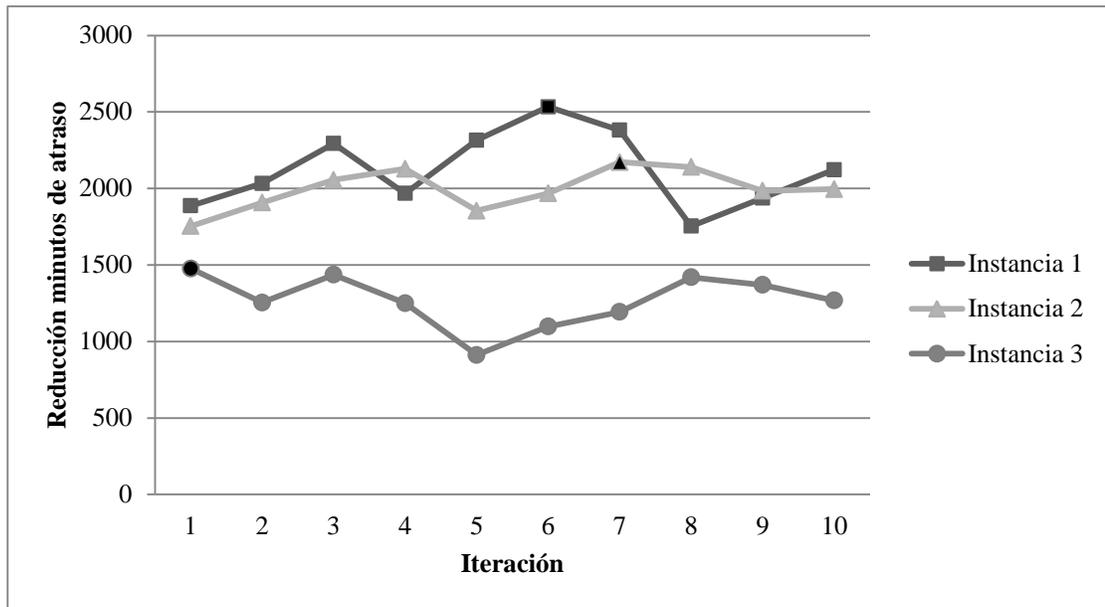


Figura 4-4: Evolutivo de la reducción de minutos de atraso por cada iteración

Luego, resulta interesante analizar la evolución de la mejor solución luego de cada iteración. Por ejemplo, en la primera instancia, la solución mejora en las iteraciones 1, 2, 3, 5 y 6, y en la segunda, en las iteraciones 1, 2, 3, 4 y 7. Resulta esperable que el esfuerzo de mejorar una solución requiera cada vez mayor cantidad de iteraciones. Para confirmar esta hipótesis, se repitió el

ejercicio de optimización para los mismos itinerarios anteriores, pero con 100 iteraciones y 10 réplicas de simulación.

En las figuras 4-5, 4-6 y 4-7 se presenta, para cada instancia, la reducción del atraso global junto al evolutivo de la solución óptima correspondiente a cada iteración. Se puede observar que el esfuerzo necesario para mejorar una solución es cada vez mayor en términos de cantidad de iteraciones. Además, el punto de mejora no guarda relación a la iteración anterior en términos de valor óptimo, es decir, se llega a nuevos óptimos globales desde iteraciones de bajo nivel de reducción de atraso. Así, en la primera instancia se pasa de 1.771 minutos (en la iteración 72) a 2.844 minutos en la siguiente; en la segunda, de 2.255 (en la iteración 24) a 4.651 minutos en la siguiente; y, en la tercera, de 3.362 (en la iteración 25) a 3.971 minutos en la siguiente. Este comportamiento se atribuye a la separación entre la lógica de búsqueda de soluciones y la lógica de evaluación de estas. Explotar la información de cada iteración para obtener mejores soluciones es un aspecto interesante de explorar en investigaciones futuras.

Se puede observar también que hay distintos niveles de varianza en la reducción del atraso en cada instancia. Así, por ejemplo, en la primera instancia, los valores óptimos encontrados se ubican en una franja entre 1500 y 2500 minutos aproximadamente, mientras que en la segunda instancia no existe esta franja, llegando a soluciones de muy bajo desempeño. Las causas de estas diferencias se atribuyen al nivel restrictivo particular de cada instancia; mientras mayor libertad de variación exista, se observarán mayor varianza en las soluciones propuestas por iteración. También influye la sensibilidad de creación de planes de contingencia respecto a las soluciones propuestas. Si alguna solución impide la elaboración de planes de contingencia previamente factibles, provocará un aumento en el atraso reaccionario y una consecuente disminución en los minutos de atraso reducidos.

