

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA INDUSTRIAL Y DE SISTEMAS**



**ELABORACION DE UN METODO PARA OPTIMIZAR LA
ASIGNACION DE TRIPULACION A ITINERARIOS DE VUELOS
PARA LAS AEROLINEAS**

**TESIS
PARA OBTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO DE SISTEMAS**

John Alex Vásquez Jesús

**Lima, Perú
2008**

Digitalizado por:

**Consortio Digital del
Conocimiento MebLatam,
Hemisferio y Dalse**

Para mis queridos padres Melchor y Dora por su apoyo inconmensurable, y mi hermana Roxally.

Para mi Angelita Daniela y mi esposa Ángela que me han motivado a culminar este trabajo.

Para mi tía y madrina Plácida por mantenernos siempre unidos, que Dios la tenga en su gloria.

Para las familias Vásquez Cáceres y Jesús Narváez por haber estado siempre conmigo.

AGRADECIMIENTOS

Mis más sincero agradecimiento a mis padres, por impulsar mi carrera profesional, apoyándome desde siempre, a mi esposa por ayudarme en la finalización de mis estudios en la universidad y a mi hijita Daniela quien me ha motivado a culminar la Tesis.

ÍNDICE

Introducción	1
Ámbito de la Investigación.....	3
Descripción del Contenido.....	4
Capítulo I Marco Teórico y Metodológico.....	6
1.1. Marco de Referencia	6
1.1.1. Programación Lineal.....	6
1.1.2. Estructuras de Datos: Árboles y Grafos.....	8
1.1.3. Algoritmo Voraz	18
1.2. Fundamentación: Requerimientos de la Aviación Comercial	21
1.2.1. Planificación de Vuelos y Asignación de Flota.....	22
1.2.2. Planificación de la Tripulación	23
1.2.3. Control de Operaciones Irregulares.....	25
Capítulo II Antecedentes - Métodos de Solución Existentes.....	28
2.1. Esquema General	28
2.1.1. Método Básico - Experto Humano	29
2.1.2. Método Clásico - Solución Secuencial.....	31
2.1.3. Método Moderno - Solución Integrada.....	40
2.2. Modelos de Solución - Esquema Clásico	42
2.2.1. Heurística Constructiva.....	42
2.2.2. Programación Matemática.....	44
2.2.3. Modelos basados en Redes	52
2.2.4. Meta-Heurísticas.....	53
2.2.5. Otras Aproximaciones.....	55
2.3. Modelos de Solución - Esquema Integrado.....	57

2.3.1. Esquemas Parcialmente Integrados	58
Capítulo III Planteamiento del Problema	61
3.1. Descripción del Contexto Social.....	61
3.2. Delimitación del Problema.....	63
3.3. Formulación del Problema de Asignación de la Tripulación	64
3.3.1. Problema Principal.....	64
3.3.2. Restricciones y Consideraciones	65
3.3.3. Características de la Solución	68
3.4. Justificación e Importancia	70
3.5. Objetivos de la Investigación.....	76
3.6. Hipótesis y Variables.....	77
3.6.1. Hipótesis de Trabajo	78
3.6.2. Hipótesis Conceptual	81
3.6.3. Hipótesis Operativa.....	82
3.7. Definición de Métricas / Indicadores de Performance	83
3.8. Método de Contrastación de la Hipótesis.....	83
Capítulo IV Análisis y Desarrollo del Método de Asignación	86
4.1. Análisis de Requisitos	86
4.1.1. Programa de Vuelos	87
4.1.2. Programa de Reservas	87
4.1.3. Estructura de Costos y Pagos	88
4.1.4. Establecimiento de Actividades Pre-programadas	88
4.1.5. Esquema de Asignación	89
4.1.6. Orientación al Equipo.....	90
4.2. Problemas y Necesidades del Método Actual	91
4.3. Estrategia de la Solución.....	92
4.4. Modelamiento del Problema.....	93
4.5. Desarrollo del Método de Asignación.....	94
4.5.1. Descomposición del PPT Global en Redes Parciales.....	95
4.5.2. Solución de las Redes Parciales	100
4.5.3. Amplitud / Alcance de las Redes Parciales.....	104

4.5.4. Construcción de la Solución Global	109
4.5.5. Especificación de Pasos del Método Propuesto	110
4.6. Modelo de solución basado en el Método Propuesto.....	117
4.6.1. Descomposición de la Red Global.....	117
4.6.2. Solución de una Red Parcial.....	120
4.6.3. Diagrama de Proceso del Modelo de Solución	122
Capítulo V Análisis e Interpretación de la Información.....	125
5.1. Escenario de Pruebas	125
5.2. Programa de Asignación de Tripulación por el Método de Redes Parciales.....	127
5.2.1. Construcción del Programa Método de Redes Parciales.....	127
5.3. Toma de Resultados	141
5.3.1. Características de la Muestra	141
5.3.2. Datos de las Pruebas Realizadas	148
5.3.3. Análisis de Resultados.....	150
5.3.4. Reportes de la Asignación de Tripulación.....	155
Conclusiones y Recomendaciones	161
Conclusiones.....	161
Recomendaciones.....	164
Glosario de Términos.....	166
Bibliografía.....	184
Anexos.....	186
Anexo A: Codificación del Programa.....	186
Anexo B: Pseudocódigo del Método de redes Parciales.....	205

LISTA DE TABLAS

Tabla 5-1. Codificación Resumida del Programa Asignación Método de Redes	129
Tabla 5-2. Codificación Resumida de Descomposición en Redes Parciales	132
Tabla 5-3. Codificación Resumida de Solución de una Red Parcial	138
Tabla 5-4. LAN Perú – Vuelos Internacionales al 17/06/2008	143
Tabla 5-5. LAN Perú – Vuelos Nacionales al 05/09/2008 Parte I.....	144
Tabla 5-6. LAN Perú – Vuelos Nacionales al 05/09/2008 Parte II.....	145
Tabla 5-7. LAN Perú – Rutas Nacionales Intermedias al 05/09/2008	146
Tabla 5-8. Datos de entrada y tamaños considerados.....	148
Tabla 5-9. Datos de salida y tamaños considerados	150
Tabla 7-1. Conceptos Claves y Términos	166
Tabla 9-1. Codificación del Programa Asignación Método de Redes	186
Tabla 9-2. Codificación de Descomposición en Redes Parciales	192
Tabla 9-3. Codificación de Solución de una Red Parcial	199

LISTA DE GRÁFICOS

Figura 2-1. Aproximaciones a la Programación de Tripulación en Aerolíneas (PPT)	34
Figura 2-2. PPT Secuencial e Integrado	41
Figura 3-1. Presentación del Problema de Asignación de la Tripulación	65
Figura 3-2. AEA - Estado de la Industria. Distribución de Costos Operativos.	71
Figura 3-3. LAN Airlines – Estado de Resultados. Costos de la Tripulación	72
Figura 3-4. IBERIA Group – Estado de Resultados. Costos de la Tripulación	73
Figura 3-5. SH&E - Costos Operativos de las Aerolíneas. Distribución a Nivel Mundial	74
Figura 3-6. SH&E - Costos Operativos Directos de las Aerolíneas.....	75
Figura 3-7. Red Centralizada - American Airlines (USA), Rutas Nacionales	77
Figura 3-8. Red Point-to-Point – Air One (Italia), Rutas Nacionales	78
Figura 3-9. Red Parcial, sub-problema pseudos-independiente	79
Figura 3-10. Método de Contrastación de Hipótesis	85
Figura 4-1. Ciclo de Vida del Equipo (basado en Lacoursiere 1980)	90
Figura 4-2. Enfoque General del PPT Global	93
Figura 4-3. Enfoque de Redes del PPT Global.....	96
Figura 4-4. Vuelos por Dependencia	98
Figura 4-5. Vuelos por Intervalos de Tiempo	99
Figura 4-6. Gráfico de Red de 1 o muy pocos vuelos	105
Figura 4-7. Ampliación del Alcance de una Red Parcial	106
Figura 4-8. Ampliación de alcance de Red Parcial por concatenación de VIII	

Redes	108
Figura 4-9. Solución Global por sumatoria de Soluciones Parciales.....	110
Figura 4-10. Diagrama de Actividad del Método propuesto	111
Figura 4-11. Diagrama del Proceso Generar Red Parcial.....	114
Figura 4-12. Diagrama del Proceso Solucionar Red Parcial.....	116
Figura 4-13. Diagrama de Flujo Principal del Algoritmo de Descomposición	118
Figura 4-14. Diagrama de Flujo Recursivo del Algoritmo de Generar Red Parcial.....	119
Figura 4-15. Diagrama de Flujo Procesar Red Parcial del Modelo de Solución	121
Figura 4-16. Diagrama de Flujo General del Modelo de Solución.....	124
Figura 5-1. Gráfico del escenario de pruebas Método de Redes vs. Experto Humano	126
Figura 5-2. LAN Perú - Red de Vuelos Nacionales.....	147
Figura 5-3. LAN Perú - Red de Vuelos Internacionales	147
Figura 5-4. Resultado de la Asignación de Tripulación – Vuelos completados	151
Figura 5-5. Resultado de la Asignación de Tripulación – Puestos asignados	152
Figura 5-6. Distribución de la Tripulación asignada por funciones de vuelo	152
Figura 5-7. Distribución de Funciones de Vuelo no Cubiertas	153
Figura 5-8. Distribución de Funciones de Vuelo no Cubiertas	155
Figura 5-9. Reporte de Vuelo Internacional y Tripulación Asignada – Parte I	156
Figura 5-10. Reporte de Vuelo Internacional y Tripulación Asignada – Parte II	158
Figura 5-11. Reporte de Vuelos asignados por Tripulante.....	159
Figura 5-12. Reporte de Reservas asignadas	160

RESUMEN

La Asignación de Tripulación a itinerarios de vuelos para las aerolíneas es un problema de alta complejidad combinatorial por naturaleza, debido al gran número de restricciones involucradas y de vuelos correspondientes al periodo de programación elegido, grandes aerolíneas pueden tener hasta 1000 vuelos/día como el caso de Iberia. El proceso de programación de la tripulación es uno de los 11 procesos de programación en el programa comercial de una aerolínea, siendo a nivel de costos de operación el segundo más importante sólo superado por el costo de combustible.

A nivel general para solucionar el Problema de Programación de la Tripulación se ha adoptado la aproximación secuencial, dividiendo el problema en 2 sub-problemas Problema de Rotación de la Tripulación y Problema de Rostering de la Tripulación y alcanzando así soluciones óptimas mediante diversos enfoques. No obstante el procedimiento secuencial tiene desventajas las cuales se traducen en costos adicionales, es por ello que se hace necesario solucionar el problema completo, unificando los dos pasos de programación de tripulación, lo cual constituye el reto actual de la investigación del problema de asignación de tripulación.

El método propuesto plantea el problema como una colosal red de destinos de vuelo que se unen a través de itinerarios, los cuales en el tiempo pueden recorrer más de una vez una misma rama de la red. El método a desarrollar plantea que es posible dividir la colosal red en sub-redes pseudo-independientes "Redes Parciales", las cuales son resueltas por separado

X

"Optimización Intra-redes", teniendo lugar posteriormente la convergencia de todas las "Redes Parciales", generándose así la solución optimizada de la colosal red inicial.

Palabras claves: aerolínea, problema de asignación de la tripulación (PAT), problema de programación de la tripulación (PPT), método, modelo, redes, algoritmo voraz.

ABSTRACT

The allocation of Crew to travel itineraries of the flight companies is a highly complex combinatorial problem by nature due to it has a lot of restrictions numbers involved and flights for the programming period chosen, the major airlines may have till 1000 flights per day like Iberia. The programming process of the crew is one of 11 programming processes in the agenda of a commercial airline, being at the level of operating costs the important second biggest problem just exceeded by the cost of fuel.

In a general level to solve the Crew Scheduling Problem (CSP) it has taken a sequential approach, dividing the CSP 2 in sub-problems Crew Pairing Problem and Crew Rostering Problem and reaching optimum solutions through a variety of approaches. However the sequential procedure has disadvantages which result in additional costs, which is why it is necessary to solve the problem completely, combining the two steps programming of crew, which is the current challenge of the problem investigation of crew allocation.

The proposed method raises the issue as a awesome network of flight destinations that are linked through routes, which over time can travel more than once a single branch of the network. The method to develop show us that is possible to divide the awesome network into pseudo-independent sub-networks called "Partial Networks", which are resolved separately called "Intra-networks Optimization", taking place later convergence of all "Partial Networks", thereby generating solution optimized for the initial awesome network.

Keywords: airline, crew assignment problem (CAP), crew scheduling problem (CSP), method, model, networks, greedy algorithm.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día tanto la oferta como la gran demanda de viajes aéreos han promovido el crecimiento de aerolíneas existentes y la creación de otras nuevas, tales como Iberia, que en 2006 amplía su oferta de itinerarios en Madrid, y aerolíneas de reciente creación como Vueling y Air Plus Comet. Este mercado en crecimiento se ha vuelto cada vez más competitivo y ello demanda la búsqueda de soluciones que respondan a los requerimientos operativos propios de la aviación comercial.

Las Aerolíneas deben afrontar diversos problemas tales como: el "Planeamiento Comercial", "Gestión de la Tripulación", "Control de Operaciones" y "Reacomodo de Pasajeros" entre otros. Uno de los principales problemas de las Aerolíneas, y que será el que nos ocupe, es la asignación de "Tripulación" a sus itinerarios de vuelos programados, la cual establecerá el personal de vuelo, tanto técnico (tripulación de cabina de mando: pilotos, co-pilotos e ingenieros de vuelo) como de asistencia (tripulación de cabina de pasajeros: supervisores, y auxiliares de vuelo) asignado a cada avión que cubre una determinada ruta de vuelo.

La asignación de tripulación a los itinerarios de vuelo, es un problema complejo pues requiere hacerse teniendo en cuenta las diversas limitaciones/restricciones y criterios, tales como: normativas vigentes de la aviación comercial, convenios propios de las aerolíneas y otras consideraciones de índole personal. Adicionalmente hay que considerar que

a nivel cuantitativo, estamos hablando de cantidades importantes de datos a procesar, pues para una aerolínea grande, la oferta diaria de vuelos es del orden de centenas (Air France: 710 vuelos/día, Iberia: 1000 vuelos/día), y los periodos requeridos de programación de tripulación son de 2 semanas a 1 mes, es decir que la solución planteada debe ser capaz de optimizar la asignación de tripulación para miles de vuelos a la vez (30,000 vuelos/mes en el caso de Iberia).

Dada la gran repercusión que tendría la ausencia no-planificada de algún miembro de la tripulación (bajas médicas u otros contratiempos), es común que las aerolíneas incorporen en su planificación a personal asignado al servicio de "Reservas" tanto de personal técnico como de asistencia, la cuales pueden ser Operativas (en la base) o Imaginarias (en su domicilio). Las grandes compañías (p.ej. Iberia y Spanair) suelen tener además uno o dos aparatos en tierra, con tripulaciones preparadas, para atender cualquier anomalía.

Debido al elevado número de vuelos que se tienen por día, una solución de menor costo para el problema de asignación de tripulación, puede significar un ahorro de millones de dólares al año, por ello encontrar soluciones cada vez mejores al problema de asignación de tripulación es de vital importancia para las aerolíneas.

El problema consiste en optimizar los costos derivados de la asignación de tripulación a los vuelos programados de la aerolínea, considerando tanto las restricciones inherentes del proceso de asignación, así como también otros factores a nivel individual que afectan a la tripulación y por tanto a su buen hacer (p.ej. incompatibilidad entre miembros de la tripulación), y que son incluidos también como indicadores de calidad de la solución encontrada. La programación resultante debe lograr asignar tripulación a todos los itinerarios programados, al menor costo posible y con el mayor nivel de satisfacción del

personal de vuelo.

También deben de cubrirse las Reservas respectivas que las Aerolíneas tengan definidas, tanto Domiciliarias/Imaginarias como Operativas (en la base), las cuales tienen como finalidad suplir alguna baja no-planificada de algún miembro de la tripulación.

ÁMBITO DE LA INVESTIGACIÓN

El objetivo general es elaborar un método para optimizar la asignación de tripulación a itinerarios de vuelos programados para un período de tiempo, en aerolíneas con un volumen importante de vuelos y tripulación, adicionalmente se han considerado las siguientes metas de la investigación.

1. Introducir brevemente los diferentes procesos de optimización propios de la gestión que realizan las aerolíneas, tanto a nivel estratégico, como de planeamiento y de operación.
2. Dar a conocer las diferentes soluciones existentes al problema de Asignación de Tripulación y sus respectivos modelos de aplicación.
3. Dar a conocer las perspectivas actuales de la investigación del problema de asignación de tripulación, así como también las nuevas consideraciones a tener en cuenta para la solución buscada.
4. Implementar el método elaborado y contrastar sus resultados.

El problema de asignación de tripulación ha sido ampliamente investigado y bajo diversos enfoques, conociéndose soluciones diversas al problema, el esquema clásico de dividir el problema en dos pasos secuenciales: generación de rotaciones de vuelos y asignación de rotaciones a la tripulación, es el más difundido, no obstante los esfuerzos en investigación se orientan a tratar el problema de forma integrada, para mejorar la calidad de la solución obtenida.

Se describe a continuación el alcance del presente trabajo, cada uno de los puntos mencionados son discutidos en la sección "4.1. Análisis de Requisitos".

- El estudio realizado está orientado a la búsqueda de una solución integrada para el método de asignación de tripulación, la cual resulta más eficaz que el esquema clásico de dos pasos secuenciales, el esquema integrado se encuentra aún en etapa de investigación (ver "2.3. Modelos de Solución - Esquema Integrado").
- Se tendrá en cuenta que la solución propuesta acepte todas las restricciones y consideraciones propias de la aviación comercial, es decir todas las variables a considerar en el problema (ver "3.3.2. Restricciones y Consideraciones"), no obstante para la prueba de concepto sólo se considerarán las más representativas.
- Se contemplará en la solución la inclusión de estrategias de asignación de tripulación comúnmente aceptadas tales como "*degrado*" y "*traslado aéreo*" (también conocidos como downgrading y deadhead respectivamente, ver Glosario).
- A nivel de capacidad de procesamiento, la solución propuesta deberá ser capaz de procesar un volumen de datos acorde con el requerido por medianas y grandes aerolíneas, el cual contempla periodos de programación entre de 2 semanas a 1 mes y hasta cientos de vuelos al día.

DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO

En la presente sección Preliminar se ha expuesto y situado el problema motivo del presente trabajo, y se ha dado cuenta también de su importancia y complejidad, en los capítulos posteriores se describen las diferentes etapas del estudio realizado y de los resultados obtenidos.

En los Capítulos I y II se describe el fundamento teórico y antecedentes asociados al problema, presentando las herramientas, tecnología y metodología utilizadas. Se realiza un análisis de otras soluciones planteadas de las cuales se ha tenido conocimiento.

En el Capítulo III se realiza el Análisis del Problema planteado, tratando lo referente a su situación, delimitación y justificación entre otros. En este capítulo se plantean las hipótesis que rigen el desarrollo del presente trabajo.

En el Capítulo IV se desarrolla el análisis y elaboración del método planteado, se detalla el modelamiento que se plantea del problema y la solución que se propone. Adicionalmente se diseña un modelo que implementa el método planteado y que se basa en un algoritmo voraz.

El Capítulo V detalla el escenario considerado para la realización de pruebas del método planteado, y los resultados obtenidos para contrastar las hipótesis planteadas. Se describen aquí los diversos módulos implementados y la función de cada uno de ellos, los algoritmos utilizados, diseño del programa, forma de ejecución y pruebas realizadas. Se analizan aquí los resultados obtenidos de las pruebas realizadas.

En el Capítulo VI se presentan las conclusiones que se derivan del presente trabajo, así como las recomendaciones relativas a diversos aspectos, tales como la utilización del método elaborado y guías para próximos estudios.

En las secciones finales se presenta el glosario con los principales conceptos y definiciones necesarios para la comprensión del presente trabajo y la bibliografía utilizada.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

1.1. MARCO DE REFERENCIA

Se describen aquí las diferentes técnicas y metodologías utilizadas para el desarrollo del presente trabajo.

1.1.1. Programación Lineal

La Programación Lineal es un procedimiento o algoritmo matemático mediante el cual se resuelve un problema indeterminado, formulado a través de ecuaciones lineales, optimizando la función objetivo, también lineal.

Consiste en optimizar (minimizar o maximizar) una función lineal, que denominaremos función objetivo, de tal forma que las variables de dicha función estén sujetas a una serie de restricciones que expresamos mediante un sistema de inecuaciones lineales.

Variables

Las variables son números reales mayores o iguales a cero, es decir

$$X_i \geq 0.$$

En caso que se requiera que el valor resultante de las variables sea un número entero, el procedimiento de resolución se denomina Programación entera.

Restricciones

Las restricciones pueden ser de la forma:

$$\text{Tipo 1: } A_j = \sum_{i=1}^N a_{i,j} \times X_i$$

$$\text{Tipo 2: } B_j \leq \sum_{i=1}^N b_{i,j} \times X_i$$

$$\text{Tipo 3: } C_j \geq \sum_{i=1}^N c_{i,j} \times X_i$$

Donde:

- A = valor conocido a ser respetado estrictamente.
- B = valor conocido que debe ser respetado o puede ser superado.
- C = valor conocido que no debe ser superado
- j = número de la ecuación, variable de 1 a M (número total de restricciones)
- a; b; y, c = coeficientes técnicos conocidos
- X = Incógnitas, de 1 a N
- i = número de la incógnita, variable de 1 a N.

En general no hay restricciones en cuanto a los valores de N y M. Puede ser $N = M$; $N > M$; ó, $N < M$.

Sin embargo si las restricciones del Tipo 1 son N, el problema puede ser

determinado, y puede no tener sentido una optimización.

Los tres tipos de restricciones pueden darse simultáneamente en el mismo problema.

Función Objetivo

La función objetivo puede ser:

$$\text{Máx. } Z = \sum_{i=1}^N f_i \times X_i$$

ó

$$\text{Mín. } Z = \sum_{i=1}^N f_i \times X_i$$

Donde:

- X_i = variables de decisión mayores o iguales a cero.

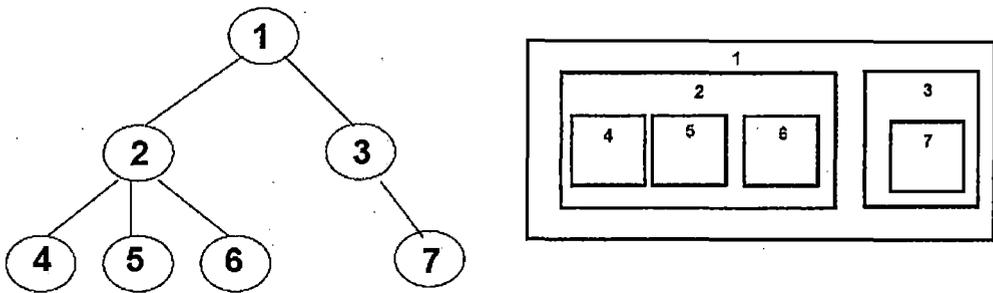
1.1.2. Estructuras de Datos: Árboles y Grafos

1.1.2.1. Árboles

Un árbol es la estructura de datos que refleja frecuentemente relaciones de jerarquía entre los datos. Es una estructura de datos ampliamente usada que emula la forma de un árbol (un conjunto de nodos conectados). Un nodo es la unidad sobre la que se construye el árbol y

puede tener cero o más nodos hijos conectados a él. Se dice que un nodo a es padre de un nodo b si existe un enlace desde a hasta b (en ese caso, también decimos que b es hijo de a).

Representación como Grafo y Conjunto



Sólo puede haber un único nodo sin padres, que llamaremos raíz. Un nodo que no tiene hijos se conoce como hoja. Los demás nodos (tienen padre y uno o varios hijos) se les conoce como rama.

Definiciones Básicas

Concepto	Definiciones	Ejemplo	Observaciones
Antecesor Directo	La clave "X" está inmediatamente por encima de la clave "Y" en el árbol y además están unidas.	El 2 es antecesor directo del 4, del 5 y del 6	La clave "X" es antecesora directa de la clave "Y"
Antecesor	Existe una sucesión de claves antecesoras directas	El 1 es antecesor del 4	La clave "X" es antecesora de "Y"

	para llegar desde "Y" hasta "X".		
Sucesor Directo	La clave "X" está inmediatamente por debajo de la clave "Y" en el árbol y además están unidas.	El 5, el 4 y el 6 son sucesores directos del 2	Una clave "X" es sucesora directa de otra clave "Y"
Sucesor	Existe una sucesión de claves sucesoras directas para llegar desde "X" hasta "Y".	El 4 es sucesor del 1	La clave "X" es sucesora de "Y"
Nodo Raíz	Aquel que no tiene antecesores.	El 1	
Nodo Hoja	Aquel que no tiene sucesores	El 4, el 5, el 6 y el 7	
Nodo Interno	Aquel que no es ni raíz ni hoja.	El 2 y el 3	
Nivel de un Nodo	Nº de tramos que hay que recorrer desde el nodo raíz hasta el nodo del que quiero calcular su nivel.	El nodo 7 tiene nivel 3.	Se considera que la raíz está en el nivel 1.
Grado de un Nodo	Nº de descendientes directos que tiene.	El 1 tiene grado 2. El 2 tiene grado 3.	
Grado de un Árbol	Mayor de los grados de los nodos que componen el árbol.	Grado del árbol = 3.	Un árbol de grado 1 = Lista. Un árbol de grado 2 = Árbol Binario.
Altura de un Árbol	Mayor de los niveles de los nodos que forman el árbol.	Altura del árbol = 3.	