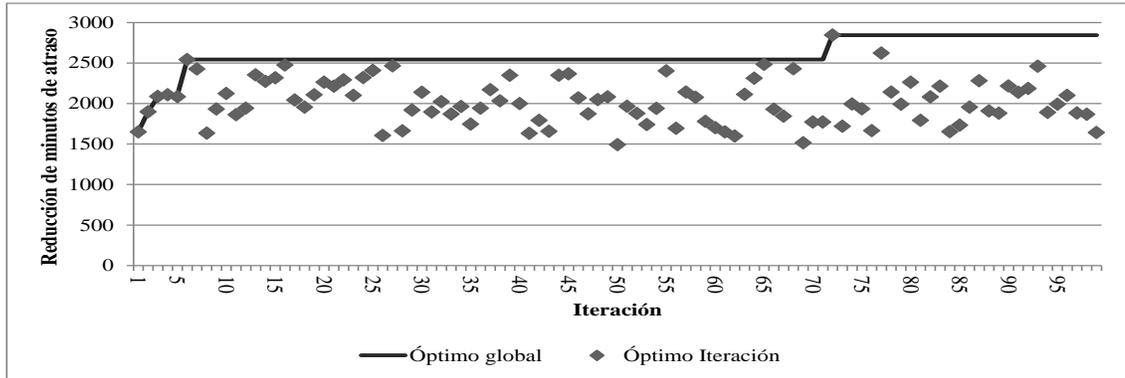


Figura 4-5: Evolutivo de la reducción de minutos de atraso de la primera instancia

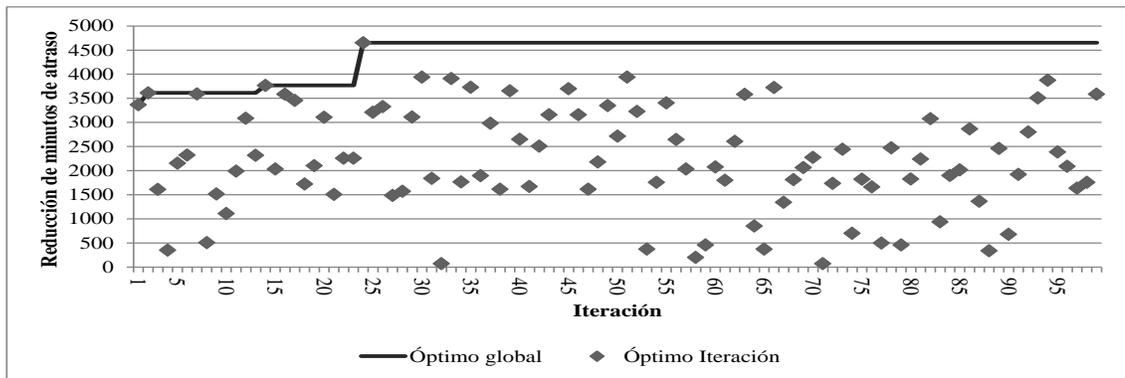


Figura 4-6: Evolutivo de la reducción de minutos de atraso de la segunda instancia

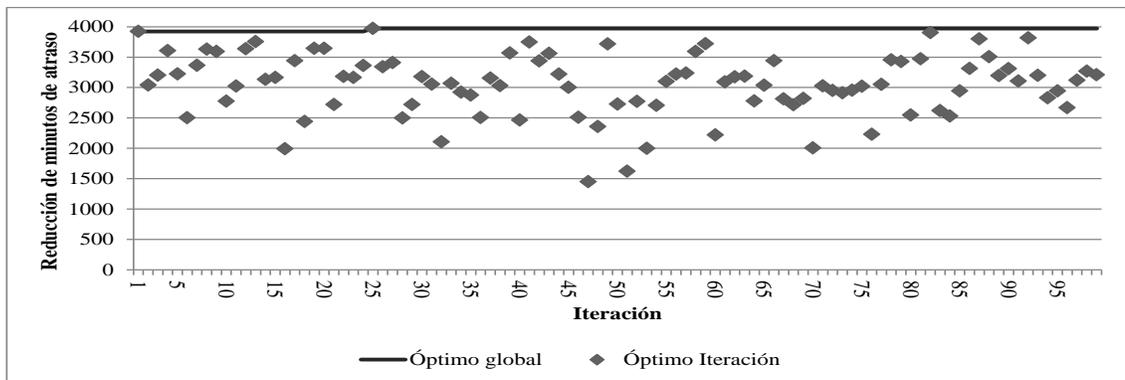


Figura 4-7: Evolutivo de la reducción de minutos de atraso de la tercera instancia

4.3.2. Sensibilidad respecto al límite de variación por vuelo

Uno de los supuestos principales de HORV es que la variación en el tiempo de despegue no afecta la demanda de cada vuelo. En esta sección se analiza la sensibilidad de las soluciones para distintos niveles de variación factible por vuelo. Para estos efectos, se consideran tres ventanas de variación de 30, 20 y 10 minutos, lo que equivale a permitir ± 15 , ± 10 y ± 5 minutos respecto a la programación original de cada vuelo.

La Figura 4-8 muestra el efecto de los minutos de variación permitida por vuelo en la reducción de minutos de atraso. Por otra parte, la Figura 4-9 muestra la mejora correspondiente en puntualidad OTP15.

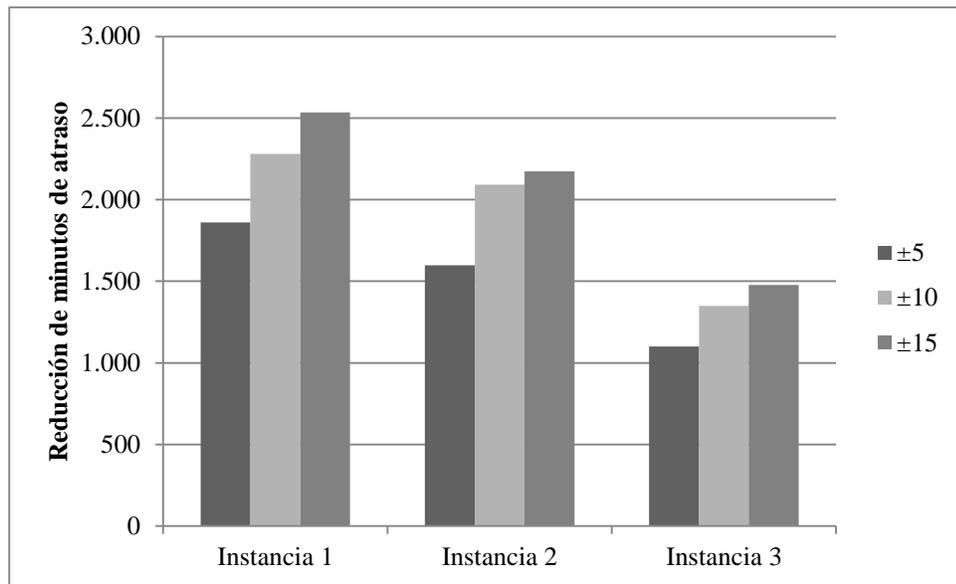


Figura 4-8: Sensibilidad de reducción del atraso respecto a límite de variación

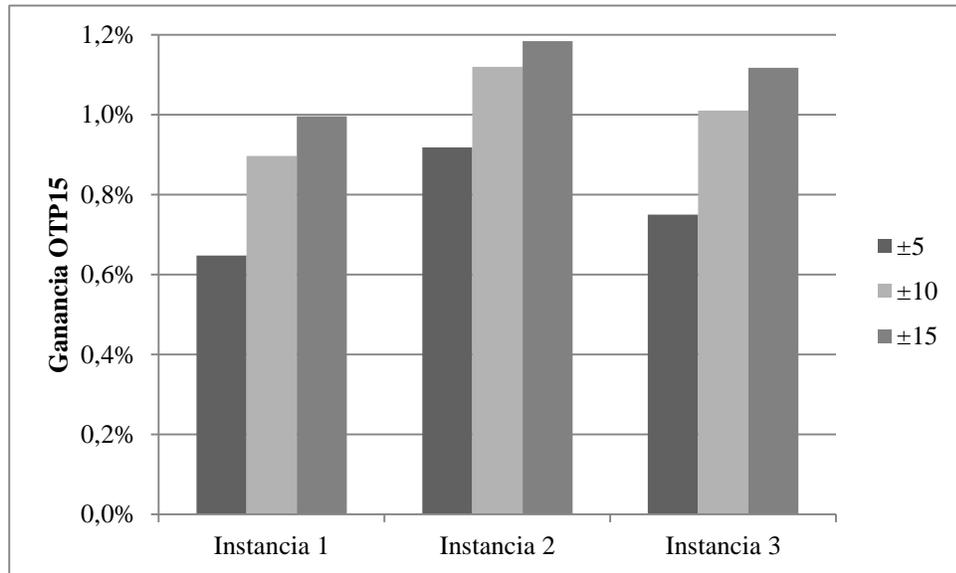


Figura 4-9: Sensibilidad de ganancia de puntualidad respecto a límite de variación

Primeramente, resulta evidente la directa correlación entre ganancia de puntualidad y reducción de minutos de atraso, lo que valida la función objetivo de la heurística como medio para mejorar la puntualidad. En segundo lugar, se observa que ambas medidas de desempeño mejoran con rendimientos decrecientes a medida que aumenta la variación permitida. Sumado a este punto, se observa que gran parte del beneficio se alcanza con el mínimo de variación permitida. Concretamente, en ambas medidas de desempeño, se alcanza más del 70% del beneficio con ± 5 , y más del 90% con ± 10 respecto al beneficio de ± 15 . Por tanto, se demuestra que con un bajo nivel de flexibilidad se pueden lograr altos beneficios para la aerolínea.