Longitud de Camino	Nº de arcos que hay que atravesar para ir desde la raíz hasta un nodo, contando la raíz como 1.	Longitud de camino al nodo 7 = 3.	La longitud de camino del nodo raíz se considera 1. Coincide con el NIVEL DE UN NODO.
Longitud de camino interno	Nº de arcos que hay que atravesar para ir desde la raíz hasta un nodo. La longitud de camino del nodo raíz se considera 1.	$1+2+2+3+3+3+3 = 17$	$\sum_{i=1..n} i * n^i$ de claves, para
Árbol de expansión	Resultante de hacer que todos los nodos del árbol tengan el mismo grado.		Implica que hay que añadir una serie de Nodos Especiales que no pertenecen al árbol para conseguir esto.
Longitud de camino externo	Suma de las longitudes de camino de los nodos especiales (nodos extras que se añaden a un árbol para llenar las ramas vacías de modo que se obtenga un árbol extendido).	$(4*3)*4 + 2*3 + 2 = 56$	Los nodos 4, 5, 6 y 7 tendrían asociados 3 nodos especiales c/u, con long. de camino 4. El nodo 3 tendría 2 nodos especiales con long. de camino 3. El nodo 1 tendría 1 nodo especial con long. de camino 2.

Recorridos sobre Árboles

- **Recorridos en Profundidad:** se alejan cuanto antes de la raíz.

Tipo de Recorrido	Secuencia de nodos
Pre Orden	{ 5; 3; 1; 4; 8; 6; 9 }
Post Orden	{ 1; 4; 3; 6; 9; 8; 5 }
Orden Central	{ 1; 3; 4; 5; 6; 8; 9 }

- **Recorrido en Amplitud:** trata consecutivamente los nodos que se encuentran al mismo nivel.

Tipo de Recorrido	Secuencia de nodos
Amplitud	{ 5; 3; 8; 1; 4; 6; 9 }

Características y Utilidades de los Recorridos

- **Pre-orden:** Se va a utilizar siempre que queramos comprobar alguna propiedad del árbol (p.ej.: localizar elementos).
- **Orden Central:** Se utiliza siempre que nos pidan algo relativo a la posición relativa de las claves o algo que tenga que ver con el orden de las claves (p.ej.: ¿Cuál es la 3ra clave?).
- **Post-orden:** Se utiliza poco. Su principal utilidad consiste en liberar la memoria ocupada por un árbol.
- **Amplitud:** Se utiliza siempre que nos pidan operaciones cuyo tratamiento se haga por niveles.

1.1.2.2. Grafos

Un grafo es un conjunto, no vacío, de objetos llamados vértices (o nodos) y una selección de pares de vértices, llamados aristas (arcs en inglés) que pueden ser orientados o no. Típicamente, un grafo se representa mediante una serie de puntos (los vértices) conectados por líneas (las

aristas).

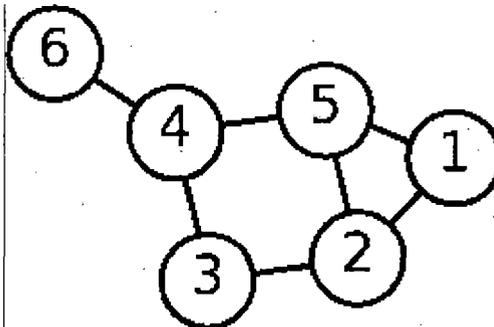


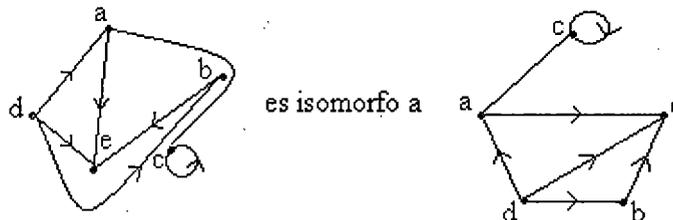
Diagrama de un Grafo con 6 vértices y 4 aristas

Definiciones

- **Vértice:** Un vértice es la unidad fundamental de la que están formados los grafos. Los vértices son tratados como un objeto indivisible y sin propiedades, aunque puedan tener una estructura adicional dependiendo de la aplicación por la cual se usa el grafo; por ejemplo, una red semántica es un grafo en donde los vértices representan conceptos o clases de objetos.
- **Grafo:** Un grafo es una pareja de conjuntos $G = (V,A)$, donde V es el conjunto de vértices, y A es el conjunto de aristas, este último es un conjunto de pares de la forma (u,v) tal que u,v pertenecen a V , tal que u es diferente de v . Para simplificar, notaremos la arista (a,b) como ab .
- **Subgrafo:** Un subgrafo de un grafo G es un grafo cuyos conjuntos de vértices y aristas son subconjuntos de los de G . Se dice que un grafo G contiene a otro grafo H si algún subgrafo de G es H o es isomorfo a H (dependiendo de las necesidades de la situación)
- El subgrafo inducido de G es un subgrafo G' de G tal que contiene

todas las aristas adyacentes al subconjunto de vértices de G.

- **Aristas dirigidas y no dirigidas:** En algunos casos es necesario asignar un sentido a las aristas, por ejemplo, si se quiere representar la red de las calles de una ciudad con sus direcciones únicas. El conjunto de aristas será ahora un subconjunto de todos los posibles pares ordenados de vértices, con (a, b) diferente de (b, a) . Los grafos que contienen aristas dirigidas se denominan grafos orientados, como el siguiente:



Las aristas no orientadas se consideran bidireccionales para efectos prácticos (equivale a decir que existen dos aristas orientadas entre los nodos, cada una en un sentido).

En el grafo anterior se ha utilizado una arista que tiene sus dos extremos idénticos: es un lazo (o bucle), y aparece también una arista bidireccional, y corresponde a dos aristas orientadas.

Aquí $V = \{ a, b, c, d, e \}$, y $A = \{ (a, c), (d, a), (d, e), (a, e), (b, e), (c, a), (c, c), (d, b) \}$.

Se considera la característica de "grado" (positivo o negativo) de un vértice v (y se indica como (v)), como la cantidad de aristas que llegan o salen de él; para el caso de grafos no orientados, el grado de un vértice es simplemente la cantidad de aristas incidentes a este vértice. Por ejemplo, el grado positivo (salidas) de d es 3, mientras que el grado

hamiltoniano en el grafo que representa el museo (los vértices son las salas, y las aristas los corredores o puertas entre ellas).

Se habla también de camino hamiltoniano si no se impone regresar al punto de partida, como en un museo con una única puerta de entrada. Por ejemplo, un caballo puede recorrer todas las casillas de un tablero de ajedrez sin pasar dos veces por la misma: es un camino hamiltoniano. Ejemplo de un ciclo hamiltoniano en el grafo del dodecaedro.

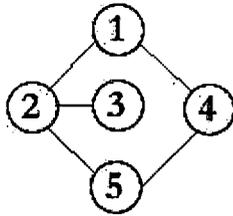
Hoy en día, no se conocen métodos generales para hallar un ciclo hamiltoniano en tiempo polinómico, siendo la búsqueda por fuerza bruta de todos los posibles caminos u otros métodos excesivamente costosos. Existen, sin embargo, métodos para descartar la existencia de ciclos o caminos hamiltonianos en grafos pequeños.

El problema de determinar la existencia de ciclos hamiltonianos, entra en el conjunto de los NP-completos.

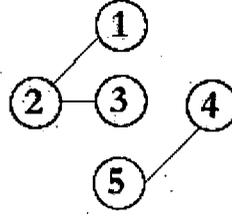
Caracterización de grafos

- **Grafos simples:** Un grafo es simple si a lo sumo sólo 1 arista une dos vértices cualesquiera.
- **Grafos conexos:** Un grafo es conexo si cada par de vértices está conectado por un camino; es decir, si para cualquier par de vértices (a, b) , existe al menos un camino posible desde a hacia b .
- Un grafo es fuertemente conexo si cada par de vértices está conectado por al menos dos caminos disjuntos; es decir, es conexo y no existe un vértice tal que al sacarlo el grafo resultante sea desconexo.

Grafo conexo



Grafo no conexo



- **Grafos completos:** Un grafo G es bipartito si puede expresarse como $G = \{V_1 \cup V_2, A\}$, (es decir, sus vértices son la unión de dos grupos de vértices), bajo las siguientes condiciones:
 - o V_1 y V_2 son disjuntos y no vacíos.
 - o Cada arista de A une un vértice de V_1 con uno de V_2 .
 - o No existen aristas uniendo dos elementos de V_1 ; análogamente para V_2 .

Bajo estas condiciones, el grafo se considera bipartito, y puede describirse informalmente como el grafo que une o relaciona dos conjuntos de elementos diferentes, como aquellos resultantes de los ejercicios y puzzles en los que debe unirse un elemento de la columna A con un elemento de la columna B.

Aplicaciones

Gracias a la teoría de grafos se pueden resolver diversos problemas como por ejemplo la síntesis de circuitos secuenciales, contadores o sistemas de apertura.

Los grafos se utilizan también para modelar trayectos como el de una línea de autobús a través de las calles de una ciudad, en el que podemos obtener caminos óptimos para el trayecto aplicando diversos algoritmos

como puede ser el algoritmo de Floyd.

Para la administración de proyectos, utilizamos técnicas como PERT en las que se modelan los mismos utilizando grafos y optimizando los tiempos para concretar los mismos.

La teoría de grafos también ha servido de inspiración para las ciencias sociales, en especial para desarrollar un concepto no metafórico de red social que sustituye los nodos por los actores sociales y verifica la posición, centralidad e importancia de cada actor dentro de la red. Esta medida permite cuantificar y abstraer relaciones complejas, de manera que la estructura social puede representarse gráficamente. Por ejemplo, una red social puede representar la estructura de poder dentro de una sociedad al identificar los vínculos (aristas), su dirección e intensidad y da idea de la manera en que el poder se transmite y a quiénes.

1.1.3. Algoritmo Voraz

Un algoritmo voraz (también conocido como ávido o devorador) es aquel que, para resolver un determinado problema, sigue una metaheurística consistente en elegir la opción óptima en cada paso local con la esperanza de llegar a una solución general óptima. Normalmente se aplica a los problemas de optimización, como por ejemplo, encontrar la secuencia óptima para procesar un conjunto de tareas por un computador, hallar el camino mínimo de un grafo, etc.

1.1.3.1. Esquema

Dado un conjunto finito de entradas C , un algoritmo voraz devuelve un conjunto S (seleccionados) tal que $S \subseteq C$ y que además cumple con las

restricciones del problema inicial. Cada conjunto C que satisfaga las restricciones se le suele denominar prometedor, y si éste además logra que la función objetivo se minimice o maximice (según corresponda) diremos que C es una solución óptima.

1.1.3.2. Elementos a Considerar

- 1 Un conjunto o lista de candidatos (tareas a procesar, vértices del grafo, etc.).
- 2 Un conjunto de decisiones ya tomadas (candidatos ya escogidos).
- 3 Una función que determina si un conjunto de candidatos es una solución al problema (aunque no tiene por qué ser la óptima).
- 4 Una función que determina si un conjunto es completable, es decir, si añadiendo a este conjunto nuevos candidatos es posible alcanzar una solución al problema, suponiendo que esta exista.
- 5 Una función de selección que escoge el candidato aún no seleccionado que es más prometedor.
- 6 Una función objetivo que da el valor/coste de una solución (tiempo total del proceso, la longitud del camino, etc.) y que es la que se pretende maximizar o minimizar.

Para resolver el problema de optimización hay que encontrar un conjunto de candidatos que optimiza la función objetivo. Los algoritmos voraces proceden por pasos. Inicialmente el conjunto de candidatos es vacío. A continuación, en cada paso, se intenta añadir al conjunto el mejor candidato de los aún no escogidos, utilizando la función de selección. Si el conjunto resultante no es completable, se rechaza el candidato y no se le vuelve a considerar en el futuro. En caso contrario, se incorpora al conjunto de candidatos escogidos y permanece siempre en él. Tras cada incorporación se comprueba si el conjunto resultante es una solución del problema. Un algoritmo voraz es correcto si la solución así encontrada es

siempre óptima. El esquema genérico del algoritmo voraz es:

funcion voraz(*C:conjunto*):*conjunto*

{ *C* es el conjunto de todos los candidatos }
S \leftarrow *vacio* { *S* es el conjunto en el que se construye la solución }
mientras \neg *solucion*(*S*) y *C* \neq *vacio* **hacer**

x \leftarrow el elemento de *C* que maximiza *seleccionar*(*x*)
C \leftarrow *C* \ {*x*}
si *completable*(*S* U {*x*}) **entonces** *S* \leftarrow *S* U {*x*}

si *solucion*(*S*)

entonces devolver *S*
si no devolver *no hay solución*

El nombre voraz proviene de que, en cada paso, el algoritmo escoge el mejor "elemento", conocido como **elemento más prometedor** que es capaz de "absorber", eliminándolo del conjunto de candidatos ya sea que se seleccione como parte de la solución o que se le descarte. Nunca deshace una decisión ya tomada, una vez incorporado un candidato a la solución permanece ahí hasta el final; y cada vez que un candidato es rechazado, lo es para siempre.

1.1.3.3. Ejemplo de Aplicación

Se desea pagar una cantidad de dinero a un cliente empleando el menor número posible de monedas. Los elementos del esquema anterior se convierten en:

- **Candidato:** conjunto finito de monedas de, por ejemplo, 1, 5, 10 y 25 unidades, con una moneda de cada tipo por lo menos.
- **Solución:** conjunto de monedas cuya suma es la cantidad a

pagar.

- **Completable:** la suma de las monedas escogidas en un momento dado no supera la cantidad a pagar.
- **Función de selección:** la moneda de mayor valor en el conjunto de candidatos aún no considerados.
- **Función objetivo:** número de monedas utilizadas en la solución. Debe ser el mínimo.

1.2. FUNDAMENTACIÓN: REQUERIMIENTOS DE LA AVIACIÓN COMERCIAL

Hoy en día tanto la oferta como la gran demanda de viajes aéreos han promovido el crecimiento de aerolíneas existentes en lo que refiere a su oferta de itinerarios y la creación de otras nuevas. Este mercado en crecimiento se ha vuelto cada vez más competitivo y ello demanda la búsqueda de soluciones que respondan a los requerimientos operativos de las empresas de transporte aéreo de pasajeros.

Las Aerolíneas deben afrontar diversos problemas tales como: el "Planeamiento Comercial", "Gestión de la Tripulación", "Control/Reacomodo de Pasajeros" y "Control de Operaciones" entre otros. Uno de los principales problemas de las Aerolíneas, y que será el que nos ocupe, es la asignación de "Tripulación" a sus itinerarios de vuelos programados, la cual establecerá el personal de vuelo, tanto técnico (tripulación de cabina de mando: pilotos, co-pilotos e ingenieros de vuelo) como de asistencia (tripulación de cabina de pasajeros: supervisores, y auxiliares de vuelo) asignado a cada avión que cubre una determinada ruta de vuelo. Encontrar una solución óptima al problema de asignación de tripulación es de vital importancia para las aerolíneas.

Se describen a continuación los problemas operativos más importantes que ocupan a las Aerolíneas.

1.2.1. Planificación de Vuelos y Asignación de Flota

La planificación de Vuelos es una etapa crítica en el proceso de planeamiento de las aerolíneas, cuando un programa de vuelo es determinado, una proporción principal de gastos e ingresos son fijados.

Todas las etapas de planificación subsecuentes tienen que optimizar el empleo de recursos en el espacio restringido según lo programado. Por lo tanto, la optimización del programa de vuelos es muy importante para una aerolínea.

En la mayor parte de líneas aéreas, el programa de vuelos es bosquejado varios meses antes de que sea puesto en ejecución, cuando el primer bosquejo sale, es estudiado por varios departamentos implicados con el trabajo de asignación de flota, planificación de tripulación, mantenimiento de aviones, y otros procesos de asignación de recursos.

Después de que la viabilidad y economía del bosquejo son evaluadas y los cambios recomendados, es enviado atrás al departamento de planificación de vuelos para revisión. Normalmente, un programa de vuelos pasa por un procedimiento iterativo de esta clase muchas veces antes de alcanzar su final, la forma "listo-para-ejecutar".

Los factores que deben ser considerados para delinear de manera eficiente y eficaz un programa de vuelos incluyen:

1. La función de demanda e ingresos asociados para cada mercado origen-destino durante la hora-del-día y el día-de-la-semana del ciclo

de planificación

2. Características de las rutas tales como distancias, restricciones operacionales, y características de los aviones como capacidad, velocidad, gasto de combustible, tripulación asignada, etc.
3. Otras restricciones operacionales.

Capturar todos los detalles de las operaciones de una aerolínea y producir una solución de mínimo costo para los vuelos programados equivale a una intratable y complicada tarea.

Los modelos de planificación actualmente existentes sólo toman en cuenta algunas funciones simplificadas de demanda de pasajeros, gastos de operación del avión, características de ruta, y otras restricciones en consideración. Además, el programa de vuelos esencialmente proporciona una estructura base en la cual otros procesos de planificación y refinamiento "hacia abajo" están basados.

La mayor parte de planificadores elaboran la frecuencia de servicio sobre cada ruta primero, luego determinan las "horas de salida" en base a la variabilidad de la "hora-del-día" de demanda y conectividad de vuelos.

1.2.2. Planificación de la Tripulación

Para la mayor parte de líneas aéreas, el costo de la tripulación es el segundo más grande componente de coste, por detrás del costo de combustible, por lo general asciende a un 15-20% del total de gastos de operación de las aerolíneas.

El número de vuelos diarios para las líneas aéreas más grandes como "American and United" es del orden de miles ⁽¹⁾.

¹ Tomado de Gang Yu y Jian Yang, "Optimization Applications in the Airline Industry", 1998.

Una pequeña mejora de la planificación de la tripulación puede conducir a ahorros de millones de dólares.

Esto ha conducido al entorno académico y las aerolíneas a dedicar una gran cantidad de esfuerzo en la investigación en esta área.

La mayor parte de aerolíneas comienzan a proyectar sus asignaciones de tripulación para el próximo período de planificación tomando como base el programa de vuelos para el período actual emergente.

Típicamente, un período de planificación es aproximadamente dos semanas o un mes. Cuando se pone al frente pilotos y auxiliares de vuelo a vuelos, las aerolíneas deben alinearse a las limitaciones puestas por administraciones de aviación, convenios gremiales, y sus propias reglas de trabajo.

La cantidad de trabajo máxima que las líneas aéreas pueden asignar a la tripulación en un cierto período, la cantidad mínima de tiempo de descanso que los tripulantes debe tener entre dos vuelos consecutivos, pagos y compensación que las aerolíneas deben hacer a los tripulantes según su tipo de trabajo, etc., están regulados.

Además, cada tripulante tiene una "base origen". Deben volver a la base después de una secuencia de vuelos.

Así el esfuerzo primario de la asignación de tripulación es encontrar una secuencia de segmentos de vuelos conectados para cada tripulante que comiencen y terminen en su base, de modo que cada segmento de vuelo en el período de planificación sea servido exactamente por una tripulación.

Como el itinerario de vuelos se repite cada varios días dentro de un ciclo operacional, el problema muy simplificado de encontrar las secuencias de vuelos durante varios días puede ser solucionado primero, entonces el programa para el período entero puede ser completado repitiendo las secuencias en la parte restante del período.

Las secuencias son llamadas "rotaciones de tripulación". Una rotación válida es la que se amolda a todas las limitaciones y reglas mencionadas

anteriormente.

Cuando asignamos un tripulante a una "rotación de tripulación", hay un coste real para una aerolínea. El componente principal del coste es la paga y el crédito: las horas garantizadas de paga menos las horas realmente voladas. Otros componentes incluyen gastos de hotel, dietas/viáticos, etc. Las aerolíneas tratan de evitar un coste innecesario resultado de una imprudente asignación de tripulación tanto como sea posible.

Consiguientemente la meta secundaria de la asignación de tripulación es encontrar el modo menos caro de asignar tripulación a los vuelos.

La mayoría de las aerolíneas elaboran las "rotaciones de tripulación" primero, luego los empaquetan en cargas de trabajo anónimas, o "bidlines", conteniendo consecutivos aparejamientos que cubren un período de planificación.

Individuales miembros de la tripulación posteriormente se ofrecen sobre ellos. Así, no hay ninguna consideración individual en el período de planificación.

1.2.3. Control de Operaciones Irregulares

Las Aerolíneas operan en un entorno muy complejo. Muchos factores están más allá del control humano.

El factor que más afecta las operaciones de las aerolíneas es el tiempo inclemente.

Situaciones severas meteorológicas empeoran condiciones en aeropuertos, reduciendo las llegadas permitidas y ratios de despegue, en ocasiones forzando aún el cierre del aeropuerto. Para todas las llegadas en cada aeropuerto de cada aerolínea en los Estados Unidos, un *espacio de tiempo* de llegada o "slot de llegada" (ver Glosario) les es asignado por la Air Traffic

Control System Command Center (ATCSCC).

En condiciones normales, los slots de tiempo se corresponden con las llegadas programadas de los vuelos.

Ante el mal tiempo o condiciones anormales, el ATCSCC asigna a las aerolíneas slots con ratios de llegadas reducidas que ocasionan inevitables retrasos y cancelaciones.

Cada slot es un intervalo de tiempo centrado alrededor de un tiempo de llegada controlado dentro del cual la llegada tiene que ser hecha.

Las Aerolíneas tienen la cierta libertad para elaborar sus propias decisiones en lo referente a que vuelos deben ser cancelados y que slot llenará cada vuelo bajo restricciones como que la llegada replanificada no será antes que el tiempo de llegada programado.

Las decisiones de las aerolíneas son retroalimentadas al ATCSCC para aprobación. Una asignación de slot aprobada puede ser puesta en la ejecución, mientras la negación fuerza el proceso entero a ser repetido.

Muy a menudo, una asignación es negada porque una aerolínea toma demasiado tiempo en la elaboración de la decisión de asignación de slot.

Asignaciones de slot diferentes tienen efectos diferentes sobre el número de los pasajeros que tienen que ser transferidos a otros vuelos o compensados debido a la cancelación del vuelo, sobre la cantidad total de tiempo de retraso de pasajeros, sobre los datos de confiabilidad de las aerolíneas, y sobre los factores intangibles como la buena relación con los pasajeros y la reputación de las aerolíneas.

Por lo tanto, los sistemas que con eficacia y de manera eficiente asignan vuelos a slots es sumamente perseguido.

Un Sistema de Asignación de Slot de Llegada (Arrival Slot Allocation System - ASAS) fue puesto en práctica en American Airlines en 1989 [VAM 91].

Consiste en un algoritmo que minimiza la cantidad de retraso, aprovechándose de las cancelaciones de vuelo y un componente informático

que reduce el tiempo de respuesta a ATCSCC por automatización del proceso de envío y recepción de mensajes.

El modelo de asignación de slots está asociado con el problema del vendedor viajero [LAW 82]. Cada segmento de vuelo en consideración es representado como un nodo en una red; un vendedor tiene que visitar cada nodo, entregar un slot en cada visita, y crear un tour a través de la red.

La orden de nodos en el tour del vendedor corresponde a la secuencia de substituciones de slots de llegada disponibles para cada slot vacía. El algoritmo para solucionarlo es un heurístico tour-construido que resguarda el avión y el equilibrio de la tripulación y conexiones de puertas de embarque entre vuelos en aeropuertos centrales.

El ASAS ha ahorrado a American Airlines el coste de siete distribuidores humanos y 5.2 millones de dólares adicionales debido a las cantidades reducidas de tiempo de retraso.

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES - MÉTODOS DE SOLUCIÓN EXISTENTES

2.1. ESQUEMA GENERAL

A nivel general la tarea de programación de la tripulación es asignar todos los vuelos de un periodo de tiempo definido, junto con actividades adicionales a un número limitado de miembros de la tripulación estacionados en una o varias bases origen.

Por otra parte la consideración de que para todas las actividades dadas, el costo operacional ha de ser minimizado y la carga de trabajo equitativamente distribuida entre las bases origen y miembros de la tripulación.

Un tripulante de una aerolínea típicamente recibe un programa mensual o bimensualmente que tiene que realizar, con numerosas reglas de trabajo y regulaciones. Reglas rígidas impuestas por las autoridades de aviación civil, acuerdos gremiales y políticas de la compañía. Reglas menos rígidas que consideran la satisfacción de la tripulación y las preferencias del personal pueden ser aplicadas también.

Por estas razones el problema viene a ser muy difícil de solucionar, y más

complejo cuando el tamaño del problema se incrementa.

A nivel general se plantean 3 métodos de solución al Problema de Programación de la Tripulación (PPT):

- Método Básico – Experto Humano
- Método Clásico – Solución Secuencial
- Método Moderno – Solución Integrada

El método clásico es el más estudiado y deriva en modelos de solución diversos muy optimizados, el método moderno se encuentra aún en estudio.

2.1.1. Método Básico - Experto Humano

Nos referimos aquí a un método que obtiene una solución levemente optimizada, la cual puede obtener un experto planificador humano, en base a su experiencia y consideración de la reglamentación vigente que rige la actividad.