4.4. Comparación de resultados

En esta sección se comparan los resultados de HORV con algunos trabajos de la literatura señalados en la sección 2. La comparación se limita a los trabajos basados en reprogramación de tiempos de despegue y que presentan resultados en

términos de reducción de minutos de atraso y/o incrementos de puntualidad. El conjunto se acota al trabajo de Chiraphadhanakul & Eggenberg (2009) y Chiraphadhanakul (2010). Lan et al. (2006) presentan resultados únicamente en términos de reducción de pasajeros atrasados. Lee et al. (2007) aunque presentan resultados de puntualidad OTP0, no indican el punto base de comparación. AhmadBeygi et al. (2010) presentan resultados en términos de la función objetivo que proponen en su modelo de reprogramación de vuelos, la que según los autores es sesgada para medir al atraso real de un itinerario. No obstante, Chiraphadhanakul & Eggenberg (2009) basan su formulación en Lan et al. (2006), y, por otra parte, Chiraphadhanakul (2010) se basa en AhmadBeygi et al. (2010). A continuación, se profundiza en los dos trabajos seleccionados para comparar logros, ventajas y desventajas respecto a HORV.

Chiraphadhanakul & Eggenberg (2009)

Los autores proponen un modelo de programación entera mixta para la reprogramación de tiempos de despegue, llamado por ellos RFSR (*Robust Flight Schedule Retiming*). La función objetivo es minimizar el atraso reaccionario total, sujeto a restricciones estructurales que garantizan que se propague el atraso en función de las holguras programadas y de los atrasos incidentes. No obstante, el atraso se propaga en cada conexión de manera aislada, es decir, cada atraso independiente puede a lo más afectar al vuelo siguiente. Por otra parte, el modelo no restringe la holgura total, es decir, para cada día puede extender la operación de cada avión, aumentando la holgura disponible.

De la formulación base de RFSR los autores proponen dos variantes respecto a la propagación del atraso: (RFSR-1) propagación del atraso independiente promedio, y (RFSR-2) promedio de la propagación de atrasos independientes. La primera opción es sencilla y de baja complejidad, ya que se asume sólo un atraso (el promedio histórico) para cada vuelo. La segunda es más compleja, ya que cada vuelo puede ser afectado por más de un atraso.

Para las pruebas utilizaron información de una aerolínea correspondiente a febrero y marzo de 2008. El primer mes se utilizó como input de atrasos, y el segundo como set de validación. La variación permitida por vuelo fue de ± 15 minutos. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4: Resultados obtenidos por Chiraphadhanakul & Eggenberg (2009)

	Base	RFSR-1	RFSR-2
Holgura total (min)	8871,96	9577,94	8921,68
Atraso propagado (min)	610,16	550,36	400,24
OTP15	76,44%	76,94%	78,28%
OTP60	97,07%	97,10%	97,42%

En este trabajo no se explicita el tamaño de los itinerarios optimizados, no obstante, dado la magnitud del atraso propagado, debe ser aproximadamente un tercio (a nivel diario) respecto a los utilizados en la presente investigación.

Respecto a los resultados obtenidos en RSFR-1, se observa que las mejoras producidas son muy bajas considerando la adición de más de 700 minutos de holgura. La disminución del atraso propagado es similar en términos relativos a la obtenida con HORV (10%), pero la ganancia de puntualidad es menor tanto en OTP15 como OTP60 respecto a cualquiera de las instancias de prueba.

En RSFR-2 las mejoras producidas son altas, aunque persiste un incremento en la holgura total (50 minutos). En este caso el atraso propagado baja más de un 30%, muy por arriba de los niveles logrados en la heurística, pero los niveles de puntualidad incrementados son del mismo orden.

En términos metodológicos, el modelo RFSR-1 se acerca más a lo realizado por la heurística, ya que ambos utilizan el atraso promedio de varios escenarios como input de la optimización. Por una parte, los autores utilizan el promedio observado por vuelo durante un mes, mientras que en HORV se utiliza el promedio simulado de 100 réplicas. En cambio, RFSR-2 optimiza cada

escenario posible por separado, generando una única solución óptima que resulta mejor adaptada al conjunto de escenarios. Esta lógica podría utilizarse como extensión de la heurística, para que la evaluación de las curvas de atraso propagado se base en cada atraso simulado por réplica, y no únicamente con el promedio del atraso entre las réplicas.

Como crítica general a ambos modelos, no es robusto utilizar un set histórico de atrasos de sólo 1 mes de información. En la práctica, es una cantidad escasa de información, ya que existen diversas estacionalidades dentro del año que no quedan manifiestas en el mes previo y, además, los atrasos utilizados no responden a cambios estructurales en el itinerario. Por otro lado, el set de validación de 1 mes también es insuficiente, ya que supone 30 escenarios de atraso, probablemente correlacionados entre sí y con el set histórico. Si la correlación es alta entre el set histórico y el de validación, es esperable tener mejores resultados respecto a sets correlacionados negativamente. En este sentido, la generación de atrasos del modelo de simulación permite crear mayor variedad de escenarios (uno por réplica), y además, los atrasos independientes son sensibles a cambios estructurales del itinerario.

Chiraphadhanakul (2010)

El autor propone un modelo de programación lineal para la reprogramación de tiempos de despegue. La formulación es similar en términos de alcances y restricciones al modelo propuesto en Chiraphadhanakul & Eggenberg (2009), con la diferencia de que la holgura total del sistema se mantiene constante, lo que contribuye a una mejor comparación. Respecto a la función objetivo, el autor estudia tres alternativas:

- FR-1: Minimización de la suma por vuelo del valor esperado del atraso. En este caso, se asume un set finito de atrasos, cada uno con una probabilidad conocida de ocurrencia.

- FR-2: Maximización de la holgura resultante por vuelo (diferencia entre holgura planificada y atraso). Corresponde a una extensión del objetivo anterior, donde además de minimizar el atraso, maximiza y nivela la holgura por vuelo.
- FR-3: Maximización de la holgura efectiva de conexión de pasajeros, caso similar a FR-2, pero acotado sólo a las conexiones de pasajeros.

El autor utilizó información histórica de una aerolínea correspondiente a enero, febrero y marzo de 2008. Los dos primeros meses se usaron como escenarios diarios de atraso. Marzo se utilizó como set de validación para las soluciones propuestas. El itinerario de ese mes promedió 240 vuelos diarios y 60 aviones. Como en el caso anterior, la variación permitida por vuelo fue de ± 15 minutos. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5: Resultados obtenidos por Chiraphadhanakul (2010)

	Base	FR-1	FR-2	FR-3
Holgura total diaria (min)	6676	6676	6676	6676
Atraso propagado diario (min)	1009,60	756,24	741,48	1.076,40
OTP15	76,53%	78,26%	78,48%	76,08%
OTP60	96,89%	97,01%	97,04%	96,86%

En los resultados se observa un buen desempeño en los dos primeros objetivos, con una reducción de atraso del orden del 25% e incrementos de puntualidad OTP15 cercanas a 2pp. El desempeño de FR-3 es inferior porque se enfoca sólo un una parte del itinerario.

Si bien los resultados son mejores en términos absolutos que los presentados en este trabajo, no es preciso hacer una comparación directa, ya que hay diferencias estructurales entre los itinerarios y entre los escenarios de prueba. Dado que el itinerario de prueba es la continuación del set de datos históricos,

es muy probable que la correlación entre los escenarios reales de atraso haya influido positivamente en los resultados. En términos prácticos, un modelo de planificación robusta se aplica varios meses previos a la operación, lo que acrecienta el nivel de incertidumbre.

Para hacer más justa la comparación, se realizó una prueba para la primera instancia (correspondiente a marzo 2009), permitiendo una ventana de variación de 30 minutos por vuelo, sin considerar planes de contingencia, y con simulaciones de 30 réplicas, lo que equipara el método de validación de un mes propuesto por el presente autor. Los resultados se muestran en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6: Resultados de heurística a itinerario marzo 2009 sin considerar planes de contingencia

Medida de desempeño	Base	Heurística	Ganancia
Atraso total (min)	51.476	47.433	4.042
Atraso reaccionario (min)	35.453	31.460	3.993
Atraso independiente (min)	16.023	15.973	50
Puntualidad OTP15	81,05%	82,87%	1,82%
Puntualidad OTP60	96,07%	96,35%	0,27%

Se pueden observar mejores resultados, tanto en reducción de atraso como en mejoras de puntualidad. En comparación a los resultados obtenidos por Chiraphadhanakul (2010), se observa que la reducción del atraso total es menor en términos relativos, pero las ganancias en puntualidad son del mismo nivel.

En general, ninguna de las metodologías revisadas considera el efecto de los planes de contingencia en la reducción de atrasos. Como se presentó en la Tabla 3-14, el algoritmo de recuperación contribuye en un 20% a la reducción del atraso total, muy por sobre los niveles logrados por la heurística y cualquiera de las metodologías revisadas. Por tanto, omitir el efecto de los planes de contingencia puede llevar a soluciones que en la práctica aumenten los costos de

operación y limiten las posibilidades de recuperación, perjudicando los niveles de puntualidad y el nivel de servicio.