Este método consta de los siguientes pasos:

- 1 Ordenar los Itinerarios de vuelos en orden cronológico, al igual que las reservas requeridas.
- 2 Obtener el vuelo más próximo en salir o la reserva más próxima en ser requerida.
- 3 Si el más próximo en ocurrir es un vuelo.
 - a. Para cada tipo de miembro de la tripulación requerido (piloto, copiloto, etc.)
 - i. Seleccionar a los tripulantes que se encuentran en la Base de salida del vuelo con las siguientes características:

1. Categoría requerida o superior (degrado)
 2. Disponibilidad horaria de vuelo y jornada para cubrir el vuelo
 3. No tener asociada alguna indisponibilidad registrada durante el tiempo de ejecución del vuelo.
 - ii. Ordenar a los candidatos teniendo en cuenta si el vuelo es de su preferencia y su escalafón u otro criterio de preferencia definido por la aerolínea.
 - iii. Asignar al vuelo al tripulante más idóneo según la ordenación realizada.
- 4 Si el más próximo en ocurrir es una reserva.
- a. Seleccionar a los tripulantes que se encuentran en la Base de salida del vuelo con las siguientes características:
 - i. Categoría requerida o superior (degrado)
 - ii. Disponibilidad horaria de vuelo y jornada para cubrir un vuelo en caso se requiera durante la reserva
 - iii. No tener asociada alguna indisponibilidad registrada durante el tiempo de ejecución de la reserva.
 - iv. Ordenar a los candidatos teniendo en cuenta su escalafón u otro criterio de preferencia definido por la aerolínea.
 - v. Asignar a la reserva al tripulante más idóneo según la ordenación realizada.
- 5 Actualizar los datos de horas de vuelo y jornada del tripulante asignado al vuelo o reserva.
- 6 En caso se trate de un vuelo largo que requiera enviar doble tripulación (*"traslado aéreo"*) repetir los pasos anteriores de asignación del vuelo.
- 7 Repetir desde el punto "2." hasta terminar de asignar tripulación a todos los vuelos y reservas del periodo de programación.

Tenemos aquí las estrategias “día-por-día” (vuelo-por-vuelo) o “piloto-por-piloto” (tripulante-por-tripulante).

Esta solución puede ser considerada como un buen punto de partida en la búsqueda de soluciones óptimas del PPT.

2.1.2. Método Clásico - Solución Secuencial

Nos referimos aquí al método más ampliamente investigado, cuyos modelos de solución derivados son diversos y muy depurados.

El PPT (también conocido como CSP⁽¹⁾) es reconocido por ser muy difícil de resolver (problema NP-Duro) debido a su complejidad combinatorial (ver, p.ej., Suhl 1995; Barnhart et al. 2003), por ello el Método Clásico plantea en esencia dividir el problema (Barnhart et al., 1999b) en dos problemas secuenciales PRT y PAT (ver “Glosario”):

- PRT (Problema de Rotación de la Tripulación). También conocido como CPP (Crew Pairing Problem). Generación de “**Rotaciones**” (Pairings) o piezas-de-trabajo de la tripulación (aparejamiento de vuelos) que empiezan y terminan en la base. Se generan aquí un conjunto de “rotaciones de tripulación” anónimos, para todas las rutas de vuelo, tal que cada vuelo es cubierto por tal conjunto de rotaciones de manera que la demanda de mano de obra fundamental es satisfecha. El conjunto de rotaciones resultante es optimizado en términos de alcanzar el mínimo costo. Las secuencias de rutas de

¹ El PPT es comúnmente conocido por sus siglas en inglés CSP (Crew Scheduling Problem) y se ocupa de la asignación de tripulación a vuelos programados, considerando las actividades preestablecidas del personal de vuelo como son: simuladores, entrenamientos y vacaciones entre otros. Se considera por lo tanto un Problema de Asignación de Tripulación, pues la programación de tripulación es un proceso más completo, que abarca la planificación de todas las actividades del personal (servicios de vuelo y actividades preestablecidas).

vuelo anónimas las cuales inician y terminan en la Base Origen, están sujetas a multitud de regulaciones propias de la aviación comercial. Estas “secuencias de servicios de vuelo” podrían ser realizadas por un miembro individual de la tripulación.

- PAT (Problema de Asignación de Tripulación). También conocido como CAP (Crew Assignment Problem) o CRP (Crew Rostering Problem). Construye programas de trabajo de la tripulación o “**líneas-de-trabajo**” (rosters) encadenando las rotaciones (aparejamientos de vuelo) previamente generadas en “líneas-de-trabajo legales” (programa de trabajo) para un periodo de planeamiento definido, asigna los mismos a miembros individuales de la tripulación considerando sus actividades pre-programadas (p.ej.: entrenamientos y vacaciones) y minimizando el costo operacional. Se realiza aquí la asignación de las líneas-de-trabajo a los miembros individuales de la tripulación, teniendo en cuenta su rango y preferencias individuales, así como su disponibilidad.

Este método consta de 2 pasos principales con sus propios datos de entrada según lo siguiente:

- 1 Generar Rotaciones o piezas-de-trabajo anónimas a partir de los vuelos del periodo de programación y reservas requeridas, de acuerdo a lo siguiente:
 - a. Los aparejamientos de vuelos deben cubrir todas las rutas de vuelo, tal que c/vuelo es cubierto por tal conjunto de aparejamientos.
 - b. Deben iniciar y terminar en la base,
 - c. Las rotaciones generadas deben cumplir las restricciones de jornadas de trabajo, horas de vuelo y requisitos de descanso según la Normativa vigente.

- d. Deben ser optimizados en términos de alcanzar el mínimo costo.
- 2 Generar y asignar líneas-de-trabajo a los miembros de la tripulación a partir de las Rotaciones generadas en el Paso anterior, teniendo en cuenta lo siguiente:
- a. Generar líneas-de-trabajo legales para cada miembro de la tripulación encadenando rotaciones con actividades pre-programadas, teniendo en cuenta la disponibilidad del personal durante el periodo de programación (vacaciones, permisos solicitados, asistencia a entrenamientos, etc.).
 - b. La asignación de líneas-de-trabajo se realiza teniendo en cuenta el rango y preferencias de los miembros de la tripulación.
 - c. Debe minimizarse el costo operacional.

La Generación de “Rotaciones” (PRT) puede ser formulada como un problema de particionamiento de conjuntos, pues tiene como finalidad encontrar un conjunto de líneas-de-trabajo que cubran todas las rutas de vuelo en el periodo de planeamiento considerado y con el mínimo costo. Se particiona el problema original en “líneas-de-trabajo”.

La Asignación de Tripulación (PAT) puede ser formulada como un problema de cobertura de conjuntos, donde se busca que todas las “Rotaciones” sean al menos cubiertas por la cantidad de miembros de la tripulación que requieren (dependiente de los servicios de vuelo que conforman la línea-de-trabajo).

Las aproximaciones más conocidas para el PAT / PRT son las siguientes:

- Sistemas de Oferta de Línea-de-Trabajo (Bidline Systems). La asignación de rotaciones se realiza considerando el escalafón / rango de los miembros de la tripulación, los cuales pueden licitar su

programa de vuelos en base a su escalafón. Utilizado en EE.UU⁽¹⁾.

- Rol Personalizado (Personalized Rostering). La asignación se basa en una distribución de la carga trabajo justa-e-igual entre todos los miembros de la tripulación, sin considerar el escalafón. Utilizado en Europa.
- Licitación Preferencial (Preferential Bidding). Las preferencias individuales de los miembros de la tripulación son consideradas durante la asignación, aplicando el escalafón en caso de conflictos. Básicamente es una concesión entre Oferta de Línea-de-Trabajo y Rol Personalizado.
- Asignación de Rotaciones Orientada al Equipo (Team-oriented Rostering / ToRP). Mejora del Rol Personalizado. Pone énfasis en la estabilidad de la tripulación (equipo) -minimizando los cambios de equipo-, la cual sería altamente apreciada por la tripulación y por la aerolínea.

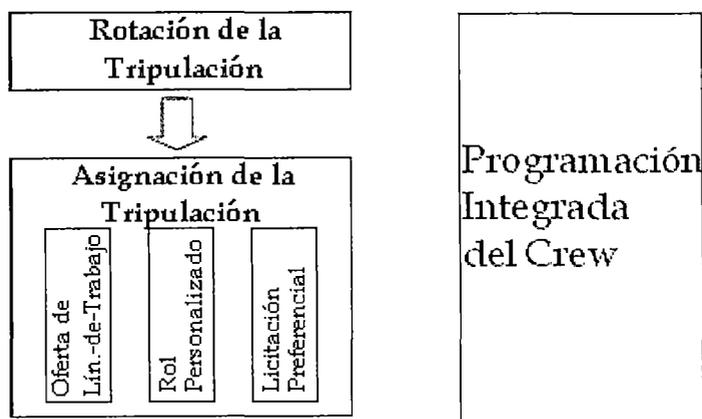


Figura 2-1. Aproximaciones a la Programación de Tripulación en Aerolíneas (PPT)

¹ La aproximación tradicional de programación de tripulación en Norte América está basada en líneas-de-trabajo ofertadas (bidlines). Tomado de YuFeng Guo "Decision Support Systems for Airline Crew Recovery", 2005, pág. 6.

Usualmente el PPT es descompuesto en varios sub-problemas y aún en sub-pasos, como un ejemplo, para la tripulación de cabina de mando, este resulta en un PPT dedicado para la posición de capitán y uno para la de primer oficial. Cada una de estas instancias de programación de la tripulación es sub-dividida otra vez en el PRT y PAT.

2.1.2.1. Problema de Rotación de la Tripulación (PRT)

Básicamente el PRT en aerolíneas es la tarea de generar un conjunto de rotaciones (pairings) los cuales cumplan todas las reglas y regulaciones. El conjunto de rotaciones debería incluir todos o los necesarios aparejamiento de vuelo que pueden ser incluidos en la solución final. Luego una completa cobertura de todas las rutas de vuelo examinadas será proyectada después de la selección de rotaciones. Lo fundamental es que el coste de rotaciones totales sea minimizado.

El PRT es generalmente formulado como un Problema de Particionamiento del Conjunto (Set Partitioning Problem / SPP) o un Problema de Cobertura del Conjunto (Set Covering Problem / SCP). El problema por consecuencia es encontrar un conjunto de rotaciones con costo mínimo, en los que cada ruta de vuelo es cubierta por exactamente una rotación elegida (para la formulación del Problema de Particionamiento del Conjunto, y siendo incluido por más de una rotación según indica la aplicación del Problema de Cobertura del Conjunto).

Las Rotaciones son generados para miembros de la tripulación anónimamente (Barnhart et al. 1999a). Una rotación es considerada como legal mientras cumpla algunas de las reglas introducidas en la Sección "3.3.2. Restricciones y Consideraciones". A causa de la generación anónima de asignaciones, las reglas que específicamente consideran a miembros individuales de la tripulación no serán aplicadas

durante la fase de generación de rotaciones. Las siguientes son una lista de reglas que generalmente son evaluadas para la generación de rotaciones (aparejamientos de vuelos que inician y terminan en la Base) legales:

- máximo de horas de vuelo diarias/semanales
- máximo de horas de servicio vuelo
- mínimo intervalo de reserva
- máximo número de aterrizajes diarios
- periodo de descanso entre vuelos.

Cuando una rotación es creada, estas reglas deben ser aplicadas. Al hacer esto las rotaciones legales son seleccionadas y coleccionadas. Por lo tanto la tarea resulta ser como generar tal conjunto de rotaciones legales. Notablemente, la anterior formulación Problema de Particionamiento/Cobertura del Conjunto requiere el conjunto completo de todas las posibles rotaciones que han de ser explícitamente enumeradas (Vance et al., 1997). Enumerar rotaciones puede ser una tarea extremadamente compleja debido al gran número de rotaciones potenciales y número de reglas que han de ser verificadas para cada posible rotación. Por ejemplo, un problema doméstico en USA, en una red Centralizada con varios cientos de vuelos, típicamente tiene billones (sistema americano: mil millones, sistema inglés: un millón de millones) de rotaciones (Barnhart et al. 1999a), sin hablar de casos con alrededor de dos mil vuelos.

2.1.2.2. Problema de Asignación de Tripulación (PAT)

El PAT en aerolíneas se centra en la asignación de rotaciones o líneas de trabajo a miembros individuales de la tripulación y toma en cuenta la necesidad de proveer suficientes periodos de descanso entre vuelos y

satisfaga exigencias regulativas y acuerdos de negociación colectiva (Barnhart et al. 1994). Tiene lugar aquí la interconexión de rotaciones con actividades pre-programadas, tales como entrenamientos, vacaciones, periodos requeridos de reserva, periodos de descanso, etc.

En otras palabras es el proceso de la "personalización" de programas / itinerarios para cada miembro individual de la tripulación, teniendo en cuenta su disponibilidad y actividades previstas, la meta es que los programas resultantes requieran el mínimo costo, y todos los vuelos y otras actividades estén correctamente servidas. El resultado de la asignación expresa el trabajo completo que un miembro de tripulación emprende para el siguiente mes o medio mes.

La asignación es el paso subsiguiente al PRT en aerolíneas previamente presentado en la sección anterior. Como las rotaciones generadas dentro del PRT son usados para el PAT, los dos conceptos son independientes. Como se describe previamente, debido a la complejidad del total PAT en aerolíneas es dividido en dos pasos. Como consecuencia el segundo paso, el PAT en aerolíneas, trabaja más bien a nivel de rotaciones que de rutas de vuelos, lo cual reduce la dificultad del problema considerablemente.

Características del PAT

A pesar del hecho que la tarea del PAT indicada anteriormente es la misma para la mayor parte de aerolíneas de todo el mundo, hay varios modos de hacerle frente. Varios factores como el sistema de pagos, reglas de trabajo, calidad de vida, etc., conducen las diferentes aproximaciones de la asignación (ver Fig. 2-1). En Norteamérica las tripulaciones de vuelo son capaces de licitar su programa de vuelo, o

línea-de-trabajo anónima, para el próximo mes basados en su escalafón. Una aproximación construye líneas-de-trabajo anónimas de costo mínimo y luego se permite a miembros individuales de la tripulación expresar sus preferencias a través de un proceso de licitación basados en su escalafón (Campbell et al., 1997; Christou et al., 1999).

No obstante, el principio de escalafón no aplica en aerolíneas Europeas (ver Kohl and Karish, 2004). La aproximación "Rol Personalizado", o aproximación a la asignación, generalmente construye líneas de trabajo personalizadas para cada miembro individual de la tripulación teniendo en cuenta su contrato de trabajo, actividades y requerimientos pre-programados. Otra preocupación principal es aún la distribución uniforme de carga de trabajo entre todos los miembros de la tripulación evaluados, la imparcialidad para todos los miembros de la tripulación lleva prioridad.

A parte de las reglas que son principalmente consideradas en los pasos previos de generación de rotaciones (ver sección "2.1.1. Problema de Rotación de la Tripulación (PRT)"), las siguientes reglas son las más importantes presentadas en la mayoría de las aproximaciones existentes del PAT.

- máximo de horas de vuelo mensuales / anuales
- máximo tiempo fuera de la base origen de la tripulación
- mínimo de horas de vuelo mensuales
- mínimo descanso semanal / anual

Recientemente, "Licitación Preferencial" viene siendo más y más la aproximación seleccionada. Generalmente hablando representa un concesión entre las aproximaciones de "Oferta de Línea-de-Trabajo" y "Rol Personalizado" en que genera programas personalizados simultáneamente toma en cuenta un conjunto de pedidos que han sido

pesados para reflejar las preferencias de los empleados. Ellos generan un conjunto de pedidos que reflejan preferencias individuales de cada miembro de la tripulación. La asignación es llevada a cabo bajo estrictas restricciones del escalafón. La construcción de programas de una puntuación máxima para un particular miembro de la tripulación nunca debe ser hecha a cuenta de un empleado de mayor categoría (escalafón). Para cada empleado desde el más senior al más junior, un modelo entero es resuelto para determinar el programa de máxima puntuación del miembro de la tripulación mientras toma en cuenta todas las restantes tripulaciones hasta que el problema entero es resuelto. La solución de tal modelo entero es generada por un procedimiento de generación de columnas embebido en un árbol branch-and-bound.

La causa de éstas diferentes "filosofías" de asignación radica en la diferencia natural de contratos de trabajo en las diferentes partes del mundo (Doerner et al., 2003). Tomando las aerolíneas de Norteamérica como un ejemplo, programas de trabajo que involucran alta carga de trabajo resultan en un alto pago y viceversa. En resumen, los tripulantes son altamente pagados si ellos vuelan más. Por contraste los tripulantes aéreos en Europa trabajan bajo sus contratos de trabajo que garantizan un pago fijo por una cierta cantidad mínima de horas de vuelo (así llamadas "horas bloque"), no importa si un miembro de la tripulación realmente realiza las horas de vuelo determinadas o no. Esto hace que las aerolíneas en Europa se concentren en producir programas de la tripulación cuya carga de trabajo sea más alta que el límite más bajo garantizado, escrito en los contratos de la tripulación. Al mismo tiempo el costo operacional es minimizado.

2.1.3. Método Moderno - Solución Integrada

Nos referimos aquí a un método aún en investigación, cuyos modelos de solución existentes son limitados y sólo parcialmente integrados.

Los pasos de éste método son motivo del presente trabajo y sus pasos a nivel detallado serán planteados más adelante, no obstante en líneas generales consta de 1 paso principal según lo siguiente:

- 1 Generación de líneas-de-trabajo (secuencia de servicios de vuelo legales) a miembros individuales de la tripulación de acuerdo a lo siguiente:
 - a. Generar las rotaciones (secuencia de servicios de vuelo que inician y terminan en la base) de vuelo teniendo en cuenta la disponibilidad de los miembros de la tripulación.
 - b. Generar las líneas de trabajo a partir de las rotaciones de vuelo para los miembros de la tripulación, teniendo en cuenta:
 - i. Las restricciones de límites de horas de vuelo y jornadas.
 - ii. La asignación se realiza teniendo en cuenta el rango, preferencia y disponibilidad de los miembros de la tripulación.
 - iii. Las líneas-de-trabajo deberán ser optimizadas en términos de alcanzar el mínimo costo.

La solución clásica se basa en dividir el PPT en 2 pasos secuenciales, el PRT y PAT, y manejarlos por separado, tanto por la complejidad combinatorial así como también por los objetivos distintos de cada paso. Sin embargo esta estrategia secuencial tiene sus puntos débiles, especialmente en el caso de que las rotaciones generadas en el PRT son “inconvenientes” / “imposibles” de ser asignados posteriormente en el PAT debido a que en el

momento de generar las “rotaciones” no se conoce la disponibilidad del personal.

La solución clásica puede incurrir en costos adicionales para la reconstrucción de “rotaciones” y “reasignación”.

El método de solución integrada surge a partir del 2001⁽¹⁾, debido al rápido crecimiento del poder computacional de los ordenadores en los últimos años, así como también debido a las carencias identificadas en la solución clásica / secuencial.

Inicialmente los periodos de programación son cortos (entre 1 día y 1 semana), a partir de 2003 las soluciones planteadas ya abarcan periodos completos de programación (2 semanas a 1 mes).

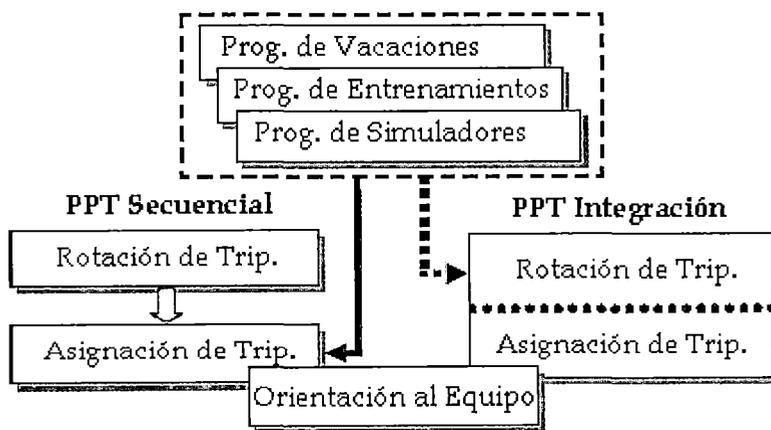


Figura 2-2. PPT Secuencial e Integrado

¹ En 2001 Freling R y Lentink en su obra “A Decision Support System for Crew Planning in Passenger Transportation using a Flexible Branch-and-Price Algorithm”, presentan una aproximación en la cual solucionan el PPT diario primero y hasta una semana de planeamiento posteriormente. Kerati S. en 2002 y Guo Y. en 2003, proponen un AG para manejar el PPT durante la fase operacional con periodos de planeamiento considerablemente cortos.

Como se puede apreciar en la figura anterior en el esquema integrado el PRT y PAT tienen lugar simultáneamente. Una primera aproximación a la solución moderna / integrada, es considerar las actividades pre-asignadas del personal.

La solución moderna / integrada es el reto actual de la investigación asociada al PPT (CSP), debido a la mejora sustancial que conlleva respecto de la solución clásica. Actualmente se habla aún de esquemas “parcialmente integrados”.

2.2. MODELOS DE SOLUCIÓN - ESQUEMA CLÁSICO

Básicamente, la aproximación más simple para solucionar un problema combinatorial es una enumeración y evaluación completa de todas las soluciones posibles seguidas por la selección de la mejor alternativa. Aunque tal proceder es posible en teoría, no aplica a problemas de tamaño real por la explosión combinatorial.

Se describen a continuación las aproximaciones a la solución del PPT más comúnmente conocidas, aplicadas a solucionar alguno de los dos problemas secuenciales antes mencionados, el PRT y el PAT (problemas independientes), o ambos inclusive.

2.2.1. Heurística Constructiva

A pesar de la característica de que el estado óptimo es raramente obtenido, algoritmos simples pero de rápida heurística son importantes para obtener una solución factible rápidamente.

Frecuentemente ellos pueden proveer un buen punto de partida para esfuerzos computacionales más complejos, o sus resultados son suficientes para la tarea a ser resuelta (ver Ernst et al. 2004a).

Heurística Constructiva primero descompone el problema en numerosos pequeños sub-problemas, y entonces construyen una solución basada en ciertas estrategias dadas.

Por ejemplo, en el caso del Problema de Asignación de Líneas-de-Trabajo de la Tripulación, una aproximación heurística tal como el método del día-por-día puede ser aplicado para construir el programa secuencialmente desde el primer al último día (ver p.ej. Nicoletti 1975, Glanert 1984), o el método piloto-por-piloto considerando el escalafón de los miembros de la tripulación cuando se crean sus líneas-de-trabajo (ver p.ej. Moore et al. 1978, Byrne 1988).

En Glanert (1984) el Problema de Asignación de Líneas-de-Trabajo de la Tripulación es solucionado asignando tareas de prioridad alta a miembros de la tripulación con alto rango (también llamado escalafón) ⁽¹⁾.

Más recientemente, heurísticas constructivas son aplicadas en Strauss 2001 dentro de su aplicación, llamada SWIFTROSTER, y en Kharrrazilha et al. 2003, Kohl and Karish 2004 para la asignación de líneas-de-trabajo en Carmen Systems (Carmen 2005).

En Guo et al. 2003 varias estrategias de asignación basadas en multi-pesos similares a los conceptos día-por-día y piloto-por-piloto fueron implementadas a medida para necesidades especiales del Problema de Asignación de Líneas-de-Trabajo de la Tripulación en una aproximación de

¹ Referirse a Teodorovic y Lucic 1998 "Una Aproximación a la Teoría Difusa de Conjuntos", para una introducción de tales aproximaciones.

PPT parcialmente integrado (ver sección "2.3. Esquemas Parcialmente Integrados").

2.2.2. Programación Matemática

Ambos el PRT y el Problema de Asignación de Líneas-de-Trabajo de la Tripulación son generalmente formulados como un Problema de Particionamiento o Cobertura de conjuntos. En un Problema de Particionamiento del Conjunto cada actividad a ser programada es asignada exactamente una vez, mientras que la sobre-cobertura es permitida en un Problema de Cobertura del Conjunto (denotada como "*traslado aéreo*", ver Glosario").

Los modelos más comunes pueden ser catalogados como "programación entera (PE)", "programación entera binaria (PEB, o 0/1-PE)", "programación entera-mixta (PEM)", y "programación lineal (PL)".

Aquí la principal diferencia radica en el área factible del espacio solución considerando su clasificación, y métodos de solución dedicados consecuentemente disponibles. Estos modelos son entonces resueltos por los optimizadores, tales como ILOG CPLEX (ILOG 2005) y MOPS (Suhl 1994, 2005).

Los casos reales a menudo tienen que hacer frente a un elevado número de variables, p.ej. 800 vuelos pueden fácilmente resultar en billones de posibles rotaciones (ver Vance et al. 1997a, Hoffmann and Padberg 1993), donde cada uno de ellos es representado por una columna en el modelo (de forma similar para las líneas-de-trabajo en el Problema de Asignación de Líneas-de-Trabajo de la Tripulación). Por otra parte, la representación de datos y las (algunas veces enormes conjuntos de) restricciones verticales y artificiales (ver sección "3.3.2. Restricciones y Consideraciones") son dadas como filas

adicionales.