Es este sentido, usar un modelo de simulación sofisticado para evaluar las soluciones propuestas por cualquier metodología de optimización (una heurística en el caso particular de este trabajo), permite acercar tópicos operacionales complejos al proceso de planificación, como la propagación de atrasos, las conexiones entre los vuelos y los distintos planes de contingencia.

5. CONCLUSIONES

La planificación robusta de itinerarios de transporte aéreo es un paradigma proactivo para la reducción de atrasos, con el objetivo de hacer itinerarios más resistentes a disrupciones. La planificación es robusta, pues se efectúa varios meses previos al día de las operaciones, producto de la necesidad que tienen las aerolíneas de introducir tópicos operacionales en su proceso de planificación de itinerarios, que permitan valorar concretamente el nivel de servicio entregado al cliente.

La localización óptima tiempos de holguras es una manera de planificar itinerarios más robustos. Los tiempos de holgura son un costo desde una perspectiva comercial, ya que reducen el nivel de utilización de los aviones; pero, resultan muy necesarios desde el punto de vista operacional, ya que las holguras contribuyen a absorber y prevenir los atrasos reaccionarios. En este trabajo se demuestra que es posible mejorar el desempeño operacional esperado mediante pequeñas variaciones en los tiempos programados de despegue de un subconjunto de vuelos del itinerario, y sin afectar el nivel de ingreso esperado por la compañía.

En general, las metodologías sobre planificación robusta presentes en la literatura se validan mediante modelos de simulación. En la mayoría de los casos los modelos utilizados son de carácter simple, basados en la propagación de atrasos independientes, y limitados para reproducir dinámicas operacionales complejas de alto impacto, como conexiones entre vuelos y planes de contingencia. La ausencia de estas consideraciones puede producir itinerarios que en la práctica sean de altos costos operacionales y baja puntualidad.

El modelo de simulación de itinerarios propuesto en este trabajo reproduce dinámicas operativas que incluyen: generación de disrupciones, propagación de atrasos, conexiones de pasajeros y tripulantes, y planes de contingencia ante disrupciones. La generación de disrupciones se basa en un modelo histórico de factores de atraso que considera distintas causas de atraso, como mantenimiento, meteorología, operaciones aeroportuarias, etc. Una vez generado un atraso, este se propaga hacia sus vuelos

conectados hasta que el atraso sea absorbido por las holguras o se ejecute algún plan de contingencia que lo elimine, como efectuar rotaciones de vuelos o utilizar aviones de reserva. La principal ventaja del modelo propuesto es que puede utilizarse dentro del periodo de planificación, proveyendo un marco de comparación de desempeño operacional para distintos itinerarios.

La capacidad del modelo de simulación para comparar itinerarios se introduce en una heurística de optimización para la relocalización de holguras basada en reprogramación marginal de tiempos de despegue de los vuelos de un itinerario dado. El objetivo de la heurística es minimizar el total de minutos de atraso del sistema. Queda demostrado que con esta métrica se mejora la puntualidad sin afectar el ingreso potencial de cada vuelo. La heurística se basa en el modelo de simulación para la estimación de los atrasos esperados sobre cada vuelo, y para la evaluación de las soluciones propuestas, lo que permite incorporar al análisis el efecto de los planes de contingencia. Por esta misma razón, la heurística no converge a un óptimo, ya que hay soluciones que reducen las opciones de recuperación y afectan el desempeño operacional. No obstante, se demuestra que gran parte del beneficio se alcanza dentro de las primeras 10 iteraciones. Las mejoras de puntualidad llegaron a un 3,3% en OTP0, 1,3% en OTP15 y 0,2% en OTP60, lo que en conjunto equivale a reducir un 6% el atraso total del sistema o disminuir 3,5 horas diarias de atraso en un universo de 350 vuelos diarios.

Internamente la heurística busca maximizar la reducción de atraso, privilegiando los aviones con peores niveles de atraso por vuelo, y optimizando de manera secuencial los vuelos según el beneficio resultante de su mejor variación posible. Tal estructura de optimización produce en todos los casos probados mejoras en las métricas operacionales simuladas, ya que se asigna mayor holgura a los vuelos más susceptibles a un atraso reaccionario, sin alterar la asignación original de aviones y tripulantes, y sin afectar las proyecciones de demanda e ingreso por vuelo.

Investigaciones futuras

Investigaciones futuras en el tema pueden enfocarse en mejorar y extender el modelo de simulación y la heurística. En el modelo de simulación se puede mejorar la lógica de generación de interrupciones, para reemplazar la generación directa de atrasos a la simulación de procesos de terrestres. Así, las interrupciones serían sensibles al tiempo programado de T/A. También puede sofisticarse la creación de planes de contingencia, agregando reglas de cancelación y reprogramación de vuelos. En la heurística, podría mejorarse la lógica de optimización local, para considerar la información particular de atrasos por réplica, en vez del promedio de atraso entre las réplicas. También, podría incorporarse información de los planes de contingencia simulados al proceso de optimización. Otra extensión posible es incorporar múltiples objetivos, como minutos de atraso, puntualidad, métricas de planes de contingencia, cantidad de vuelos modificados, total de minutos de variación, etc. En particular, resulta interesante considerar objetivos correlacionados negativamente, como puntualidad y cantidad de vuelos modificados, de manera de minimizar el impacto de las soluciones en el itinerario original. Por último, podrían utilizarse métricas de optimización que consideren los pasajeros transportados por vuelo, como minimizar la cantidad de pasajeros atrasados, total de minutos de atraso de todos los pasajeros del sistema y/o cantidad de pasajeros que pierden su conexión.

BIBLIOGRAFIA

Abdelghany, K. F., Abdelghany, A. F. & Ekollu, G. (2008). An integrated decision support tool for airlines schedule recovery during irregular operations. *European Journal of Operation Research*, 185, 825-848.

Abdelghany, K.F., Shah, S.S., Raina, S. & Abdelghany, A.F. (2004). A model for projecting flight delays during irregular operation conditions. *Journal of Air Transport Management*, 10, 385-394.

Ageeva, Y. (2000). *Approaches to incorporating robustness into airline scheduling*. (Tesis de maestría no publicada). Massachusetts Institute of Technology, EE.UU.

AhmadBeygi, S. (2008). *Airline planning under uncertainty*. (Disertación doctoral no publicada). University of Michigan, EE.UU.

AhmadBeygi, S., Cohn, A. & Lapp, M. (2010). Decreasing airline delay propagation by re-allocating scheduled slack. *IEE Transactions*, 42, 478-489.

AhmadBeygi, S., Cohn, A.M., Guan, Y. & Belobaba, P. (2007). *Technical report: Analysis of the potential for delay propagation in passenger airline networks*. Massachusetts Institute of Technology, EE.UU.

Airports Council International, ACI. (2010). *ACI World Report October 2010*.

Babic, O., Kalic, M., Pavkovic, G., Dozic, S. & Cangalovic, M. (2010). Heuristic approach to the airline schedule disturbances problem. *Transportation Planning and Technology*, 33(3), 257-280.

Beatty, R., Hsu, R., Berry, L. & Rome, J. (1998). Preliminary evaluation of flight delay propagation through an airline schedule. *2nd USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar*. Orlando, Florida, EE.UU.

Bisailon, S., Cordeau, J.F., Laporte, G. & Pasin, F. (2010). *A large neighbourhood search heuristic for the aircraft and passenger recovery problem*. Recuperado el 6 de julio de 2011, de <http://neumann.hec.ca/chairelogistique/jfc.shtml>

Bratu, S. & Barnhart, C. (2006). Flight operations recovery: New approaches considering passenger recovery. *Journal of Scheduling*, 9, 279-298.

Bureau of Transportation Statistics. (2011). Detailed statistics departures. Recuperado el 6 de julio de 2011 de <http://www.bts.gov/xml/ontimesummarystatistics/src/dstat/OntimeSummaryDepatures.xml>

Burke, E.K., De Causmaecker, P., De Maere, G., Mulder, J., Paelinck, M. & Vanden Berghe, G. (2010). A multi-objective approach for robust airline scheduling. *Computers & Operations Research*, 37(5), 822-832.

Castro, A. & Oliveira, E. (2011). Airline operations control: A new concept for operations recovery. *Airline industry: strategies, operations and safety*, 61-97.

Chiraphadhanakul, V. (2010). *Routing and Scheduling Models for Robust Allocation of Slack*. (Tesis de maestría no publicada). Massachusetts Institute of Technology, EE.UU.

Chiraphadhanakul, V. & Eggenberg, N. (2009). *Technical Report: How to evaluate the robustness of airlines schedules*. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Suiza.

Clausen, J., Larsen, A., Larsen, J. & Rezanova, N.J. (2010). Disruption management in the airline industry: Concepts, models and methods. *Computers & Operations Research*, 37, 809-821.

Cuevas, R. (2010). *Simulación de Itinerarios de Transporte Aéreo*. (Memoria de Título no publicada). Pontificia Universidad Católica de Chile.

Eggenberg, N. (2009). *Combining Robustness and Recovery for Airline Schedules*. (Disertación doctoral no publicada). Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Suiza.

Eggenberg, N. & Salani, M. (2009). *Technical Report : Uncertainty feature optimization for the airline scheduling problem*. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Suiza.