Como una aproximación común a la solución, las restricciones son relajadas. Los problemas relajados resultantes son fáciles de resolver, pero ello requiere pasos adicionales en orden a obtener una solución factible al problema original, p.ej., un Problema de Particionamiento del Conjunto puede ser relajado a un Problema de Cobertura del Conjunto, que se hace necesario para resolver la sobre-cobertura de actividades posteriores.

Para modelos PE, la relajación a PL resuelve la restricción entera en las variables de decisión, y la relajación de Lagrange facilita la carga computacional removiendo algunas restricciones e incorporándolas como funciones de penalización en la formulación de la función objetivo.

Por último, límites mejores son determinados actualizando iterativamente los coeficientes de penalidad de la función objetivo. Para una introducción referirse a, p.ej. Barnhart et al. 2003, Wolsey 1998.

Aproximaciones a la solución comúnmente conocidas para enormes programas matemáticos son "branch-and-bound", "column generation", "branch-and-cut" y "branch-and-price", como se presentan brevemente a continuación, con algunas aplicaciones seleccionadas en la literatura.

Branch-and-Bound

Sigue la idea de divide y conquistarás, Esquemas personalizados son usualmente aplicados para solucionar relajaciones PL. Luego, para una variable fraccional, en una dada solución PL óptima, dos sub-problemas son generados (branching), y límites menores para problemas de minimización (como en nuestro caso) son creados, los cuales determinan en que rama

continuar de acuerdo a la estrategia definida.

Es empleado, p.ej., para un Problema de Asignación de Líneas-de-Trabajo de la Tripulación masivo generalizado, y para la programación de servicios en operaciones de transporte cortas (Ryan 1992; Day and Ryan 1997). También se ha aplicado un modelo de Problema de Particionamiento del Conjunto generalizado, usando PL y branch-and-bound para solucionar una aplicación en Air New Zealand (Butchers et al. 2001).

Generación de Columnas

Una técnica computacional más comúnmente usada para solucionar programas enteros de gran escala (o programación lineal). En GC, un restringido problema PL maestro, una reformulación relajada basada en la descomposición de Dantzig-Wolfe (ver Dantzig and Wolf 1960), es solucionado en un sub-conjunto de columnas (líneas-de-trabajo), y variables duales son calculadas para valorar quitar nuevas columnas.

El Sub-problema (a menudo un problema del camino más corto restringido) verifica si existe alguna nueva columna con costo reducido negativo. Si es así, ellas son añadidas al actual problema PL maestro y optimizadas nuevamente, en caso contrario la actual solución del PL es ya óptima.

La aproximación GC es evaluada en detalle para una aplicación en Air France (Lavoie et al. 1988; Gamache et al. 1999). Rotaciones de tripulación óptimas son generadas por un algoritmo basado en GC para una aerolínea de Taiwán (Yan et al. 2002).

Branch-and-Cut

Generalmente aplicado a esquemas branch-and-bound personalizados en conjunción con planos cortantes. En consideración al convexo caso de soluciones factibles, clases de desigualdades (restricciones) permanecen excluidas en la relajación PL, en orden a reducir el tamaño del problema. Si una relajación PL no obedece a todas las restricciones, una separación del problema prueba a identificar desigualdades inválidas las cuales pueden ser añadidas (separándolas del espacio de soluciones) al problema original para su próxima ejecución de optimización. Si no hay restricciones adicionales violadas, branching ocurre en valores fraccionales de la solución para la relajación PL (ver Barnhart et al. 1998).

Se encuentra una solución entera óptima para problemas con un máximo de 300,000 rotaciones (pairings) usando un algoritmo branch-and-cut (Hoffmann and Padberg 1993), mientras las restricciones base son explícitamente consideradas. Es basado en un método heurístico para obtener buenas soluciones factibles enteras rápidamente, mientras un procedimiento de generación de cortes tensa la relajación lineal.

Branch-and-Price

Mientras que branch-and-cut trabaja en una relajación PL con pocas filas (restricciones), branch-and-price sigue una estrategia similar considerando columnas (variables). Aquí, un sub-problema, el problema del pricing, es resuelto para identificar columnas adicionales para la próxima ejecución de optimización de la relajación PL. Branching es indicado de acuerdo al branch-and-cut, cuando no son encontradas columnas adicionales, o la solución PL no satisface integralmente las condiciones. Branch-and-price permite a GC ser aplicado en todas partes en el árbol branch-and-bound

(Barnhart et al. 1998).

Una aproximación branch-and-price heurística es aplicada para el PRT, la cual resuelve GC aproximadamente junto con una selección de nodo del árbol branch-and-bound (Vance et al. 1997b). Un ensayo (Freling et al. 2001) reporta de un sistema de soporte de decisiones para planeamiento de la tripulación el cual está construido sobre un algoritmo branch-and-price flexible.

Problema de Rotación de la Tripulación – Modelo de Barnhart

Un comúnmente estudiado modelo de Problema de Particionamiento del Conjunto es propuesto por Barnhart et al. (1999a). Es expresado como sigue:

$$\min \sum_{p \in P} c_p y_p \quad (3.1)$$

$$s.t. \sum_{p \in P} y_p = 1 \quad (3.2)$$

$$y_p \in \{0, 1\} \quad p \in P$$

donde P (con índice p) es el conjunto de todas las posibles rotaciones (pairings) construidas basadas en el conjunto de rutas de vuelo F . La variable de decisión y_p es igual a 1 si la rotación p es incluida en la solución, y 0 en caso contrario. Como se muestra en 3.1, el objetivo es básicamente la minimización del costo del conjunto de rotaciones seleccionado, mientras la ecuación 3.2 garantiza que cada ruta de vuelo es cubierta exactamente una vez.

En el caso que la formulación del Problema de Cobertura del Conjunto sea

aplicada, la ecuación 3.2 anterior, consecuentemente, es cambiada a:

$$\sum_{p \in P} y_p \geq 1 \quad (3.3)$$

La restricción permite la posibilidad que más que una rotación finalmente seleccionado incluya una sola ruta de vuelo. Para este particular problema, esta modificación puede ser entendida como que miembros de la tripulación pueden ser *trasladados por vía aérea*. El *traslado aéreo* es permitido en algunas aerolíneas, pero el número de *traslados* es normalmente considerado a ser minimizado.

Para el caso que múltiples bases origen existan, una adicional restricción es generalmente añadida.

$$l_{HB} \leq \sum_{p \in P_{HB}} y_p \leq u_{HB} \quad (3.4)$$

Sean l_{HB} y u_{HB} el límite inferior y superior de número de miembros de la tripulación disponibles en la base origen HB , respectivamente. P_{HB} es el conjunto de rotaciones que tienen su inicio de primer vuelo y fin de último vuelo en la base origen HB . Notablemente u_{HB} es mucho mayor que el actual número de miembros de la tripulación estacionados en la base origen HB debido a la característica que un miembro de la tripulación puede prestar servicio a varias rotaciones dentro del periodo de planeamiento evaluado.

Las Rotaciones son generadas para miembros de la tripulación anónimamente (Barnhart et al. 1999a).

Problema de Asignación de la Tripulación - Modelo de Barnhart, Gamache y Soumis

En esta sección, se muestra un modelo matemático básico propuesto por Barnhart et al. (1999a) y Gamache y Soumis (1998), que trata las tareas de asignación en aerolíneas Europeas: el problema del "Rol Personalizado".

Sea P el conjunto resultante de rotaciones del proceso de generación. Dados un conjunto de miembros de la tripulación W , y un conjunto de actividades A que representan todas las actividades pre-programadas. El conjunto R representa todos las posibles líneas-de-trabajo (rosters) que puedan ser asignadas a cada miembro específico de la tripulación. La tarea en consecuencia, es encontrar un sub-conjunto \bar{R} que representa la partición que cubre todos los p que pertenecen a P y a que pertenecen a A . Lo fundamental es que el costo total de asignación sea mínimo.

En consecuencia, el modelo es construido como:

$$\min \sum_{w \in W} \sum_{r \in R^w} c_r^w x_r^w \quad (3.5)$$

$$s.t. \sum_{w \in W} \sum_{r \in R^w} \gamma_p^r x_r^w \geq n_p \quad \forall p \in P \quad (3.6)$$

$$\sum_{r \in R^w} x_r^w = 1 \quad \forall w \in W \quad (3.7)$$

$$x_r^w \in \{0, 1\} \quad \forall r \in R^w, \forall w \in W$$

donde R^w denota el conjunto de líneas-de-trabajo posibles del miembro de la tripulación $w \in W$, y n_p representa el número mínimo de miembros de la tripulación requerido por la rotación p .

El valor binario γ_p^r es 1 si la rotación p pertenece a la línea-de-trabajo r y 0 en

caso contrario. La variable de decisión x_r^w igual 1 si la línea-de-trabajo r es asignada al miembro de la tripulación w y 0 en caso contrario. c_r^w expresa el costo de asignar una línea-de-trabajo r al miembro de la tripulación w (el cálculo del costo puede diferir de aerolínea en aerolínea). Como se puede observar el objetivo de la función 3.5 es minimizar la suma de todos los costos para cada línea-de-trabajo examinada. La restricción 3.6 garantiza que cada rotación es servida por el número requerido n_p de miembros de la tripulación, mientras 3.7 asegura que cada miembro de la tripulación w recibe exactamente una línea-de-trabajo para el periodo de planeamiento dado.

Generalmente, el costo c_r^w puede ser la combinación del costo operacional real y otro costo artificial, tal como el coste monetario transformado de la calidad-de-vida de la tripulación. Comparado con el PRT en aerolíneas, el costo en el PAT, en consecuencia, puede ser difícil de calcular debido a aspectos que no están bien definidos. Adicionalmente, el costo real discutido aquí no es el mismo que el observado en Norteamérica por la aplicación del principio del rol personalizado en aerolíneas Europeas. En Europa el costo real normalmente se refiere al pago monetario por el transito y estadía en hotel en lugar del salario de la tripulación.

El PAT en aerolíneas es normalmente descompuesto por funciones de la tripulación. Este es particularmente el caso cuando un problema de asignación de líneas-de-trabajo para cabina del piloto es evaluado. En concordancia el problema puede ser dividido en dos sub-problemas, para capitán y primer oficial respectivamente (p.ej.: para un problema de pequeña-tirada de programación de la tripulación de cabina de mando). En tal caso la fórmula 3.6 será escrita como:

$$\sum_{w \in W} \sum_{r \in R^w} \gamma_p^r x_r^w = 1 \quad \forall p \in P \quad (3.8)$$

La ventaja de esta descomposición es obvia porque la complejidad del problema es reducida significativamente. En consecuencia la posibilidad de encontrar una solución mejor o aún óptima es considerablemente elevada. Por otra parte esta descomposición puede tener ciertas desventajas en el caso de aspectos que son considerados, tales como el *degrado* y el principio de *equipo*. El propósito del *degrado* es completar posiciones requeridas de la tripulación de bajo rango por tripulantes de alto rango, para más detalles referirse a David et al. (2001) y König and Strauss (2000). Para aumentar la eficiencia y seguridad del trabajo, la construcción de equipos estables es una preocupación de las aerolíneas. Una minuciosa discusión de aspectos del equipo puede ser encontrada en Thiel (2004).

2.2.3. Modelos basados en Redes

La tarea completa de programación o sub-problema del PRT y Problema de Asignación de Líneas-de-Trabajo de la Tripulación, puede además ser formulada como flujo de redes. En la literatura son divididas en dos categorías diferentes: redes trip-as-node y trip-as-arc, donde el término "trip" generalmente hace referencia a una ruta de vuelo, servicio de vuelo o rotación en el escenario PPT.

Adicionalmente, tales redes pueden ser transformadas a modelos de Particionamiento o Cobertura del Conjunto equivalentes con respecto a las restricciones de cobertura requeridas.

Redes trip-as-node

Redes basadas en la conexión, rutas de vuelo son nodos y arcos las posibles conexiones, p.ej. basadas en reglas para líneas-de-trabajo válidas entre nodos.

Tempranos ensayos (Nicoletti 1975) describen la aplicación de redes basadas en la conexión para el Problema de Asignación de Líneas-de-Trabajo de la Tripulación. Más recientemente (Yan and Tu 2002; Yan and Chang 2002), son desplegados para solucionar un problema de tripulación de cabina de mando y de pasajeros en China Airline, mientras que son embebidos en un Algoritmo Genético (Ozdemir and Mohan 2001).

Redes trip-as-arc

Redes espacio-tiempo o redes basadas en el servicio/vuelo, arcos representan rutas de vuelo o actividades de la tripulación, p.ej. una ruta de vuelo o periodo de descanso, nodos indican localización y tiempos dedicados.

Una red espacio-tiempo distribuye operaciones de transporte aéreo militar determinando el mínimo número de miembros de la tripulación requeridos (Kress and Golany 1994), y es aplicado para solucionar el PRT en Air France (Desaulniers et al. 1997).

2.2.4. Meta-Heurísticas

En contraste a la heurística constructiva anteriormente mencionada en la sección "2.2.1. Heurística Constructiva", los siguientes algoritmos muy populares están motivados por la simulación de los procesos que ocurren naturalmente.

Las meta-heurísticas más comunes son:

Algoritmos Genéticos

Un procedimiento de Algoritmo Genético (AG) involucra la creación de un conjunto de individuos (llamados población) donde cada uno de ellos representa una –no necesariamente factible- solución del problema. Mientras la población es actualizada por operadores y mutaciones definidas que ocurren con una cierta probabilidad, individuos existentes son reemplazados por su descendiente aleatoriamente o con una cierta probabilidad. Un así llamado valor de adaptabilidad el cual implica la probabilidad de ser seleccionado para la reproducción es adjuntado a cada individuo.

Una aplicación de AG para rutas de transporte cortas (domésticas) para una aerolínea de Taiwán es aplicada (Chang 2002), y para el PPT se aplica un gráfico de vuelo basado en AG (Ozdemir and Mohan 2001).

Templado Simulado

El nombre (Simulated Annealing / SA, en inglés) e inspiración viene del proceso de templado del acero en metalurgia. Adaptado del proceso de minimización de la energía para el enfriamiento físico lento de metales, algoritmos TS aceptan en estados inmaduros (tempranos) aceptan peores soluciones para escapar de óptimos locales. Como la temperatura declina la probabilidad de aceptar peores soluciones converge a cero (ver Reeves 1993).

La generación de líneas-de-trabajo anónimas para FedEx es optimizada por una aproximación TS (Campbell et al. 1997) en la cual se persigue la pureza de la línea (sin mezclas de trabajos internacionales o domésticos, de mañana y tarde, dentro de los servicios de vuelo).

Búsqueda Tabú

Debido a la intención de evitar quedar atrapados en óptimos locales, una lista tabú es mantenida y actualizada por la Búsqueda Tabú (BT). Ello evita o castiga zonas recientemente visitadas del espacio de la solución (ver Glover 1989, 1990; Reeves 1993).

Como un ejemplo, una BT y un procedimiento de búsqueda local iterativa (BLI) son comparados en su aplicación (Bellanti et al. 2004), para un problema de programación de nurses en comparación a planes generados manualmente.

2.2.5. Otras Aproximaciones

A parte de las aproximaciones previamente examinadas hay una variedad de otros conceptos para hacer frente al PPT o uno de sus sub-problemas, tales como:

Optimización Local

La optimización local trabaja en una zona dedicada de una solución encontrada en lugar de cubrir el modelo completo en el mismo tiempo. Esta aproximación es usada como una estrategia de mejora para soluciones existentes para, p.ej., heurísticas o restricciones relajadas.

Sub-conjuntos de rotaciones de la actualmente mejor solución son descompuestos y recombinados en nuevas rotaciones legales, si su evaluación determina su superioridad sobre las rotaciones originales, ellos deberían ser intercambiados (Gershkoft 1989). En un modelo de optimización del programa de la tripulación se permite sobre-cubierta y bajo-

cubierta de vuelos (exceso y deficiencia del número de miembros de la tripulación requerido) en la solución inicial por penalidades (Anbil et al. 1991); un método de optimización local es entonces aplicado para encontrar mejoras potenciales.

Programación Lógica de Restricciones

Esta tecnología (Constraint Logic Programming / CLP) es capaz de resolver problemas altamente combinatoriales, donde –en contraste a la programación matemática- el problema es representado por variables de dominio (en lugar de desigualdades). En consecuencia, cada variable es definida por su región factible. CLP es posible de aplicar siempre, cuando no necesariamente soluciones óptimas son requeridas.

Una aproximación CLP es aplicada en Olympic Airways (Christodoulou and Stamatopoulus 2002). Una aplicación de CLP para la generación de sub-grupos óptimos para un problema de tripulación de cabina de pasajeros orientado al equipo (Hansen and Liden 2005).

Programación Dinámica

Programación Dinámica (PD) es utilizada para la optimización de problemas en los cuales la solución puede ser calculada recursivamente desde soluciones óptimas obtenidas previamente para sus sub-problema (ver p.ej. Wolsey 1998).

PD ha sido implementada en muchas aproximaciones GC (tales como en Yunes et al. 2000), o para resolver restricciones del problema del camino más corto (Desrochers et al. 1992). PD es implantada para el cálculo de un

límite bajo en el árbol de búsqueda del PPT, lo cual permite el cálculo de problemas relativamente grandes para su optimalidad.

Combinación de Técnicas

Otras aproximaciones, tales como combinaciones de las anteriores, pueden ser encontradas.

Una aproximación al algoritmo empleado por Carmen Systems, fue una combinación de relajación PL, programación dinámica y un algoritmo voraz (greedy algorithm) para el PPT (Wedelin 1995). Adicionalmente, varios otros ensayos técnicamente orientados han sido publicados, p.ej. se ha evaluado una aproximación basada en una combinación de relajación de Lagrange, programación lineal y heurística para abordar problemas de particionamiento de conjuntos a gran escala.

2.3. MODELOS DE SOLUCIÓN - ESQUEMA INTEGRADO

Como se ha comentado en “2.1. Esquema General”, el PPT es un problema de alta complejidad combinatorial por naturaleza, debido al gran número y complejidad de restricciones involucradas, p.ej. regulaciones del gobierno e internacionales, convenios gremiales, políticas de la compañía, etc.; y por ello se adopta la aproximación secuencial en dos pasos, los sub-problemas PRT y PAT siendo ellos a su vez problemas altamente complejos también.

Con el actual estado-del-arte de las tecnologías, se ha logrado alcanzar un punto óptimo de la solución de alguno de los dos pasos, sin embargo tal procedimiento secuencial tiene algunas desventajas (drawbacks), especialmente en el caso de que las rotaciones generadas en el PRT

resultan inconvenientes o aún imposibles de ser asignados en el posterior paso PAT, debido a que sólo entonces se conoce la disponibilidad del personal. Tales ocurrencias pueden imponer un costo adicional para la reconstrucción de rotaciones y re-asignación. En algunas soluciones que dividen aún más los pasos del PRT y PAT, para solucionarlos por funciones de la tripulación (p.ej. PAT para capitán y PAT para primer oficial) se presentan otras desventajas, tales como la no-aplicación del principio de de grado y la orientación al equipo.

Aunque muchas publicaciones destacan la necesidad de solucionar el PPT, pocas de ellas se focalizan en el problema completo unificando los pasos de programación. Por ejemplo se presentó una aproximación (Freling et al. 2001) en la cual se resolvía el diario PPT primero, considerando que los requerimientos no se garantizan a priori, sino que son asignados durante el proceso de optimización para una semana PPT. Adicionalmente, se propuso un AG (Kerati et al. 2002; Guo et al. 2003), el cual manejaba el PPT durante la fase operacional (Problema de Recuperación de la Tripulación, ver Glosario), y por consiguiente, periodos de planeamiento comparablemente cortos (para el programa de recuperación) fueron considerados.

2.3.1. Esquemas Parcialmente Integrados

Una aproximación completamente integrada de la programación de la tripulación en aerolíneas se mantiene indudablemente difícil. Por lo tanto esto deja una tarea de investigación importante y desafiante para encontrar maneras de integración parcial de los dos pasos, de modo que las desventajas mencionadas anteriormente puedan ser eliminadas al menos hasta cierto punto. Sobre todo hoy en día, el poder creciente computacional ha hecho posible solucionar problemas aparentemente imposibles observados en el pasado.

En resumen, la aproximación integrada de programación de la tripulación en aerolíneas seguirá siendo la tendencia de investigación futura.

Guo et al. (2003) propone un procedimiento de integración parcial para solucionar el PPT en aerolíneas. Ellos desarrollan un modelo especial de flujo de redes, llamado "modelo de flujo de red estado-expandido agregado espacio-tiempo" que genera no sólo rotaciones, sino que más notablemente cadenas de rotaciones como secuencias de rotaciones que cubren el periodo de tiempo definido, incorporando el descanso semanal de modo que todas las reglas y reglamentaciones válidas sean tenidas en cuenta. Tomando en cuenta las actividades pre-programadas garantizadas de individuales miembros de la tripulación, el número real de miembros disponibles de la tripulación en cada día -llamado capacidad de la tripulación dinámica- puede ser correctamente considerada ya en la fase de generación de rotaciones, mejorando de esta manera la calidad de la solución total.

Klabjan et al.(2002) propone una integración parcial de programación de la tripulación y enrutamiento de aeronaves en la cual ellos consideran la posibilidad de enrutar aeronaves añadiendo restricciones de conteo de aviones al problema de la tripulación. Se reporta que las soluciones resultantes para el PPT tienen considerablemente costos más bajos que aquellas obtenidas del modelo tradicional.

Cohn and Barnhart (2003) presentan el así llamado "modelo de rotaciones de la tripulación extendido" que integra decisiones claves de enrutamiento de aeronaves con la rotación de la tripulación.

Ideas de integración similares aparecen también en otras áreas de transporte, p.ej., para problemas de programación de vehículos y tripulación en empresas de autobús. Freling et al. (2000) propone nuevas formulaciones matemáticas para problemas de programación de vehículos y tripulación de

manera completamente integrada. En su aproximación, la relajación de Lagrange es dirigida, junto con una implementación que usa la generación de columnas aplicada a un "tipo de modelo de particionamiento de conjuntos". Basados en los resultados computacionales probados con datos reales, analizan la performance de los algoritmos propuestos comparándolos con aproximaciones secuenciales tradicionales. La aplicabilidad de las técnicas propuestas a problemas prácticos integrados está probada.

CAPÍTULO III

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1. DESCRIPCIÓN DEL CONTEXTO SOCIAL

El problema se sitúa en la Aviación Comercial, y es propio de las aerolíneas que se ocupan del transporte de pasajeros, quienes deben realizar sus vuelos de forma tal que se obtenga el mayor beneficio, llevando a cabo para ello diversos procesos de programación en diferentes niveles, tanto a nivel estratégico, como táctico operativo (planeamiento) y de control de operaciones irregulares.

Entre los procesos de programación principales que realizan las aerolíneas tenemos los siguientes:

- **Estimación de tiempos de salida y llegada.** Tiempos de abordaje, carga / descarga, etc.
- **Estimación de la demanda.** Necesidades de los clientes.
- **Planeamiento de la red.** Si los destinos son alcanzados a través de una red Centralizada (usualmente en U.S.A.) o una red Punto-a-Punto (frecuente en Europa).
- **Planeamiento de capacidad.** Número de asientos requeridos y frecuencia de los vuelos.

- **Asignación de flota.** Selecciona flota para cada vuelo, considerando capacidad, tipo de avión y costo operacional (combustible, mantenimiento, etc.).
- **Enrutamiento de Aviones.** Trayectorias de vuelo óptimas para alcanzar el destino especificado, evitando problemas geográficos y zonas de “no-vuelo”.
- **Programación de Vuelos.** En función de la demanda y beneficios asociados a cada ruta “origen-destino” comercializada, y las características propias de ruta (p.ej.: distancia, restricciones operacionales) y características de los aviones (p.ej.: velocidad, capacidad, costo de combustible, tripulación requerida, etc.).
- **Programación física de aviones.** Asigna aviones dedicados a las rotaciones de vuelos definidas.
- **Programación de Tripulación.** Asigna tripulación a todos los vuelos programados, teniendo en cuenta su disponibilidad y multitud de regulaciones internas y externas a la aerolínea.
- **Programación de Operaciones en Tierra.** Determina detalles como puertas de embarque, personal de tierra y aprovisionamiento entre otros.
- **Reprogramación en tiempo de Operación.** Paso final de la programación, maneja todas las interrupciones inesperadas de la normal operación, a nivel de tripulación, aeronaves y pasajeros, minimizando costo e impacto de aquellos eventos que tienen lugar.

El problema de Asignación de la Tripulación es la parte fundamental del proceso de programación de la tripulación, y tiene lugar durante la fase de planeamiento, no obstante con una frecuencia importante, los programas de vuelo de las aerolíneas son alterados, ya sea por causas climáticas (mal tiempo), técnicas (p.ej.: problema técnico en la aeronave, retraso de vuelo anterior) o personales de la tripulación (p.ej: inasistencia por enfermedad), estas interrupciones inesperadas ocurren durante la fase operacional y se

traducen en retrasos o cancelaciones de vuelos programados, afectando al programa de la tripulación.

Debido a lo anterior la programación de la tripulación está sujeta a cambios constantes durante su realización, siendo su corrección y actualización tratada mediante el proceso de reprogramación de la tripulación, el cual tiene lugar en tiempo de operación y ocurre a diario, debiendo brindar una respuesta incluso a los 30 mins. de ocurrido el evento inesperado que provoca la interrupción del programa planeado. En este caso el periodo operacional es muy corto, de horas o días (deseable no más de 48 horas), pues se busca afectar mínimamente el programa actual de la tripulación, y son tomados en cuenta otros factores tales como los costos de utilización del personal de reserva entre otros.

3.2. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

Se describen a continuación el alcance del presente trabajo realizado, cada uno de los puntos mencionados son discutidos en la sección "4.1. Análisis de Requisitos".

- No se considera el tratamiento de aerolíneas con múltiples bases origen, es decir que los tripulantes tienen siempre como base origen la base principal. Esto delimita el alcance de la solución a Aerolíneas con itinerarios a Nivel Nacional (vuelos domésticos).
- Se tienen en cuenta las estrategias de asignación de tripulación tales como *degrado* y *traslado aéreo*.
- Se requiere un modelo de solución integrada, es decir que se realice simultáneamente la generación de rotaciones y la asignación de los mismos a los miembros de la tripulación.
- El estudio considera el procesamiento de un volumen de datos acorde

con el requerido por las grandes aerolíneas, el cual contempla periodos de programación entre de 2 semanas a 1 mes y hasta 1000 vuelos al día.

3.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE ASIGNACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

Teniendo como base la programación de itinerarios de vuelo, de acuerdo a la Planificación Comercial, para un determinado periodo de tiempo (generalmente de 2 semanas a 1 mes), las aerolíneas elaboran periódicamente y cada vez que sea requerido la Asignación de la Tripulación a los itinerarios programados.

Los itinerarios se componen de vuelos, cada uno de los cuales tienen asignado un determinado avión, el cual dependiendo de sus características técnicas requerirá una determinada cantidad y tipo de tripulación (Pilotos, Copilotos, Ingenieros de Vuelo, Auxiliares, etc.).

La asignación de tripulantes a un itinerario, debe hacerse teniendo presente diversas restricciones / consideraciones y objetivos deseados de la solución (algunos contradictorios) las cuales describimos a continuación.

3.3.1. Problema Principal

La entrada del problema de asignación de la tripulación es el programa de vuelos de una aerolínea para un periodo específico (usualmente un mes). El programa de vuelos consiste de todas las rutas de vuelo que la compañía ha de cubrir durante el periodo definido.

Dados el programa de vuelos, junto con la información necesaria acerca de cada miembro de la tripulación disponible (p.ej. su nombre y rango), la salida requerida es un conjunto de “líneas de trabajo” (mensuales) válidos y óptimos para cada miembro de la tripulación.

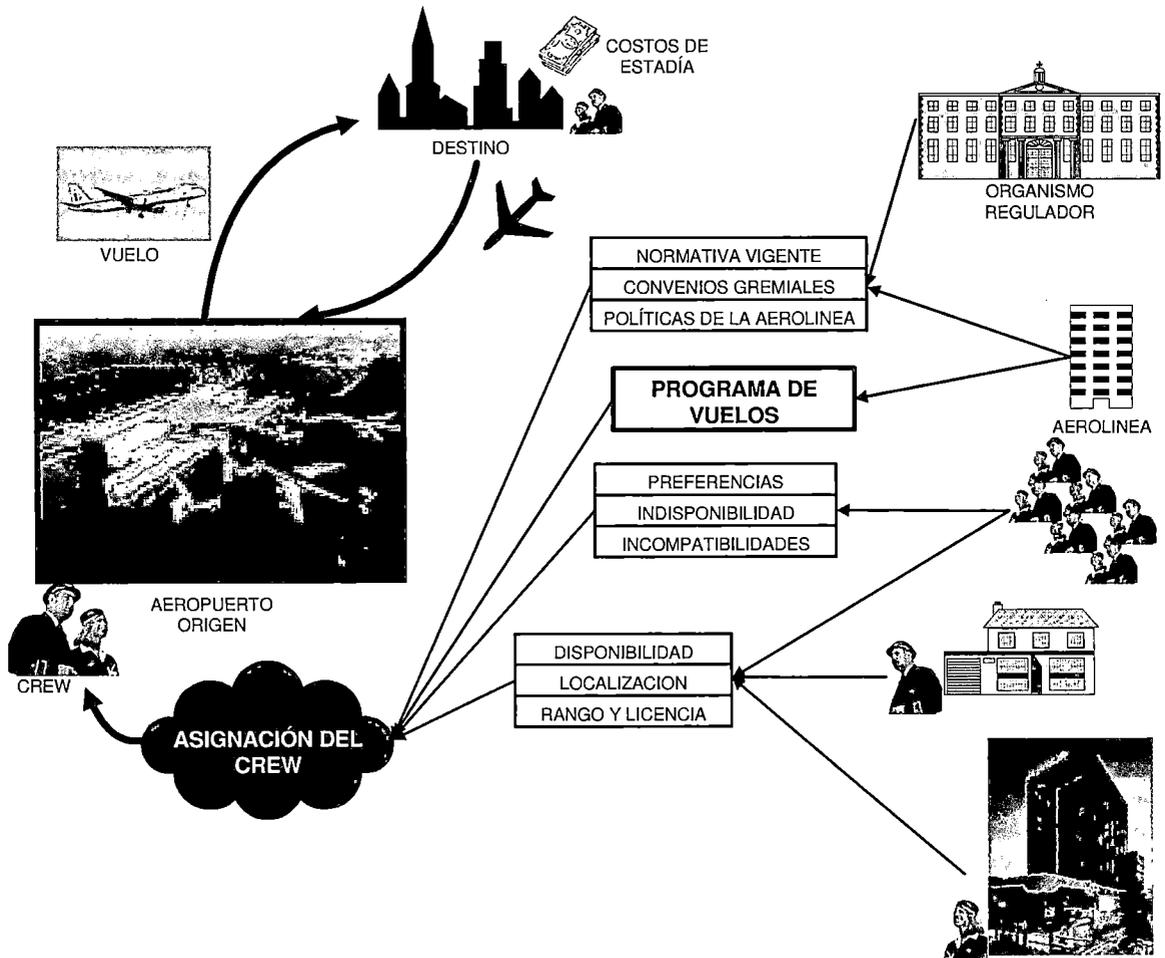


Figura 3-1. Presentación del Problema de Asignación de la Tripulación

3.3.2. Restricciones y Consideraciones

Están relacionados con la validez de la solución.

3.3.2.1. Normativa Vigente

Regula restricciones de jornada de trabajo, horas de vuelo y requisitos de descanso, su prioridad principal es la seguridad operacional. Como ejemplo tenemos la *Normativa 16-Bravo* utilizada por Air Europa y que sirve como referencia para la elaboración del Reglamento de la Comunidad Europea, sobre limitaciones del tiempo de vuelo, actividad y requisitos de descanso.

Como ejemplo citamos lo establecido por la Normativa 16-B respecto al tiempo de descanso:

“El período de descanso para los Tripulantes técnicos tendrá una duración mínima de 10,5 horas, o la de la actividad aérea precedente, la que resulte mayor; de modo que se garantice una estancia de 8 horas como mínimo, en el alojamiento. Para los tripulantes auxiliares será igual a lo anterior, con un mínimo de 10 horas totales.”

3.3.2.2. Convenios Gremiales y Propios

Las Aerolíneas suelen estar sujetas a convenios gremiales y tener convenios propios que especifican reglas y regulaciones de distinta índole, tanto de carácter económico (sueldos y salarios), así como consideraciones de carácter humano, entre otras. Por ejemplo:

- **Pagos de incentivos.**- Adicionalmente al salario base, y para cada rango de miembro de la tripulación, son fijados los pagos por horas en exceso de servicio mensual, los cuales han de ser considerados en el cálculo de costos de la solución obtenida. Por ejemplo en Marzo-2006 un acuerdo tentativo entre “Northwest Airlines, Inc” y Asistentes de Vuelo de la compañía, representados

por "Profesional Flight Attendants Association", fijaba en 75:00 horas el límite mensual de horas de vuelo al mes, a partir de las cuales se consideraría el pago como horas en exceso, dependiendo el mismo de la antigüedad del Asistente de Vuelo (Pago por Hora en exceso para el 2007: 1 año de antigüedad \$17.46, 2 años \$18.81, 3 años \$20.13, 4 años \$21.43, etc.).

- **Feridos especiales.-** Para servicios de vuelo en fechas especiales como Navidad y Año Nuevo la aerolínea podría establecer que sean rotativos entre el personal, y que en ningún caso se asignen ambos a la vez, el mismo año, a un mismo miembro de la tripulación.
- **Días libres excepcionales.-** En casos de nacimiento de hijos o matrimonio entre otros, las aerolíneas suelen otorgar días libres al personal involucrado.

3.3.2.3. Otras Consideraciones Adicionales

Al realizar la asignación de la tripulación a los itinerarios se tienen en cuenta otras cuestiones propias del sector orientadas a que la tripulación asignada se encuentre siempre en la mejor condición posible, para poder desempeñarse apropiadamente, dada la responsabilidad que tienen en sus manos.

- **Incompatibilidades.-** Se trata de evitar la incompatibilidad entre los miembros de la tripulación, no asignando a miembros incompatibles en el mismo vuelo.
- **Principio de equidad y Escalafón.-** Referido a que todas las rutas deben ser asignadas a todo el personal, tanto técnico como auxiliar, considerando en primer término al personal con mayor escalafón o rango.
- **Rutas preferentes.-** Asignadas a algún miembro de la tripulación

en particular.

- **Rutas no-preferentes.-** Son aquellas que no serán asignadas a cierto personal de vuelo. Como ejemplo citaremos los vuelos con extranjeros para su expulsión, los cuales son considerados problemáticos y se trata de evitar su asignación a miembros de la tripulación poco experimentados. Según datos del gobierno Francés sólo el 4,6% de las expulsiones por vía aérea presentan problemas o dificultades [SEP 07].

3.3.3. Características de la Solución

Son las que conllevan a la obtención de una solución óptima (calidad de la solución).

En líneas generales se requiere asignar tripulación a todos los vuelos del periodo establecido, dicha asignación se realiza teniendo en cuenta dos objetivos contrarios: minimización del coste de personal para la aerolínea y maximización de criterios de calidad-de-vida para la tripulación.

3.3.3.1. Minimizar los Costos

Una buena solución al problema propuesto debería minimizar el costo de operación de la tripulación. Los principales factores que pueden derivar en costos altos de operación son: el número de *traslados aéreos*, tránsitos de la tripulación por carretera (taxis, autobús, etc.), periodos de descanso fuera de base, generalmente por haberse alcanzado el límite de horas de servicio máximo de la tripulación (sobre-tiempos son pagados de alcanzarse el límite máximo).

3.3.3.2. Ecuanimidad

Este factor de calidad de la solución a tener en cuenta, está referido a la distribución equitativa de la carga de trabajo entre el personal, lo cual se aplica sobre las horas de vuelo, el tipo de vuelo adjudicado, *traslados aéreos*, etc.

Este criterio también se aplica a los días libres asignados (permisos solicitados por el personal).

3.3.3.3. Preferencias

Otra importante cuestión a considerar para la calidad de la solución es la magnitud en la que las preferencias, de la tripulación o de la compañía, son satisfechas, las cuales se tratan en la sección “3.3.2.3. Otras Consideraciones Adicionales”.

La satisfacción de las preferencias puede conllevar a la asignación de servicios de vuelo con costos altos de operación, es decir que este objetivo puede ser contradictorio con la minimización de costos, sin embargo debe ser considerado pues la satisfacción del personal influye directamente sobre la operatividad de la tripulación.

3.3.3.4. Estabilidad de la Tripulación

Esta característica está asociada con la calidad de vida de la tripulación.

La tripulación asignada a un vuelo es un equipo de trabajo organizado (Capitán, Co-piloto, Ingeniero de Vuelo, Purser, etc.) y como tal, mientras más estable sea, mayor será la compenetración entre sus miembros,

incrementándose así su competencia y cohesión, ello deriva en un nivel de productividad y satisfacción mayor de la tripulación.

El valor del servicio brindado por una tripulación estable reditúa en una mayor satisfacción del pasajero (cliente) y es por tanto un objetivo de las aerolíneas.

3.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

La programación de la tripulación es un proceso de planeamiento muy importante para las aerolíneas, y más aún con la actual crisis del petróleo - actualmente por encima de 130 USD/barril-, que encarece día a día los costes de operación, obligando a las aerolíneas hoy más que nunca a reducir sus costos de bienes y servicios no-combustibles, siendo de vital importancia optimizar el costo de la tripulación que es el segundo mayor costo operacional para las aerolíneas, excedido sólo por el costo de consumo de combustible.

Citamos a continuación algunos datos que demuestran la importancia del costo de la tripulación.

AEA – Estado de la Industria May-2008

La Fig. 3-2 muestra los datos de la AEA (Association of European Airlines) expuestos en Bruselas en May-2008, en ella se muestra el costo de la tripulación dividido en tripulación de cabina de vuelo (Flight Deck Crew) y los asistentes de cabina de pasajeros (Cabin Attendants), los cuales representan en conjunto el 15% del costo total de operación para el 2006, y el 14% estimado para el 2008. El costo de la tripulación es el segundo mayor costo operacional, por detrás del costo de combustible que se incrementa

desde un 23% en 2006 hasta un 33% estimado para el 2008, situación más que probable debido a la creciente subida del precio petróleo antes comentada.

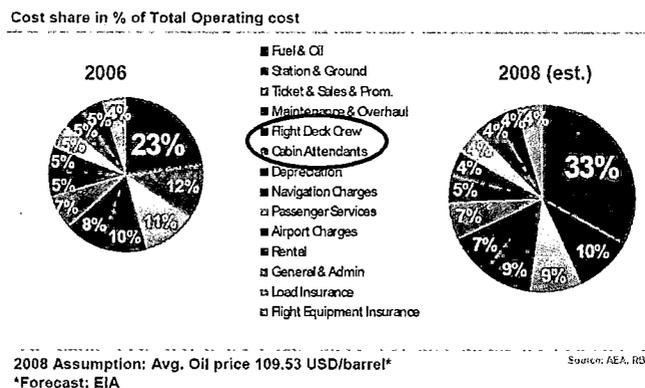


Figura 3-2. AEA - Estado de la Industria. Distribución de Costos Operativos.

LAN – Estado Consolidado de Resultados 2007-2006

Los Resultados del 2007 para LAN Airlines S.A., muestran que el costo del personal (Wages and Benefits) asciende a 489,55 Millones de USD (10,5% mayor respecto del 2006), siendo al igual que el gasto en combustible, de gran incidencia sobre la utilidad operativa (Operating Income) de sólo 413,37 Millones de USD.

LAN Airlines S.A.
Consolidated Income Statement (in thousands of U.S. Dollars)

	For the Three-Month Period ended December 31			For the full year ended December 31		
	2007	2006	% Change	2007	2006	% Change
REVENUES						
Passenger	642,368	514,224	24.9%	2,197,201	1,813,373	21.2%
Cargo	349,412	302,571	15.5%	1,154,323	1,072,730	7.6%
Other	54,313	36,711	47.9%	173,399	147,857	17.3%
TOTAL OPERATING REVENUES	1,046,093	853,506	22.6%	3,524,923	3,033,960	16.2%
EXPENSES						
Wages and Benefits	(139,998)	(122,880)	13.9%	(489,550)	(442,967)	10.5%
Aircraft Fuel	(294,321)	(191,222)	53.9%	(930,208)	(763,951)	21.8%
Commissions to Agents	(115,004)	(103,501)	11.1%	(402,577)	(403,899)	-0.3%
Depreciation and Amortization	(42,309)	(32,639)	29.6%	(153,852)	(122,802)	25.3%
Other Rental and Landing Fees	(104,309)	(93,363)	11.7%	(366,418)	(336,821)	8.8%
Passenger Services	(19,130)	(15,062)	27.0%	(71,844)	(56,077)	28.1%
Aircraft Rentals	(42,713)	(39,091)	9.3%	(158,917)	(157,681)	0.8%
Aircraft Maintenance	(40,956)	(26,940)	52.0%	(159,063)	(117,206)	35.7%
Other Operating Expenses	(115,464)	(90,825)	27.1%	(379,123)	(329,934)	14.9%
TOTAL OPERATING EXPENSES	(914,204)	(715,523)	27.8%	(3,111,552)	(2,731,338)	13.9%
OPERATING INCOME (LOSS)	131,889	137,983	-4.4%	413,371	302,622	36.6%
<i>OPERATING MARGIN</i>	12.6%	16.2%	-3.6 pp	11.7%	10.0%	1.8 pp
OTHER INCOME (EXPENSE)						
Interest Income	5,483	2,606	110.4%	18,043	7,897	128.5%
Interest Expenses	(20,134)	(18,647)	8.0%	(76,224)	(60,739)	25.5%
Other Income-Net	4,307	(8,237)	-152.3%	12,619	37,113	-66.0%
TOTAL	(10,344)	(24,278)	-57.4%	(45,562)	(15,729)	189.7%
INCOME BEFORE MINORITY INTEREST	121,545	113,705	6.9%	367,809	286,893	28.2%
Minority Interest	(1,471)	(1,669)	-11.9%	289	1,244	-76.8%
INCOME (LOSS) BEFORE INCOME TAXES	120,074	112,036	7.2%	368,098	288,137	27.8%
Income Taxes	(19,254)	(18,391)	4.7%	(59,775)	(46,837)	27.6%
NET INCOME (LOSS)	100,820	93,645	7.7%	308,323	241,300	27.8%
<i>NET MARGIN</i>	9.6%	11.0%	-1.3 pp	8.7%	8.0%	0.8 pp
NET INCOME (LOSS) EXCLUDING EXTR...	100,820	93,645	7.7%	308,323	212,956	44.8%
<i>NET MARGIN</i>	9.6%	11.0%	-1.3 pp	8.7%	7.0%	1.7 pp
Shares Outstanding	338,790,909	318,909,090	6.2%	338,790,909	318,909,090	6.2%
Earnings per share	0.30	0.29	1.3%	0.91	0.76	20.3%
Earnings per ADR	1.49	1.47	1.3%	4.55	3.78	20.3%

Figura 3-3. LAN Airlines – Estado de Resultados. Costos de la Tripulación

IBERIA – Estado Consolidado de Resultados 2006-2005

Los Resultados del 2006 para IBERIA Group, muestran que el costo del personal (Staff Costs) asciende a 1,40 Billones de USD (3,3% mayor respecto del 2005), siendo al igual que el gasto en combustible (1,18 Billones de USD), de gran incidencia sobre la utilidad operativa (Operating Profit) de sólo 0,12 Billones de USD.

Siendo la utilidad operativa el 8,7% del costo de personal, una reducción del 1% del costo de personal significaría un incremento del 11,4% de la utilidad operativa.

Millions of euros

IBERIA GROUP	2006	2005	Change 06/05	% Change
OPERATING REVENUE				
Passenger revenue	4,174.9	3,820.7	354.2	9.3
Cargo revenue	334.9	317.1	17.8	5.6
Handling	331.2	322.1	9.1	2.8
Maintenance	219.0	155.7	63.3	40.7
Commercial revenue	80.1	79.7	0.5	0.6
Other operating revenue	247.6	233.8	13.8	5.9
TOTAL OPERATING REVENUE	5,387.8	4,929.1	458.7	9.3
OPERATING EXPENSES				
Staff costs	1,395.2	1,442.3	(47.1)	(3.3)
Fuel	1,177.5	865.8	311.8	36.0
Traffic services	451.8	427.9	23.9	5.6
Aircraft lease expenses	449.2	405.6	43.6	10.7
Aircraft maintenance	337.8	294.9	42.8	14.5
Navigation charges	285.8	276.4	9.3	3.4
Commercial expenses	246.1	259.6	(13.6)	(5.2)
Amortisation and depreciation charge	219.4	177.7	41.6	23.4
Booking systems	147.8	139.7	8.0	5.7
In-flight services	87.4	81.5	5.8	7.2
Indemnity payments for passengers and baggage	51.6	35.5	16.1	45.5
Insurance	29.7	33.1	(3.3)	(10.1)
Other operating expenses	386.7	372.4	14.4	3.9
TOTAL OPERATING EXPENSES	5,265.8	4,812.5	453.3	9.4
OPERATING PROFIT	122.0	116.6	5.4	4.6
OPERATING PROFIT (exc. IAS 39)	150.3	89.6	60.6	67.6
EBITDAR	790.5	699.9	90.6	12.9
EBITDA	341.3	294.3	47.0	16.0

Figura 3-4. IBERIA Group – Estado de Resultados. Costos de la Tripulación

SH&E – Estructura de Costos Operativos 2001

En la conferencia de Bruselas del 22 de Enero del 2003, Simat Helliesen & Eichner Inc., Consultora Internacional de Transporte Aéreo, expone la estructura de Costos Operativos a nivel promedio mundial del 2001 (ver Fig. 3-5), donde se destaca que el principal costo operacional corresponde a las Operaciones de Vuelo (Flight Ops), el cual representa el 28% del total de costos operativos.

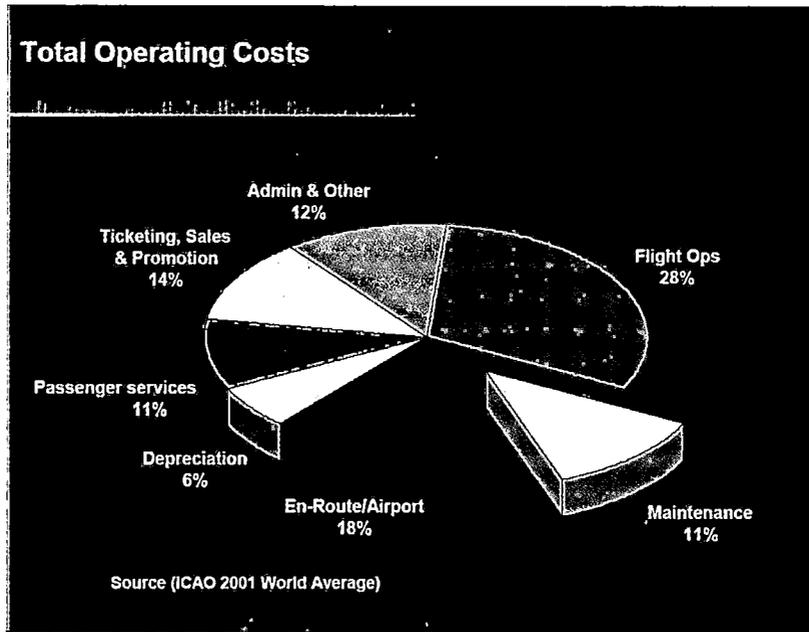


Figura 3-5. SH&E - Costos Operativos de las Aerolíneas. Distribución a Nivel Mundial

Las operaciones de vuelo a su vez tienen los siguientes componentes:

- Salarios de la Tripulación de Vuelo, Gastos y Entrenamiento
- Combustible
- Seguros y Pérdidas No-aseguradas
- Arrendamiento / Alquiler de Aeronaves

En la Fig. 3-6 podemos apreciar como en el 2001 la Tripulación de Vuelo (Flight Crew) era el 3er componente más importante de los costos operativos directos, con un 12% sobre el total, por detrás del gasto en combustible (27%) y mantenimiento (15%).

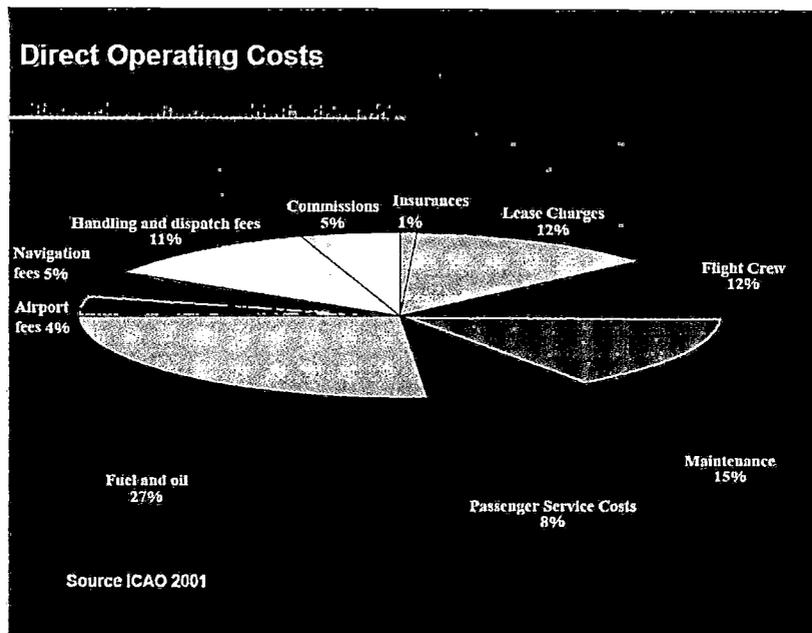


Figura 3-6. SH&E - Costos Operativos Directos de las Aerolíneas

Como un ejemplo adicional en [ANB 91] se reporta que American Airlines gastó 1,3 billones de dólares en costos de la tripulación en 1991.

Una solución de menor costo para el PPT puede significar un ahorro de millones de dólares por año para las aerolíneas.

Casi todas las grandes aerolíneas están usando un sistema que automatiza la programación de la tripulación, sin embargo, pruebas computacionales conducidas con datos actuales, llevan a la conclusión de que muchas de las soluciones provistas por esos sistemas necesitan mejoras significativas.