Fuhr, B. (2007). *Technical report: Robust flight scheduling - an analytic approach to performance evaluation and optimization*. Clausthal University of Technology, Alemania.

Jacobs, P., Verbraeck, A. & Mulder, J. (2005). Flight scheduling at KLM. *Winter Simulation Conference* (pp. 299-306). Orlando, Florida, EE.UU.

Janic M. (2005). Modeling the large scale disruption of an airline network. *Journal of Transportation Engineering*, 131(4), 249-260.

Kohl, N., Larsen, A., Larsen, J., Ross, A. & Tiourine, S. (2007). Airline disruption management perspectives, experiences and outlook. *Journal of Air Transport Management*, 13, 149-162.

Lan, S., Clarke, J.P. & Barnhart, C. (2006). Planning for robust airline operations: Optimizing aircraft routings and flight departure times to minimize passenger disruptions. *Transport Science*, 40(1), 15-28.

- Lapp, M., AhmadBeygi, S., Cohn, A.M. & Tsimhoni, O. (2008). A recursion-based approach to simulating airline schedule robustness. *Winter Simulation Conference* (pp. 2661-2667). Orlando, Florida, EE.UU.
- Lee, L. H., Lee, C. U. & Tan, Y. P. (2007). A multiobjective genetic algorithm for robust flight scheduling using simulation. *European Journal of Operational Research*, 177, 1948-1968.
- Lee, L.H., Huang, H.C., Lee, C., Chew, E.P., Wikrom, J., Yong, Y.Y., Liang, Z., Leong, C.H., Tan, Y.P., Namburi, K., Johnson, E.L. & Banks, J. (2003). Discrete event simulation model for airline operations: SIMAIR. *Winter Simulation Conference* (pp. 1656-1662). Orlando, Florida, EE.UU.
- Liu T.K., Chen C.H & Jyh-Horng Chou J.H.. (2010). Optimization of short-haul aircraft schedule recovery problems using a hybrid multiobjective genetic algorithm. *Expert Systems with Applications*. 37(3), 2307-2315.
- Lohatepanont M. & Barnhart C. (2004). Airline schedule planning: integrated models and algorithms for schedule design and fleet assignment. *Transportation Science*, 38, 19-32.
- Love, M., Sorensen, K. & Larsen, J. (2001). *Technical Report: Using Heuristic to Solve the Dedicated Aircraft Recovery Problem*. Technical University of Denmark, Dinamarca.
- Marla, L. & Barnhart, C. (2010). *Robust optimization: Lessons learned from aircraft routing* (Working paper). Recuperado el 6 de julio de 2011 de, http://web.mit.edu/~lavanya/www/docs/Marla_Barnhart_Robust_AR.pdf
- Mercier, A. & Soumis, F. (2007). An integrated aircraft routing, crew scheduling and flight retiming model. *Computers and Operations Research*, 34(8), 2251-2265.
- Rosenberger, J., Johnson, E. & Nemhauser, G. (2004). A robust fleet assignment model with hub isolation and short cycles. *Transportation Science*, 38(3), 357-368.
- Rosenberger, J., Schaefer, A.J., Goldsman, D., Kleywegt, A.J., Johnson, E.L. & Nemhauser, G.L. (2002). A stochastic model of airline operations. *Transportation Science*, 36(4), 357-377.
- Sarmadi, S. (2004). *Minimizing airline passenger delay through integrated flight scheduling and aircraft routing*. (Tesis de maestría no publicada). Massachusetts Institute of Technology, EE.UU.
- Schumer, C. E. & Maloney, C. B. (2008). *Your flight has been delayed again: flight delays cost passengers, airlines, and the U.S. economy billions*. The U.S. Senate Joint Economic Committee.

- Sohoni, M., Lee, Y-C. & Klabjan, D. (2009). Robust airline scheduling under block time uncertainty (Working paper). Indian School of Business, Hyderabad, India.
- Stojkovic, G., Soumis, F., Desrosiers, J. & Solomon, M. (2002). An optimization model for a real-time flight scheduling problem. *Transportation Research*, 36, 779-788.
- Teodorovic, D. & Stojkovic, G. (1995). Model to reduce airline schedule disturbances. *Journal of Transportation Engineering*, 121, 324-331.
- Tu, Y., Ball, M. & Jank, W. (2006). Estimating flight departure delay distributions - a statistical approach with long-term trend and short-term pattern. Working paper, Department of Decision and Information Technologies, University of Maryland.
- Weide, O. (2009). *Robust and Integrated Airline Scheduling*. (Disertación doctoral no publicada). The University of Auckland, Nueva Zelanda.
- Wu, C. (2005). Inherent Delays and Operational Reliability of Airline Schedules. *Journal of Air Transport Management*, 11, 273-282.