Se ha hecho mucho trabajo en el pasado para hacer frente a la PPT. Tradicionales enfoques se basan en técnicas de Investigación de Operaciones, algunas de ellas explotando el paralelismo, varios métodos basados en algoritmos genéticos o redes neuronales han sido propuestos, y finalmente la programación lógica de restricciones ha sido usada como

plataforma para solucionar el PPT, en algunos casos combinada con procesamiento en paralelo.

En el presente trabajo se plantea un método nuevo para dar solución al PPT de forma Integrada, dejando de lado el enfoque tradicional y sus deficiencias.

3.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Los objetivos de la investigación son los siguientes:

- 1 Elaborar un Método para realizar la asignación óptima de tripulación a los vuelos comprendidos en el periodo de planeamiento establecido, teniendo en cuenta el Esquema Integrado (ver "2.1.3. Solución Moderna - Integrada").
- 2 Siguiendo el Método creado, diseñar y construir un Modelo de Solución para el problema de asignación de la tripulación, utilizando una búsqueda exhaustiva adecuada.
- 3 Probar el Modelo generado con datos reales de itinerarios de vuelos, tanto en lo referente a rutas de vuelo, como al volumen de los mismos y periodo de planeamiento.
- 4 Crear un Modelo Básico de asignación de la tripulación, el cual simule la asignación que realizaría un experto humano (ver "2.1.1. Solución Básica - Experto Humano").
- 5 Validar el Modelo construido comparando sus resultados con los del Modelo Básico, analizando el grado de optimización obtenido.

3.6. HIPÓTESIS Y VARIABLES

Luego de realizado el estudio del problema en lo que refiere a lo que se demanda de una solución del mismo, y de analizar las diversas soluciones planteadas, enunciamos a continuación las hipótesis que guían el presente trabajo, teniendo presente las características del problema en estudio, el cual se representa en las Figuras 3-7 y 3-8.

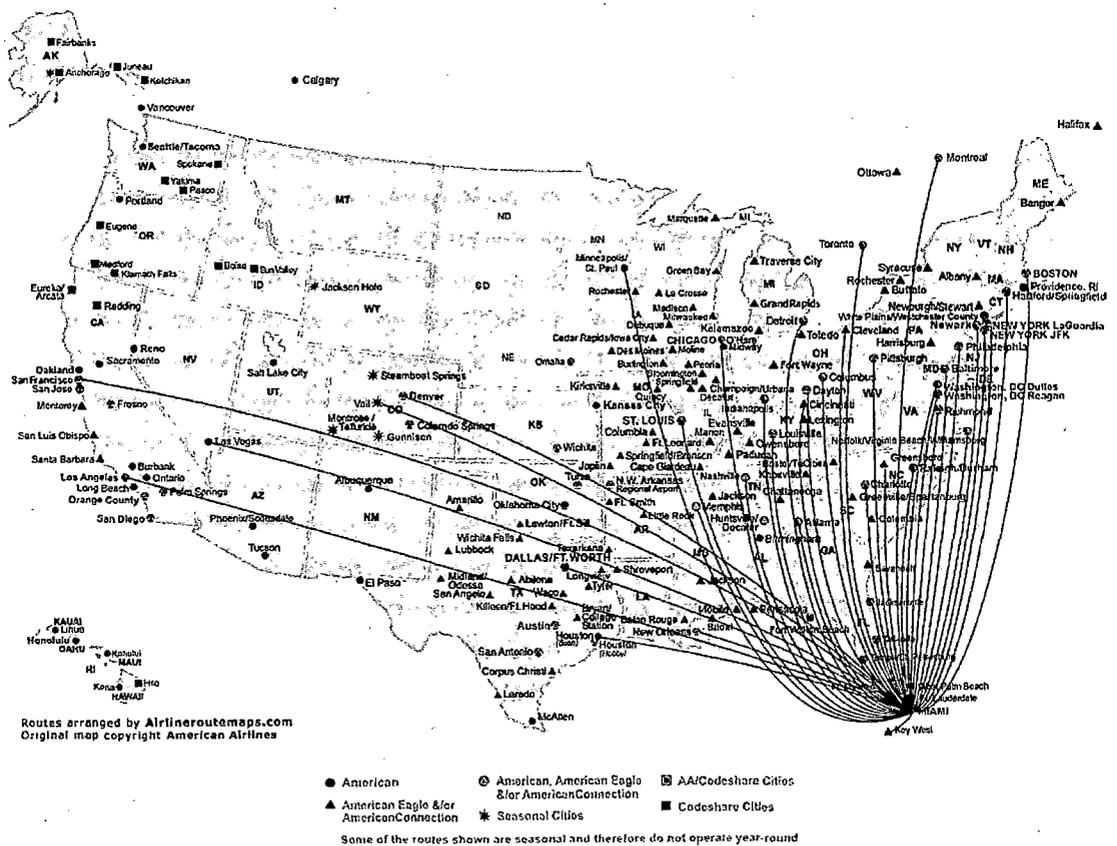


Figura 3-7. Red Centralizada - American Airlines (USA), Rutas Nacionales

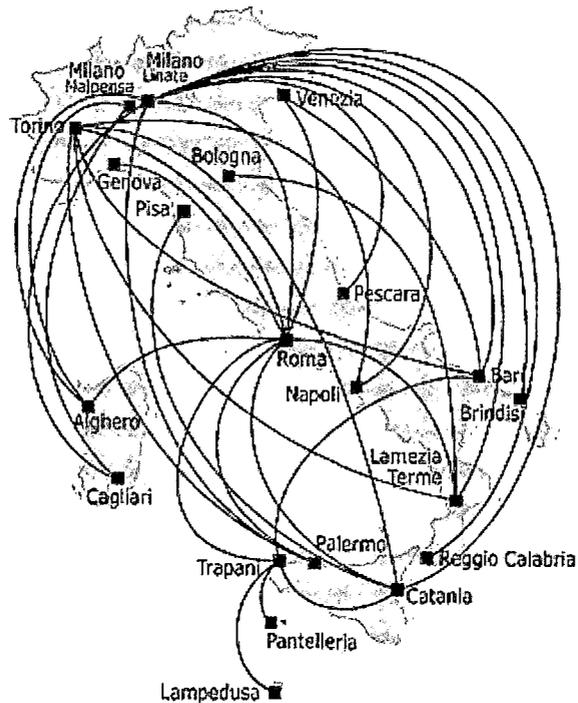


Figura 3-8. Red Point-to-Point – Air One (Italia), Rutas Nacionales

3.6.1. Hipótesis de Trabajo

“El problema se puede sub-dividir en problemas pseudo-independientes y ello posibilita obtener soluciones parciales del mismo”.

Según las características del problema tenemos un flujo de aviones que cubren rutas de vuelo, trasladando en cada una de ellas a los miembros de la tripulación que han sido asignados a dicho vuelo, de un aeropuerto origen a un aeropuerto destino. Los aviones que parten de un aeropuerto origen a un aeropuerto destino requieren tener asignados tripulación a la salida del aeropuerto destino, nos enfocamos en un vuelo cualesquiera, al momento de su llegada a un aeropuerto destino -que no es la Base de la aerolínea- y tratamos su requerimiento de asignación de tripulación para su salida de

dicho aeropuerto.

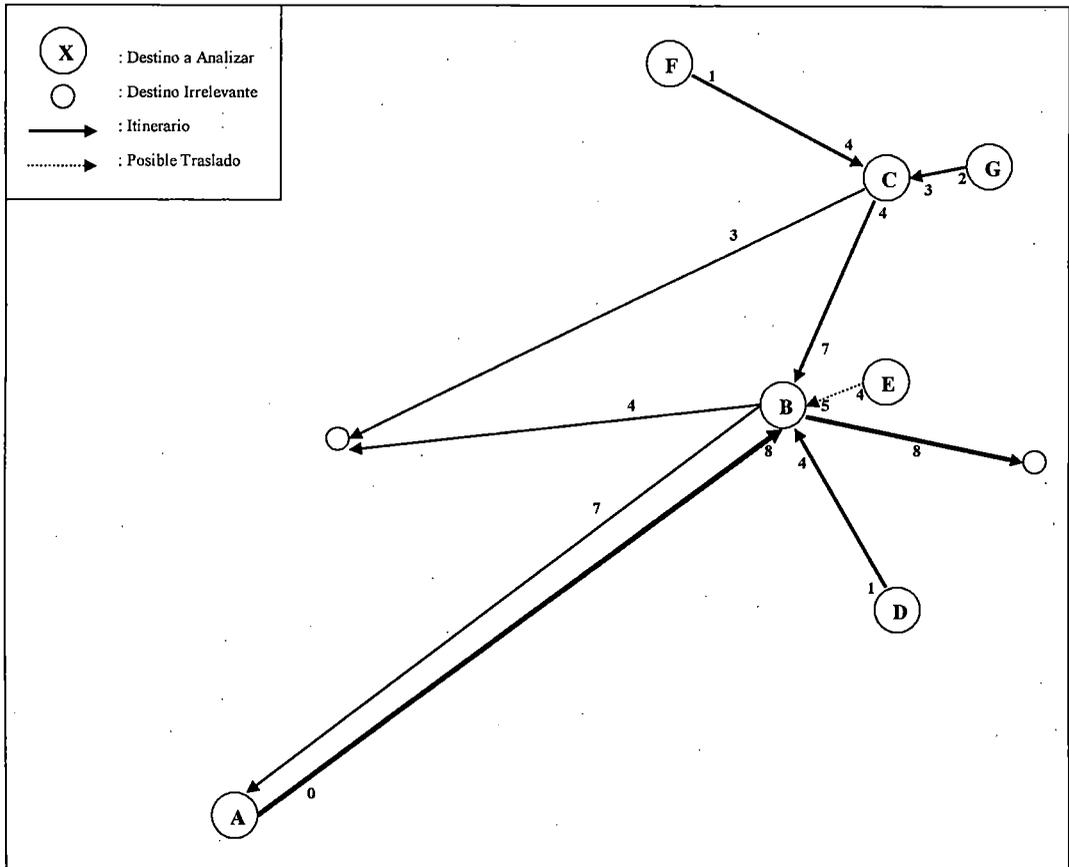


Figura 3-9. Red Parcial, sub-problema pseudos-independiente

Analizamos el vuelo AB 0:00 (vuelo con origen A y destino B que sale a las 0:00 horas), se quiere garantizar que a su salida de B (vuelo B? 8:00 en negrita, continuación del vuelo AB 0:00), tenga asignada la tripulación requerida. La asignación de la tripulación en el destino B, para el vuelo B? 8:00 se realizará teniendo en cuenta el personal en el destino B (miembros potenciales de la tripulación) a las 8:00 horas, el cuál se circunscribe a:

- Personal que ha arribado recientemente a B en vuelos previos al vuelo en análisis (personal en servicio de vuelo). En nuestro caso serían los vuelos CB 4:00 y DB 1:00.

- Personal que ha arribado recientemente a B vía *traslado aéreo* o por tránsito terrestre. En nuestro caso tenemos el *traslado* EB 4:00.
- Personal que permanece en el aeropuerto destino B (personal disponible en el destino). Puede ocurrir que en B exista personal de vacaciones y que al final de las mismas inicie sus actividades en dicho destino, o que algún retraso / cancelación haya derivado en que se encuentre en el destino B incluso desde días atrás.

Para la asignación de la tripulación al vuelo B? 8:00, sólo interesa analizar los vuelos que influirán sobre el personal disponible en el destino B a las 8:00 horas, cuando ocurre la salida del vuelo B? 8:00. Se excluyen por tanto del proceso de asignación los vuelos posteriores a la salida del aeropuerto B del vuelo en análisis, es decir vuelos que llegan a B después de las 8:00 horas).

Sobre los vuelos previos que influyen sobre el personal disponible en B a las 8:00 horas, vemos que siguiendo un orden cronológico, el vuelo AB 0:00 es el primero en salir y no hay vuelos previos a él, sin embargo como se ha comentado con anterioridad, existen vuelos posteriores como CB 4:00 y DB 1:00, así como también el *traslado* EB 4:00 que llegan a B antes que el vuelo AB 0:00, y por tanto antes que la salida del vuelo B? 8:00, dichos vuelos deben ser considerados en el proceso de asignación de la tripulación al vuelo B? 8:00. Adicionalmente se observa que la tripulación asignada al vuelo CB 4:00, es dependiente de los vuelos previos FC 1:00 y GC 2:00, pues son vuelos previos a CB 4:00 y posteriores a AB 0:00.

Los vuelos C? 3:00, B? 4:00 y BA 7:00, son vuelos poco relevantes para la asignación de tripulación del vuelo B? 8:00, pues sus destinos siguientes se alejan de B.

Según lo comentado anteriormente y para el caso que se analiza, asignación

de la tripulación en el destino B a las 8:00 horas, el sub-problema a resolver está delimitado por:

- Intervalo de Tiempo: Desde las 0:00 a las 8:00 horas.
- Destinos involucrados: A, B (destino principal), C, D, E, F y G.
- Vuelos involucrados: AB 0:00 (vuelo principal), CB 4:00, DB 1:00, FC 1:00, GC 2:00 y B? 8:00 (vuelo para el que se analiza lo ocurrido en el destino principal B)
- *Traslados / Transitos* a considerar: EB 4:00
- Vuelos no-relevantes: C? 3:00, B? 4:00 y BA 7:00

En consecuencia, la asignación de la Tripulación se puede sub-dividir en sub-problemas pseudos-independientes, a los cuales llamaremos "Redes Parciales", teniendo en cuenta el vuelo más próximo en salir (orden cronológico) –vuelo principal-, y los vuelos que lleguen a su aeropuerto destino antes que el vuelo analizado, centrando el análisis en asegurar que se tendrá una Tripulación asignada para la salida del vuelo principal del aeropuerto destino.

Aplicando el criterio anterior en orden cronológico se puede resolver todo el Problema de Asignación de la Tripulación.

3.6.2. Hipótesis Conceptual

"La aplicación adecuada de una búsqueda exhaustiva obtendrá una buena solución al problema".

Aceptando como válida nuestra hipótesis de trabajo, el problema sería divisible en pequeñas partes, es decir pequeñas sub-redes de vuelos las cuales podrían ser optimizadas sin que una sub-red afectara a otra. Lo anterior posibilita realizar búsquedas exhaustivas en cada sub-red para

obtener su asignación óptima y continuar con la siguiente hasta completar la solución de toda la red de itinerarios comprendidos en el periodo definido.

3.6.3. Hipótesis Operativa

“Existen diferencias significativas entre los resultados obtenidos por el método utilizado y la asignación simple equivalente a la que realiza un planificador (experto humano) que no utiliza un método”.

Un planificador (experto humano) que no utiliza un método realizará una asignación en base a la situación actual, es decir que en un momento y para un vuelo definido le asignará la tripulación eligiendo adecuadamente de la que estuviere en el destino (método día-por-día), pero sin analizar si el vuelo contaría con la tripulación necesaria para salir del destino de llegada, ni tener en cuenta otros tripulantes que pudieran llegar al mismo destino de llegada desde otros vuelos.

3.6.3.1. Hipótesis Nula

“La utilización del método definido no mejora la solución en más de un 50%”.

3.6.3.2. Hipótesis Alternativa

“Una búsqueda exhaustiva adecuada obtendrá una solución 50% mejor al problema que un sistema no optimizado”.

3.7. DEFINICIÓN DE MÉTRICAS / INDICADORES DE PERFORMANCE

Para evaluar la solución obtenida por el método a desarrollar y en concordancia con los objetivos (ver sección “3.5. Objetivos de la Investigación”), antes definidos, esperados para la solución al problema de programación de la tripulación, se tendrán en cuenta los siguientes indicadores:

- 1 Número de vuelos con tripulación asignada y vuelos con tripulación no asignada o incompleta.
- 2 Número de *traslados*, *stay-overs* y *tránsitos*.
- 3 Número y tipo de tripulantes requeridos por la solución.
- 4 Número de horas de servicio y de vuelo asignadas.
- 5 Número de preferencias y solicitudes cubiertas.
- 6 Número de cambios de equipo.
- 7 Tiempo de la solución.

3.8. MÉTODO DE CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

El método propuesto se basa en el particionamiento del problema, la solución de cada parte considerada mediante la aplicación de una búsqueda exhaustiva, y la optimización del acoplamiento de cada solución parcial encontrada para generar así la solución total del problema planteado.

Un experto especializado en la materia, realizaría las asignaciones de tripulación según se fueran dando en el tiempo los vuelos programados, es decir que de forma secuencial iría asignando miembros de la tripulación a la aeronave que realizara el vuelo más próximo en salir, eligiendo de forma adecuada entre los tripulantes que se encuentran en el aeropuerto origen del

vuelo. Una vez terminado con la asignación de un vuelo, seguiría con el siguiente a realizarse en el tiempo y así hasta completar el total de vuelo programados para el periodo de programación elegido.

La contrastación de la hipótesis de la presente tesis, se basa en la comparación de los resultados obtenidos por el método propuesto y el que obtendría un experto especializado, en base a los indicadores de performance definidos (ver sección *“3.7. Definición de Métricas / Indicadores de Performance”*). En el caso de observar diferencias se negaría la hipótesis nula: *“La utilización del método definido no mejora la solución en más de un 50%”* y ello nos llevaría a aceptar la hipótesis alternativa: *“Una búsqueda exhaustiva adecuada obtendrá una solución 50% mejor al problema que un sistema no optimizado”*.

Para la contrastación de la hipótesis será necesario contar con una aplicación que realice de forma automática la asignación que realizaría un experto especializado, la aplicación que implemente el método propuesto y data de prueba.

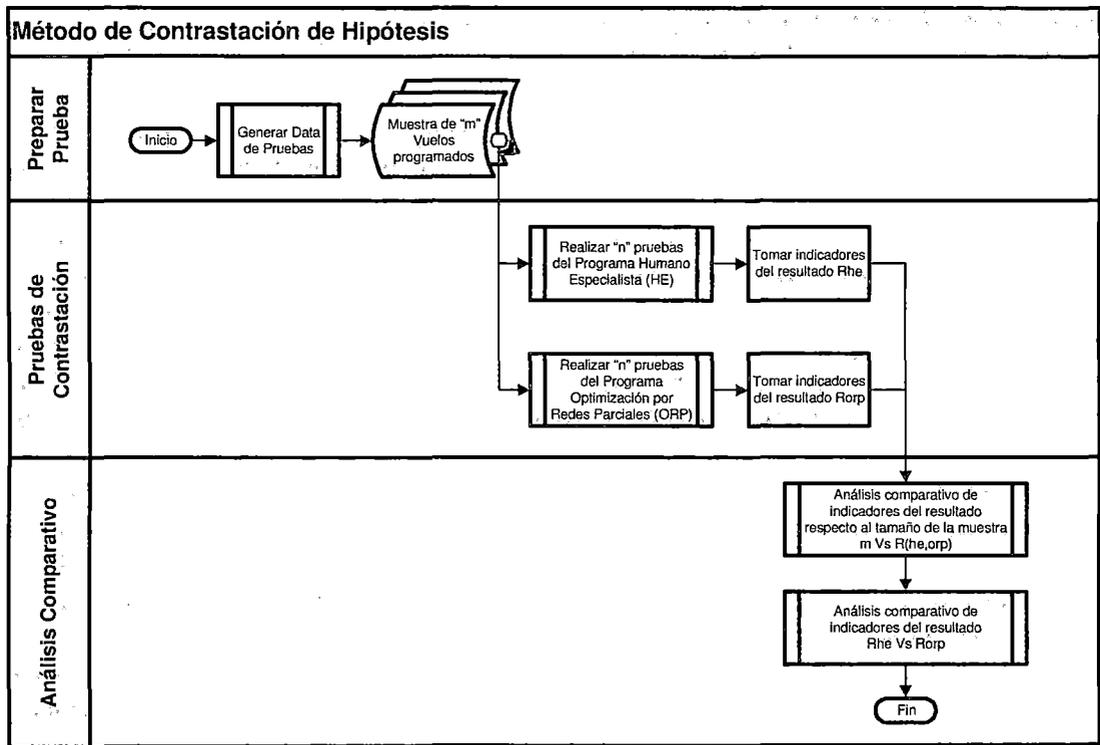


Figura 3-10. Método de Contratación de Hipótesis

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DESARROLLO DEL MÉTODO DE ASIGNACIÓN

4.1. ANÁLISIS DE REQUISITOS

El problema principal del PPT consiste en la *asignación de tripulación a las rutas de vuelo programadas*, dicha asignación tiene lugar durante la Fase de Planeamiento y debe cumplir con diversas exigencias y limitaciones (ver sección "3.3.2. Restricciones y Consideraciones").

Tanto el periodo de programación, como los itinerarios de vuelo programados y las aeronaves asociadas a cada vuelo son definidas previamente y forman parte de los datos del PPT, así como también el personal de la aerolínea, su rango y ubicación inicial.

La solución obtenida para el PPT debe satisfacer una serie de requisitos, los cuales detallamos a continuación (*).

(*) No se consideran aquí otros objetivos relacionados a la aeronave y pasajeros.

- Programa de Vuelos
- Programa de Reservas
- Estructura de Costos y Pagos
- Actividades Pre-programadas

- Esquema de Asignación
- Orientación al Equipo.

4.1.1. Programa de Vuelos

El fin principal del PPT, el cual establece la correspondencia vuelo-tripulante, es decir la tripulación (piloto, copiloto, supervisor, auxiliar de cabina, etc.) correspondiente a cada itinerario de vuelo programado durante el periodo de programación fijado.

La asignación de miembros de la tripulación resultante tiene en cuenta el nivel requerido de la tripulación el cual es dependiente de la aeronave que cubre cada vuelo. Adicionalmente se han de considerar las limitaciones propias de la aviación comercial tales como: tiempos de trabajo, periodos de descanso y rotaciones.

El programa de vuelos se requiere sea elaborado para el mayor intervalo de tiempo posible, siendo el periodo de programación generalmente de 2 semanas a 1 mes.

4.1.2. Programa de Reservas

Establece el personal disponible en la Base para situaciones de interrupción, tales como retrasos y cancelaciones de vuelos, indisponibilidad de algún miembro de la tripulación u otros.

Al ocurrir acontecimientos no previstos, se requiere que tanto la programación de vuelos como el personal de la aerolínea se adecuen a los mismos para mantener la operatividad; para tales situaciones las aerolíneas mantienen personal asignado permanente a tareas de reservas que pueden

ser en la Base (operativas) o en sus domicilios (imaginarias).

4.1.3. Estructura de Costos y Pagos

Cálculo en base al programa de vuelos y reservas y de las regulaciones sobre pagos y compensaciones existentes para la aviación comercial. El cálculo se compone del salario de la tripulación y el costo operacional planificado (*traslado aéreo*, hotel, taxis, dietas, etc.), y varía dependiendo de la aerolínea y la región, tanto por el esquema de incentivos que pudieran tener, como por sistema de costos de la región (en Norte América se utiliza el sistema llamado “pago-y-crédito” y en Europa se maneja como una función lineal gradual fijando el salario a las 2/3 de las horas contratadas y un ratio mayor para las restantes si se necesita).

Este es otro de los objetivos fundamentales del PPT, se requiere que el costo asociado al programa de vuelos para los miembros de la tripulación sea mínimo.

Como se ha comentado, el costo de operación de la tripulación es el segundo más relevante, sólo por detrás del costo de combustible y generalmente asciende a un 15-20% del gasto total de operación de una aerolínea.

4.1.4. Establecimiento de Actividades Pre-programadas

Forman parte del “programa esqueleto” de cada miembro de la tripulación, las cuales se deberán acometer sin excepción durante el periodo de programación.

Las actividades pre-programadas son establecidas previamente al PPT y

definen la disponibilidad del personal. Servicios de vuelo que se solapen con ellas no son permitidos.

Las actividades pre-programadas pueden ser las siguientes:

- Simuladores
- Entrenamiento
- Exámenes médicos
- Tareas de oficina
- Vacaciones
- Permisos solicitados y concedidos (indisponibilidad)

4.1.5. Esquema de Asignación

Los criterios que se deben considerar al realizar la asignación de la tripulación a los itinerarios de vuelo programados son los siguientes:

- **Ecuanimidad.** La carga de trabajo debe ser distribuida entre todo el personal.
- **Preferencias.** La programación debe considerar las preferencias manifiestas de los miembros de la tripulación por determinadas ruta de vuelo. Aquí debe considerarse también la conveniencia de no asignar determinadas rutas de vuelo a cierto personal, ya sea por su poca experiencia y tener el itinerario un riesgo asociado (p.ej.: vuelos de repatriación), o por cualquier otro motivo.
- **Incompatibilidades.** La asignación debe tener en cuenta las posibles incompatibilidades que hubieren entre algunos miembros de la tripulación, y evitar asignarles la misma ruta de vuelo.

4.1.6. Orientación al Equipo

Se ha alcanzado un punto óptimo de minimización de costos y por ello se tratan ahora temas como criterios para mejorar de calidad de vida de la tripulación, los cuales derivan en una mayor satisfacción del pasajero (cliente).

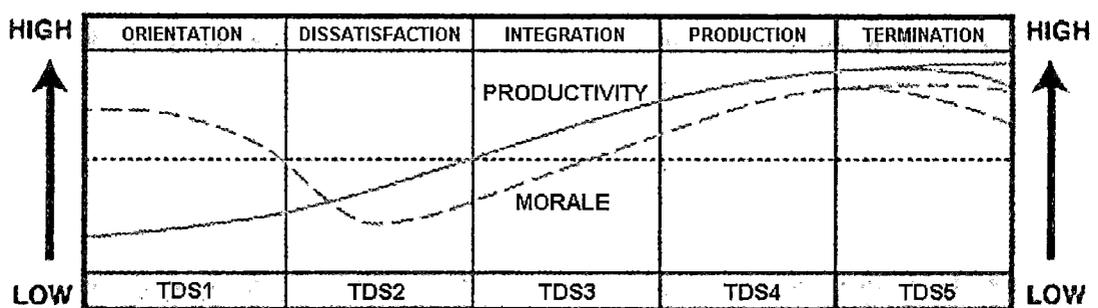


Figura 4-1. Ciclo de Vida del Equipo (basado en Lacoursiere 1980)

La tripulación asignada a un vuelo es un equipo de trabajo organizado (Capitán, Co-piloto, Ingeniero de Vuelo, Purser, etc.) y como tal, mientras más estable sea, mayor será la compenetración entre sus miembros, incrementándose así su competencia y cohesión, ello deriva en un nivel de productividad y satisfacción mayor de la tripulación.

El valor del servicio brindado por una tripulación estable reditúa en una mayor satisfacción del pasajero (cliente) y es por tanto un objetivo de las aerolíneas. Los cambios de tripulación pueden ocurrir en los siguientes casos:

- Un miembro de la tripulación es asignado a otra ruta de vuelo con una tripulación distinta.
- Un miembro de la tripulación ha alcanzado su límite de horas de vuelo diarias y debe descansar. Se reemplazaría con otro tripulante.

La asignación de tripulación debe realizarse evitando los cambios de tripulación, es decir que debe tratarse de mantener estables las diferentes tripulaciones formadas –las composiciones de tripulación cambian rápidamente-.

Esto puede incurrir en un mayor costo para la aerolínea, por ello debe fijarse la penalización que supone un cambio en la tripulación, para su evaluación, considerándose como un incremento del costo operacional.

4.2. PROBLEMAS Y NECESIDADES DEL MÉTODO ACTUAL

- El problema es de tipo NP-Duro, y el volumen combinatorial es impensable de ser evaluado en su totalidad por un ordenador, incluso los 2 problemas secuenciales planteados mediante el enfoque clásico resultan también ser de tipo NP-Duro, por ello requiere técnicas adecuadas de tratamiento.
- Se ha alcanzado un nivel de optimización muy elevado con diferentes estrategias de solución (ver “2.2. Modelos de Solución – Esquema Clásico”), debido a ello los estudios recientes se enfocan a incluir en el problema la mejora de la estabilidad / calidad de vida de la tripulación, que a su vez influirá en la satisfacción del pasajero / cliente y por tanto de mayores beneficios para la aerolínea.
- El esquema secuencial tiene deficiencias y estudios recientes se centran en su re-ingeniería (ver “2.3. Modelos de Solución – Esquema Integrado”).
- El esquema integrado está aún en su etapa inicial de I+D.

4.3. ESTRATEGIA DE LA SOLUCIÓN

De acuerdo a los problemas y necesidades actuales del PPT antes comentadas, y las siguientes hipótesis, definidas y analizadas en “3.6. Definición de Hipótesis y Variables”:

- **Hipótesis de Trabajo:** “El problema se puede sub-dividir en problemas pseudo-independientes y ello posibilita obtener soluciones parciales del mismo”.
- **Hipótesis Conceptual:** “La aplicación adecuada de una búsqueda exhaustiva obtendrá una buena solución al problema”.

Se verifica de una parte que el problema se puede tratar por partes pseudo-independientes reduciendo los problemas de volumen combinatorial propios del PPT, a su vez no resultaría necesario su tratamiento secuencial pudiéndose aplicar el enfoque de solución integrada.

De otra parte para encontrar la solución de cada sub-parte del problema dividido, resulta factible la aplicación de diferentes estrategias de solución (tal como las descritas en “2.2. Modelos de Solución”), en nuestro caso aplicaremos una “búsqueda exhaustiva” adecuada –con restricciones-, para encontrar la solución óptima de cada sub-problema.

La composición adecuada de soluciones parciales derivará en la obtención de la solución del PPT global.

Nota.- El PPT global debe dividirse en partes independientes del mayor tamaño posible que permitan los recursos y tiempo de proceso de un ordenador.

4.4. MODELAMIENTO DEL PROBLEMA

De acuerdo a la solución planteada se muestra a continuación el modelo conceptual del problema de asignación de la tripulación.

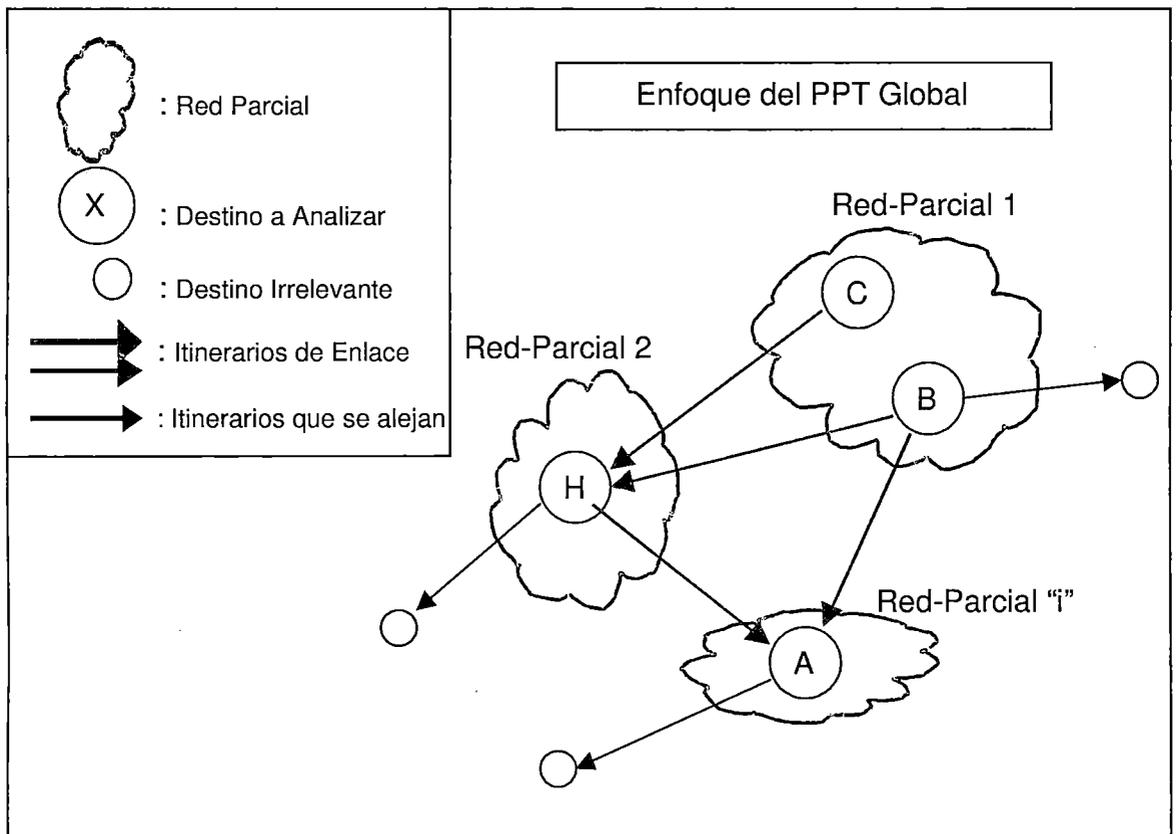


Figura 4-2. Enfoque General del PPT Global

En el gráfico anterior se observan diferentes elementos a considerar para el tratamiento del PPT.

- **Destinos a Analizar.** Denotados aquí como: A, B, C y H; corresponden a los destinos de vuelo, los cuales en el tiempo conforman parte de una sub-división del PPT Global a la que llamaremos "Red Parcial".
- **Redes Parciales.** Son las partes pseudo-independientes en las que

se divide el PPT Global, las cuales están conformadas por itinerarios de vuelo altamente relacionados (consecutivos y/o de alguna forma dependientes), así como también por el personal ubicado en los destinos de la Red Parcial. Sus nodos son los destinos origen / llegada de los vuelos que la conforman.

- **Itinerarios que se alejan.** Son aquellos que no son considerados como parte de una Red Parcial pero inician o terminan en ella; estos itinerarios no son optimizados al solucionar la Red Parcial.
- **Itinerarios de Enlace.** Son los itinerarios que sirven de enlace entre las Redes Parciales, no son optimizados ni en su Red Parcial inicial (la que contiene el destino origen) ni en la final (la que contiene el destino de llegada). Estos itinerarios deberán ser optimizados al realizar la composición de soluciones parciales, al construir la solución del PPT Global.

El PPT Global será dividido en Redes Parciales las cuales contendrán itinerarios de vuelo altamente relacionados, conformando subdivisiones pseudo-independientes del problema general, lo cuál permitirá que cada Red Parcial sea resuelta de forma independiente. Finalmente las soluciones parciales que se vayan encontrando se irán sumando adecuadamente –optimizando los itinerarios de Enlace-, construyéndose así una solución óptima del PPT Global.

4.5. DESARROLLO DEL MÉTODO DE ASIGNACIÓN

Se detallan a continuación los diferentes aspectos del Método de solución óptima planteado, con las diversas consideraciones que se tienen en cuenta en cada paso del método desarrollado.

A nivel general se plantea dividir el problema global en sub-problemas pseudo-independientes a los que llamamos sub-redes o redes parciales, estas partes más reducidas del problema al ser pseudo-independientes permiten ser solucionadas por separado, obedeciendo todos los requisitos de la solución buscada, y considerando las restricciones del problema (ver "3.3.2. Restricciones y Consideraciones"). La solución final se consigue mediante composición de las soluciones parciales que se vayan obteniendo.

Se describen a continuación las diferentes fases del método de solución propuesto.

4.5.1. Descomposición del PPT Global en Redes Parciales

Como se ha comentado con anterioridad el problema puede dividirse en Sub-problemas pseudo-independientes y la solución de c/Sub-problema o Red Parcial conllevará a la solución del problema planteado; para la descomposición adecuada del problema global, se requiere generar sub-redes de forma tal que conformen unidades independientes del PPT global, debiendo para ello cumplir con la siguiente característica:

“Los nodos / destinos que contenga una Red Parcial deben estar enlazados por vuelos dependientes entre sí, para asegurar que las decisiones de asignación que se tomen sean las más convenientes para todos los elementos de la Red Parcial”.

No tiene sentido optimizar una Red con nodos independientes pues no permiten evaluar el efecto de una decisión de asignación puesto que son independientes, no sería posible evaluar en que medida una decisión afecta a otros vuelos.

Planteamos como ejemplo el caso de la Fig. 4-3, donde se tiene una Red de Itinerarios de Vuelos que conectan diferentes nodos origen y destino (ciudades) en instantes de tiempo de salida "Ti" (p.ej.: Vuelo AB-T0 Roma-Bologña con salida en T0).



Figura 4-3. Enfoque de Redes del PPT Global

4.5.1.1. Descomposición por Vuelos Dependientes

En este caso elegimos el vuelo más próximo en salir como punto inicial y final de la Red Parcial y tomamos en cuenta el siguiente vuelo del itinerario del vuelo elegido para evidenciar la dependencia de vuelos existente.

Definimos la amplitud de la Red Parcial en base a los vuelos que contiene, los cuales son:

- El vuelo más próximo en salir elegido al que denominamos “vuelo principal” (en nuestro caso AB-T0, vuelo AB con salida a las T0).
- El vuelo siguiente al vuelo principal al que denominamos “vuelo objetivo” (BN-T8, vuelo BN con salida a las T8).
- Todos aquellos vuelos que tienen dependencia con el vuelo principal y que afectarían al vuelo objetivo (vuelo siguiente al “vuelo principal”).

El vuelo siguiente al “vuelo principal” es un vuelo que se aleja de la red, sin embargo es el vuelo siguiente al vuelo principal y forma parte de la “columna vertebral” de la red (“vuelos backbone”), por ello si se optimiza en la Red Parcial. Se le requiere para evidenciar la dependencia de vuelos existente.

Según la Fig. 4-3 y partiendo del final para observar las dependencias, el vuelo BN-T8 tendrá asignados miembros de la tripulación que se encuentren en el destino B en el instante T8, dichos miembros son los que ya se encontraban en el destino B y los que han llegado en los vuelos AB-T0 (“vuelo principal”) y en CB-T4 y DB-T1. Adicionalmente CB-T4 tendrá asignados miembros de la tripulación que se encuentran en el destino C en el instante T4, dichos miembros son los que ya se

encontraban en el destino C y los que han llegado en los vuelos FC-T1 y GC-T2.

Otras consideraciones a tener en cuenta son que los vuelos dependientes encontrados continúan sus itinerarios en el tiempo y sus próximos destinos de llegada pueden no tener dependencia relevante con el "vuelo principal" y no afectar a su vuelo siguiente. En nuestro caso vemos que los vuelos que se alejan de la red Parcial serían: CH-T3 (continuación de GC-T2), BH-T4 (continuación de DB-T1) y BA-T7 (continuación de CB-T4).

En base a lo anterior nuestra Red Parcial contendría los vuelos dependientes de la Fig. 4-4, en la cual se incluye el "vuelo objetivo" BN-T8 (vuelo siguiente al "vuelo principal") para mostrar las dependencias.

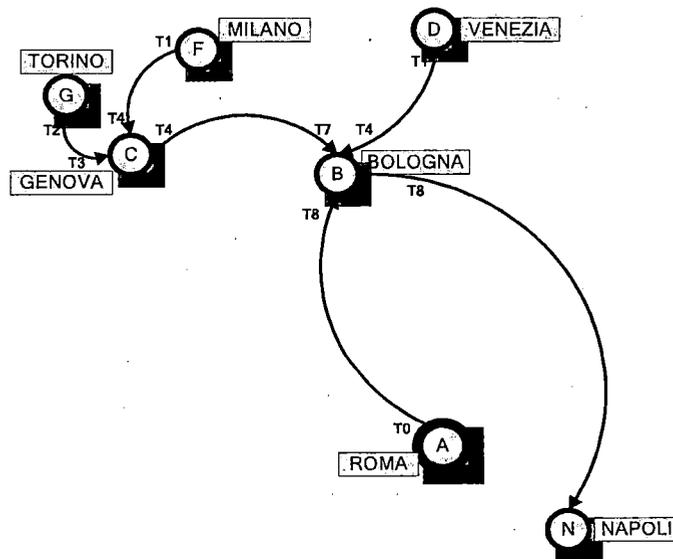


Figura 4-4. Vuelos por Dependencia

Alternativa - Descomposición por Intervalos de Tiempo

Otra forma de descomponer el PPT general sería considerando intervalos de tiempo consecutivos, pero no se considera una opción conveniente según se explica a continuación.

Si en el ejemplo planteado se fijara la amplitud de la Red Parcial en base a un intervalo de tiempo, podría elegirse por ejemplo definirla con todos aquellos vuelos comprendidos entre los intervalos T1 y T4, con lo cual se tendría lo siguiente.

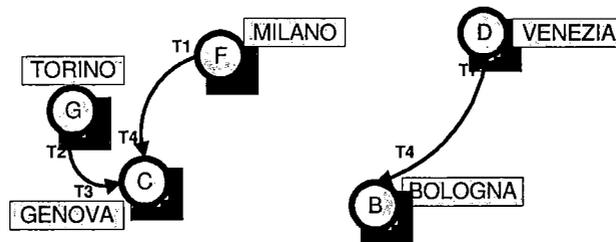


Figura 4-5. Vuelos por Intervalos de Tiempo

Como se puede apreciar los vuelos DB-T1 y FC-T1 están aislados y son independientes pues la tripulación que se asigne a los vuelos no coincidirá ni en los nodos origen (D y F) ni en los nodos de llegada (B y C).

Por otro lado los vuelos FC-T1 y GC-T2 comparten el mismo nodo de llegada (C), no obstante la amplitud de la Red Parcial está delimitada por el instante de tiempo T4 y aunque los vuelos coincidan es irrelevante para el análisis de la Red Parcial definida.

En intervalos de periodos cortos de tiempo se aprecian deficiencias al establecer la red Parcial pues puede ocurrir que los vuelos comprendidos en el intervalo sean independientes entre sí y no se podría evaluar si la

solución obtenida es óptima, pues las decisiones de asignación sobre un vuelo no afectan a los demás.

Una solución sería elegir un intervalo grande de tiempo pero aún así siempre es probable tener vuelos aislados, es decir que se tendrían vuelos con alta dependencia entre sí, y algunos vuelos que no tuvieran relación alguna con el resto.

Estrategia elegida - Descomposición por Vuelos Dependientes

De las 2 estrategias antes comentadas para generar las Redes Parciales, se ha elegido la correspondiente a la "División por Vuelos Dependientes", por lo siguiente:

- Permite definir Redes Parciales con intervalos cortos de tiempo (horas).
- La Red Parcial obtenida es muy representativa del PPT Global pues conserva todas sus características de dependencias entre vuelos.
- Construye una unidad pseudo-independiente del problema general, pues los vuelos que la conforman están altamente relacionados, y los vuelos excluidos no son relevantes para solucionar el sub-problema definido.

4.5.2. Solución de las Redes Parciales

Como se ha comentado, la solución óptima de cada Red Parcial generada, se encontrará mediante una búsqueda de las posibles asignaciones que tendrían lugar en la Red Parcial, no obstante la solución no está restringida a la utilización de modelos basados en algoritmos de búsquedas y puede

100

aplicarse cualquier modelo de solución, tal como los descritos en la sección "2.2. Modelos de Solución – Esquema Clásico".

El método desarrollado proporciona la estrategia para descomponer el problema del PPT global en sub-problemas más reducidos y pseudo-independientes, permitiéndose así el tratamiento de cada parte en que se ha descompuesto mediante esquemas de solución integrada, donde se apliquen estrategias de solución basados en diversos modelos (algoritmos de búsquedas, programación lineal y algoritmos genéticos entre otros). Adicionalmente debido a que los sub-problemas a los que denominamos redes parciales son pseudo-independientes la solución al problema se obtiene mediante la composición de las soluciones parciales que se obtienen de las redes parciales generadas.

Debido a lo anterior, al ser este paso del método de libre elección en cuanto a la estrategia de solución de cada red parcial del problema descompuesto, no se define aquí una estrategia fija de solución para las redes parciales, sino más bien las consideraciones a tener en cuenta en los procesos de selección de tripulación para los vuelos del problema planteado.

Se describe a continuación las consideraciones necesarias, a nivel general, para la asignación de tripulación a un determinado vuelo del programa de vuelos a tratar, en el marco del proceso de solución de las Redes Parciales.

4.5.2.1. Consideraciones a tener en cuenta para la Asignación

¿Por qué asignar un miembro a la tripulación de un vuelo?:

- Para cubrir el vuelo actual o un vuelo posterior del mismo itinerario. Itinerarios de largo recorrido (internacionales) requieren tripulación reforzada o doble tripulación para que se haga cargo de una ruta posterior al vuelo actual.

- Para volver a la Base. Si el vuelo regresa a la base, tienen preferencia de asignación aquellos tripulantes con más días de permanencia fuera de la base (generalmente en destinos internacionales), pues deben regresar tan pronto como sea posible para minimizar costos de estadía y viáticos.
- Para cubrir un vuelo de otro itinerario. Si el itinerario del vuelo en análisis coincide en el tiempo con otro itinerario al que se requiere asignar a un tripulante (preferencia solicitada), entonces el tripulante debería ser asignado al vuelo actual. La misma consideración se tendría si el vuelo actual permite al tripulante alcanzar un destino más próximo al itinerario que se requiere le sea asignado posteriormente (*traslado aéreo*).
- Para llevarle a un destino al que ha pedido llegar en una fecha. En este caso se trata de Preferencias de vuelos solicitadas por los tripulantes, como puede ocurrir para dar inicio sus vacaciones.

¿Por qué no asignar un miembro a la tripulación de un vuelo?

- Por un *traslado aéreo* posterior. El tripulante está a la espera de un vuelo posterior para ser trasladado a otro destino donde será asignado para cubrir un vuelo.
- Sólo le alejaríamos más de la Base. Si el vuelo le aleja más de la Base y el tripulante ya ha permanecido algunos días fuera de ella, no es conveniente asignar el vuelo, a menos que pueda cubrirlo en su totalidad y volver a la base.

4.5.2.2. Selección de Miembro de la Tripulación a Evaluar

Aunque se plantea realizar una Búsqueda Exhaustiva, es necesario restringir adecuadamente el espacio de soluciones.

En el caso del personal que se asignaría como miembro de la tripulación a un determinado vuelo, es recomendable realizar una ordenación del personal que se encuentra en un Nodo / Destino evaluado, en base a criterios que establezcan al personal más idóneo para la asignación, y realizar el análisis únicamente con algunos elementos de la lista. Particularmente resultará conveniente cuando el Nodo / Destino sea la Base Origen de la aerolínea, pues en este caso se tendrán muchos candidatos factibles de asignar y el espacio de soluciones sería inmanejable.

Criterios a considerar en la ordenación:

- **Tipo de Avión que cubre el vuelo:** los miembros de la tripulación sólo tienen licencia para determinados tipos de avión.
- **Rango del miembro de la tripulación que se requiere:** Capitán, Copiloto, Supervisor, etc.
- **Número de Horas del vuelo:** Para seleccionar únicamente al personal que podría cubrirlas, pudiendo ser que algunos ya hayan completado su jornada de trabajo.
- **El Destino de Llegada es el de un vuelo preferente** de algún miembro de la tripulación.
- **El vuelo es un vuelo no-preferente** para algún miembro de la tripulación: las repatriaciones se consideran en ocasiones como vuelos riesgosos y sólo se asigna personal con gran experiencia.
- **Miembros de la Tripulación incompatibles:** puede que algunos miembros de la tripulación ya asignados tengan alguna incompatibilidad con algún otro tripulante, en cuyo caso se prefiere no asignar miembros de la tripulación incompatibles.

Como se ha comentado la ordenación de los posibles miembros de la tripulación reducirá el ámbito de la búsqueda planteada.

4.5.3. Amplitud / Alcance de las Redes Parciales

Es necesario delimitar el alcance de una Red Parcial a nivel conceptual pues en realidad depende del ordenador que se utilice para su solución, se tratará en la construcción, la amplitud de la red Parcial debe ser la adecuada teniendo en cuenta lo siguiente:

- Mientras más nodos dependientes contenga la Red Parcial se acercará más al óptimo la solución obtenida.
- A mayor número de nodos mayor volumen combinatorial de decisiones que se requiere evaluar.
- El número de decisiones de asignación a tener en cuenta en c/Nodo.
- La cantidad de miembros de la tripulación en cada Nodo de la red, sobre los cuales se evalúan las decisiones de asignación definidas.

En aerolíneas de vuelos a baja escala es probable que la división del PPT Global en redes parciales por vuelos dependientes genere sub-redes de uno o muy pocos vuelos, no siendo óptima la solución global obtenida pues las redes parciales no serían representativas del problema general (ver figura siguiente).

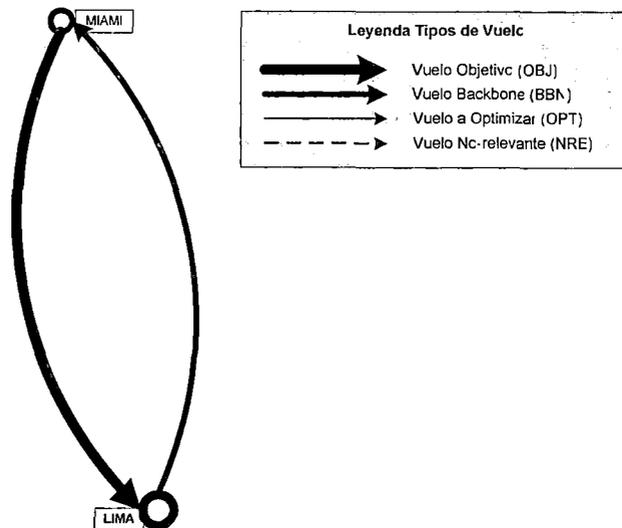


Figura 4-6. Gráfico de Red de 1 o muy pocos vuelos

En la figura anterior se muestra una red con únicamente 2 vuelos, la cual se ha generado siguiendo los criterios de descomposición del PPT Global, esto se debe a que la amplitud de la red es pequeña y no hay vuelos que afecten el itinerario Lima-Miami-Lima, es decir que no hay más vuelos dependientes.

Dado que una red con tan pocos vuelos dependientes no es representativa del problema global, no resulta óptimo solucionar redes con esta característica, en este caso se amplifica el alcance de la red, incluyendo en la misma el vuelo siguiente al vuelo Objetivo (vuelo Miami-Lima en la figura anterior).

Para solucionar esta situación y generar redes parciales de un tamaño adecuado debe repetirse el procedimiento de división por vuelos dependientes concatenando las sub-redes que se vayan obteniendo, hasta que la red parcial generada contenga una cantidad relevante de vuelos altamente dependientes entre sí, y representativos del problema global (ver figura siguiente).

A la red anteriormente mostrada se le incorpora el vuelo siguiente a su vuelo objetivo (OBJ), el nuevo vuelo objetivo es el Lima-Arequipa y el vuelo objetivo anterior pasa a ser un vuelo de la “columna vertebral” de la red o vuelo backbone, quedando la nueva red como se muestra en la figura siguiente.

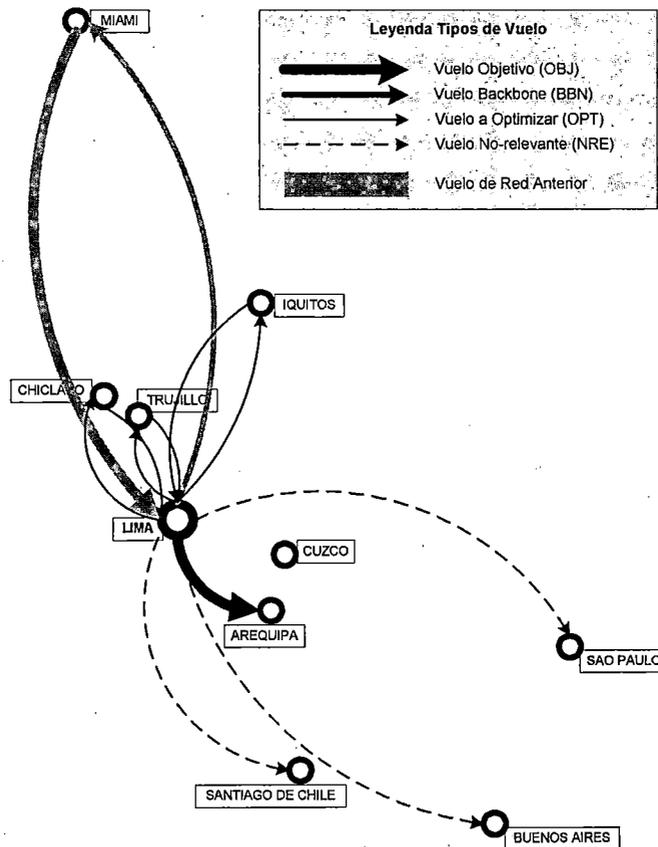


Figura 4-7. Ampliación del Alcance de una Red Parcial

En la figura anterior se observa que al ampliarse el alcance de la red se tienen ahora nuevos vuelos incorporados a la misma, tal como los itinerarios de vuelos Lima-Chiclayo-Lima, Lima-Trujillo-Lima y Lima-Iquitos-Lima, estos vuelos tienen relación con los vuelos de la “columna vertebral” de la red en el destino “Lima” (en este caso en la base), pues se acercan al destino Lima antes de la salida del vuelo objetivo (Lima-Arequipa), adicionalmente se

observa también vuelos que se alejan de la red tales como: Lima- Santiago de Chile, Lima-Buenos Aires y Lima-Sao Paulo; estos vuelos son los denominados vuelos no-relevantes (NRE) pues se alejan de la red parcial y serán optimizados en redes posteriores en las que sean considerados como vuelos de la "columna vertebral" (vuelos backbone y objetivo) o vuelos a optimizar.

Los vuelos NRE no son objetivos de optimización en la red parcial actual, no obstante puede considerarse una asignación básica de tripulación, sujeta a modificación cuando sean optimizados en redes posteriores en las que si sean considerados objetivos de optimización (vuelos objetivo, backbone y a optimizar).

Siguiendo el procedimiento de incorporar el vuelo siguiente al vuelo objetivo de una red parcial que se está generando, se puede ampliar su alcance hasta que se considere que tiene una cantidad adecuada de vuelos altamente dependientes, pudiendo obtenerse por ejemplo la red que se muestra en la figura siguiente.

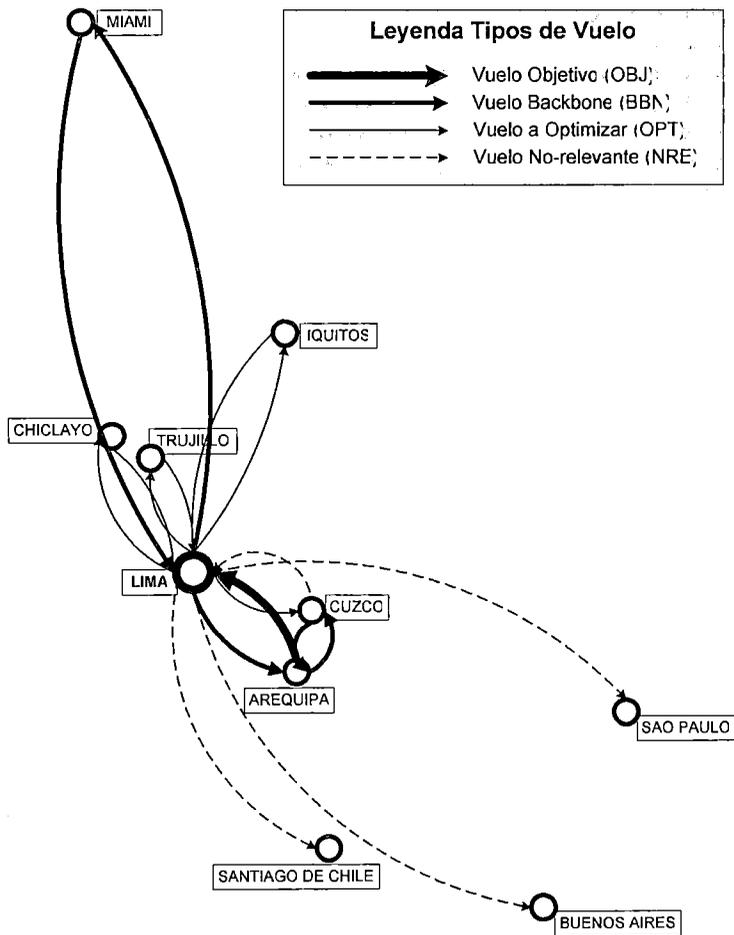


Figura 4-8. Ampliación de alcance de Red Parcial por concatenación de Redes

4.5.3.1. Análisis Combinatorial

En este punto el volumen combinatorial (VC) sería como sigue:

$$VC = (DA * MT)^{ND}$$

Donde:

VC: Volumen Combinatorial

DA: Decisiones de Asignación a considerar en c/Nodo

MT: Promedio de Miembros de la Tripulación en c/Nodo evaluado

ND: Nodos / Destinos de la Red Parcial

Se observa que el volumen combinatorial tiene una función exponencial, por ello dependiendo del modelo elegido para solucionar cada red parcial, la amplitud de cada red parcial puede variar dependiendo del modelo elegido, el tiempo de proceso permitido y de los recursos de Hw y Sw que se dispongan.

4.5.4. Construcción de la Solución Global

La solución de cada red parcial pseudos-independiente, representativa del problema global, viene a ser una solución a una parte del problema, es decir una solución parcial, y siendo que las sub-redes son pseudos-independientes la sumatoria de soluciones parciales converge finalmente en la solución del problema global inicia, según se muestra en la Figura 4-9.

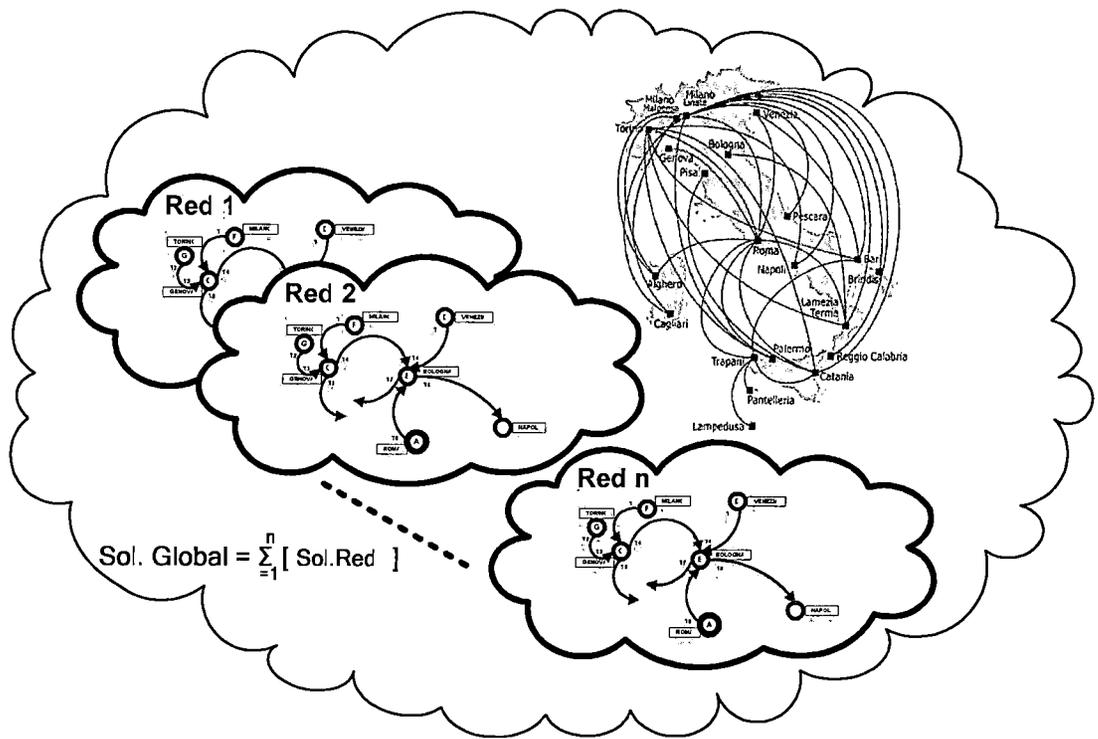


Figura 4-9. Solución Global por sumatoria de Soluciones Parciales

4.5.5. Especificación de Pasos del Método Propuesto

El método de solución expuesto tiene como estrategia principal la descomposición del PPT global en sub-problemas de análogas características pero de menor envergadura, realizando para ello un proceso de generación de sub-redes pseudo-independientes -a partir de la red global inicial- a las que llamamos redes parciales, las cuales cubren todos los vuelos del problema inicial.

Estas redes parciales más factibles de resolver son posteriormente resueltas de forma óptima obteniéndose soluciones parciales del problema planteado inicialmente. La unificación de dichas soluciones converge finalmente en la solución óptima del problema inicial.

A nivel general los pasos del método de solución son los mostrados en el Diagrama de la Figura 4-10.

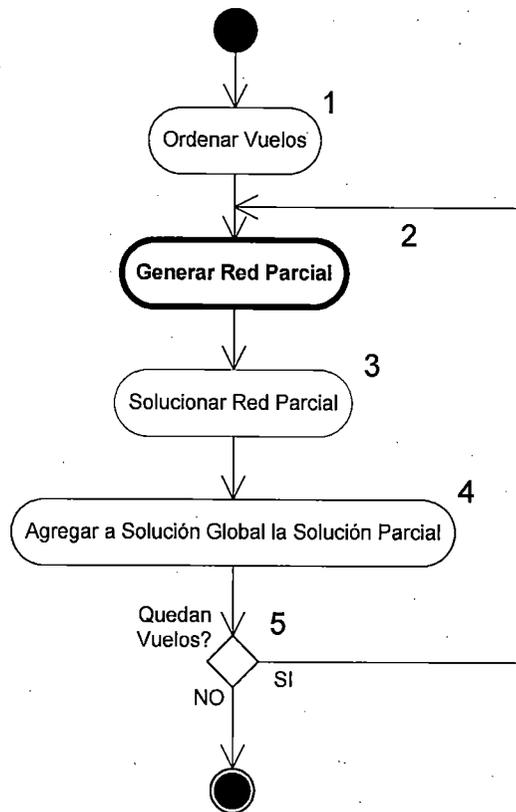


Figura 4-10. Diagrama de Actividad del Método propuesto

- 1 Ordenar los Itinerarios de vuelos en orden cronológico.
- 2 Descomposición de la red global de vuelos programados en sub-redes con vuelos dependientes.
 - a. Generar red parcial.
 - i. Obtener el vuelo más próximo en salir al cual denominamos vuelo principal o vuelo objetivo.
 - ii. Obtener los vuelos que llegan al destino final del vuelo principal, previamente a su salida de dicho destino – continuación del itinerario del vuelo principal. A los

vuelos encontrados los denominamos vuelo a optimizar, estos vuelos son los proveedores de personal de vuelo, pues llegan antes de la salida del vuelo principal y traen personal de vuelo que podría utilizarse.

- iii. Obtener los vuelos que parten del destino final del vuelo principal antes de la salida del vuelo principal de dicho destino, para continuar con su itinerario. A estos vuelos los denominamos vuelos no relevantes pues salen de la red parcial que se está generando y no conforman el grupo de vuelos a optimizar en la red actual.
 - iv. Validar tamaño de la sub-red generada.. Si la generada contiene muy pocos vuelos repetir los pasos de generación ii, iii y iv, tomando como vuelo principal el vuelo siguiente del itinerario del vuelo principal, ahora este vuelo es el nuevo vuelo principal. Repetir pasos ii, iii y iv.
 - b. Repetir el punto "a", hasta cubrir con las redes parciales todos los vuelos programados, según el problema global inicial.
- 3 Solucionar cada red parcial obtenida según el orden en que fueron generadas. Siendo cada red un sub-problema reducido del problema global inicial, muchos modelos de solución podrían ser aplicados (programación lineal, algoritmos genéticos, búsqueda tabú, etc.).
 - 4 Construir la solución al problema global inicial mediante la composición de las diferentes soluciones parciales que se han obtenido.

Los pasos "Generar Red Parcial" y "Solucionar Red Parcial" son especificados a continuación.

4.5.5.1. Generar Red Parcial

Este es el paso principal del método de asignación por descomposición en redes parciales, este paso tiene como objetivo encontrar un grupo de vuelos altamente dependientes entre sí, de forma tal que sean representativos del problema general planteado. Adicionalmente se tiene en cuenta también que las redes parciales obtenidas tengan no solo vuelos con características antes citadas, sino también una amplitud adecuada, pues no será óptimo solucionar redes parciales que contengan una cantidad de vuelos pequeña, pero a su vez el tamaño de la red puede estar limitado por el modelo utilizado para solucionar cada red parcial, el tiempo de proceso y por los recursos Hw y Sw que se dispongan (ver sección “4.5.3.1. Análisis Combinatorial”).

En “Figura 4.11. Diagrama del Proceso Generar red Parcial” se muestra los pasos correspondientes al proceso de generación de una red parcial, como se puede observar se tienen 4 tipos de vuelo que componen una red parcial:

- **Vuelo Objetivo (OBJ).** Vuelo objetivo de la red parcial, este vuelo es el que dirige y limita la amplitud de la red parcial.
- **Vuelo Backbone (BBN).** Vuelo objetivo de red anterior, estos vuelos juntamente con el vuelo objetivo conforman los vuelos de la “columna vertebral” de la red parcial.
- **Vuelo a Optimizar (OPT).** Vuelo relacionado con un vuelo de la “columna vertebral” (vuelos BBN y OBJ) de la red parcial, en sentido entrante hacia la red. La asignación de tripulación a este tipo de vuelos es optimizada en la red parcial.
- **Vuelo No-relevante (NRE).** Vuelo que se aleja de la red parcial, parte del mismo destino de salida de algún vuelo de la red parcial en sentido saliente de la red.

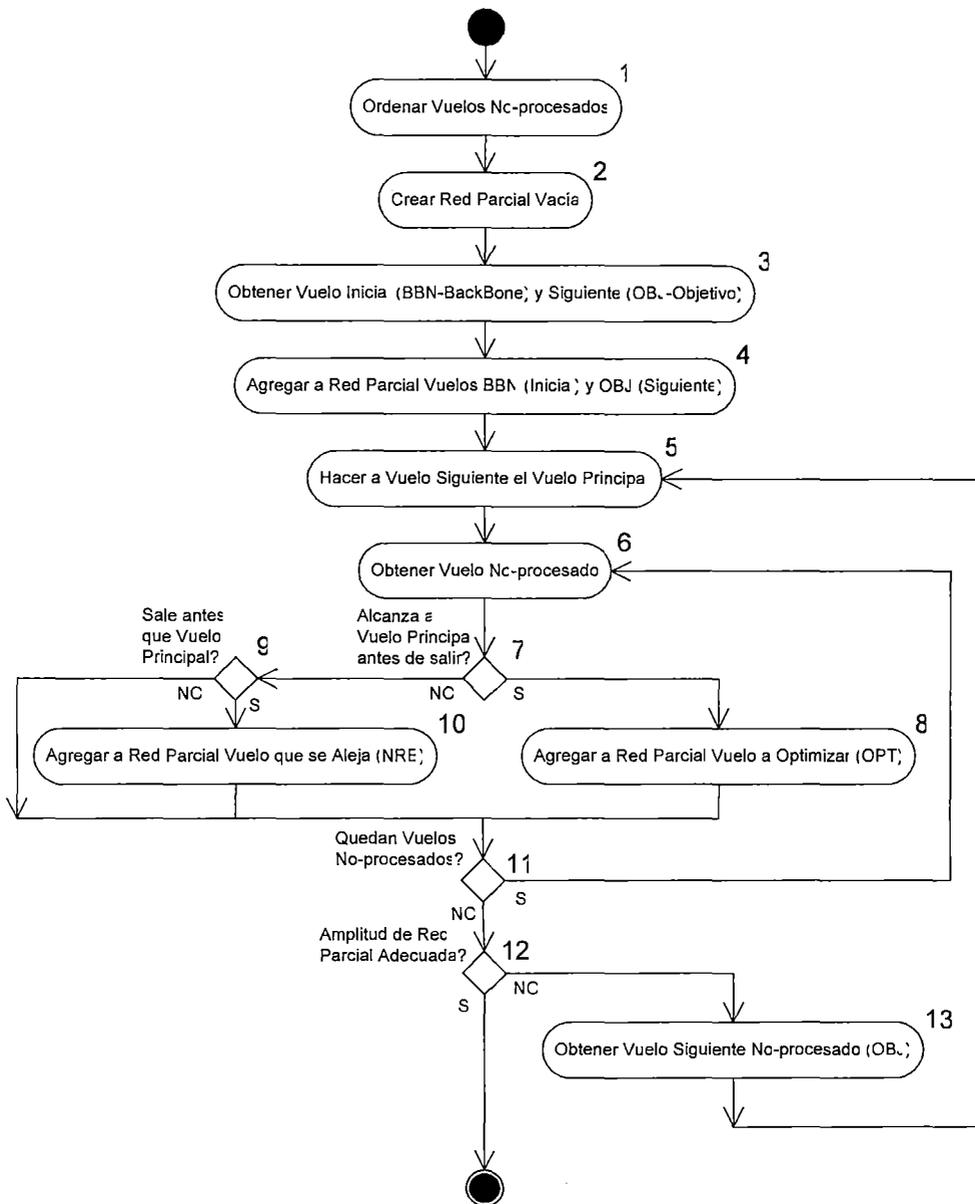


Figura 4-11. Diagrama del Proceso Generar Red Parcial

Como se puede apreciar el proceso termina cuando la Red Parcial ha alcanzado la amplitud definida, la cual debe establecerse de forma previa al proceso, definiendo p.ej. el mínimo número de vuelos que debe contener la red (ver sección “4.1.1. Amplitud / Alcance de las Redes Parciales”).

4.5.5.2. Solucionar Red Parcial

Como se ha comentado con anterioridad (ver sección "4.1.1. Solución de Red Parcial: Aplicación de Búsquedas"), este paso no está previamente definido y puede emplearse cualquier estrategia de solución.

A modo de ejemplo en la figura siguiente, se muestra la secuencia de pasos de solución de redes parciales basado en un modelo de búsqueda de soluciones. El modelo empleado posee memoria de las soluciones encontradas y de los tripulantes seleccionados en la solución de la red, de tal manera que cada vez que se busque una nueva solución de la red parcial se hará la búsqueda sin considerar a los tripulantes que ya han sido elegidos con anterioridad. Las soluciones que se van encontrando son evaluadas y comparadas con la mejor solución hallada hasta ese momento, en caso la solución encontrada sea mejor se toma como nueva solución y se utilizará en próximas comparaciones.

El proceso termina cuando no quedan tripulantes que no se hayan incluido en las soluciones encontradas para la red parcial, es decir que se ha recorrido el total de candidatos posibles para obtener la solución parcial en cada caso.

Adicionalmente el recuadro con líneas punteadas muestra las tareas relacionadas con el proceso de encontrar una solución de la red parcial, considerando tanto vuelos como reservas e indisposiciones de la tripulación. Este sub-proceso se repite asignando cada vez tripulantes no elegidos con anterioridad a los vuelos de la red.

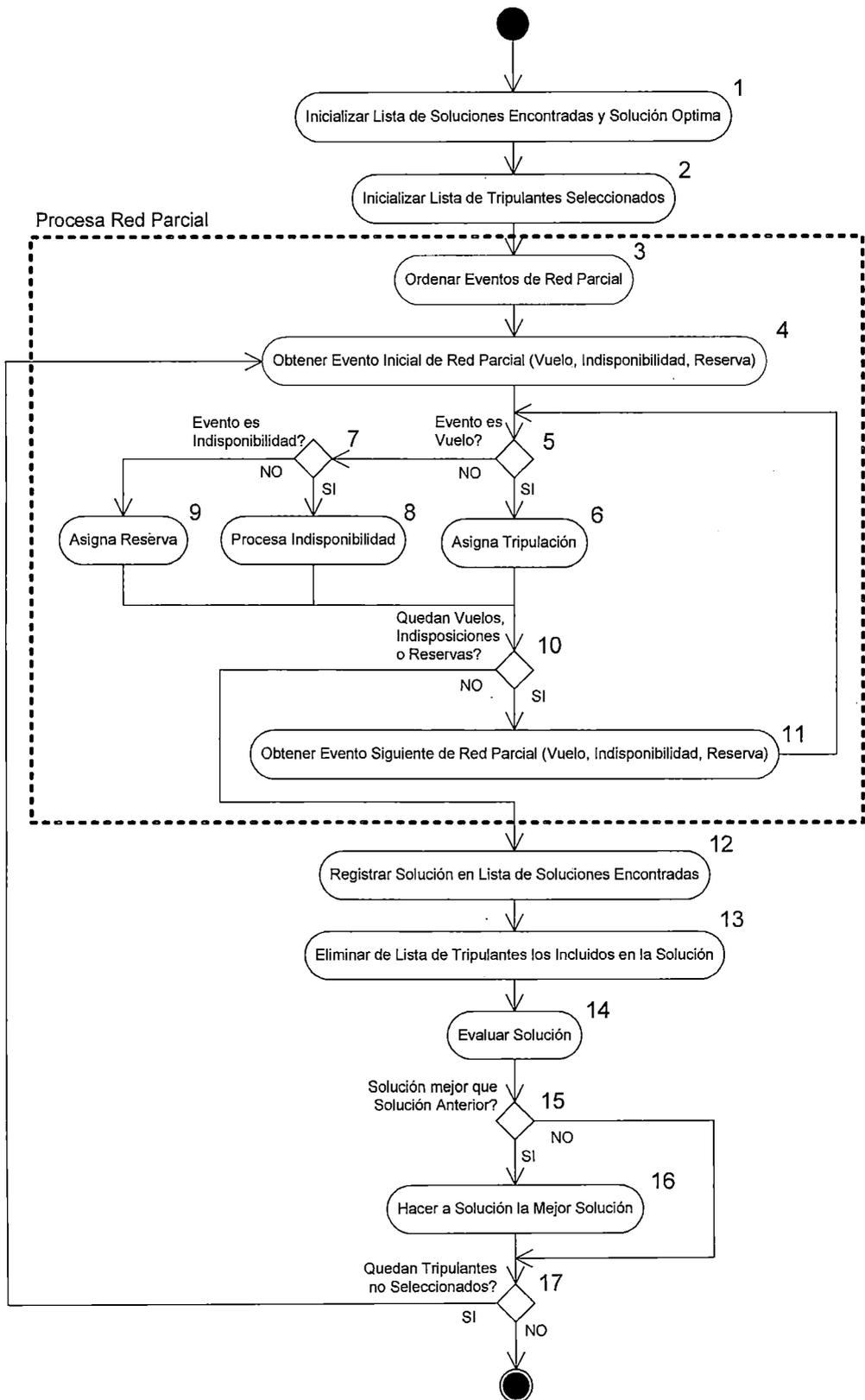


Figura 4-12. Diagrama del Proceso Solucionar Red Parcial

4.6. MODELO DE SOLUCIÓN BASADO EN EL MÉTODO PROPUESTO

Se diseña un modelo basado en el método de solución antes expuesto, el cual nos permita verificar la validez del método elaborado.

El modelo se divide en dos partes principales de acuerdo a la complejidad de los pasos del método definido (ver "4.1.1. Método de Asignación Propuesto"):

- Descomposición de la red global en sub-redes pseudo-independientes.
- Solución de cada red parcial obtenida.

4.6.1. Descomposición de la Red Global

Dado que para programas de vuelos de aerolíneas de baja escala, las redes generadas inicialmente podrían tener un tamaño menor al requerido, y en tal caso se deben repetir los pasos de generación de red parcial según indica el método de asignación propuesto (Paso 2.a, secciones i, ii y iii), se elaborará para esta fase un modelo basado en un algoritmo recursivo para la generación de las redes parciales.

El algoritmo completo de descomposición de la red global en redes parciales se muestra en las Figuras 4-13 (cuerpo principal) y 4-14 (proceso recursivo de generación de red parcial). La descomposición se realiza generando redes parciales.

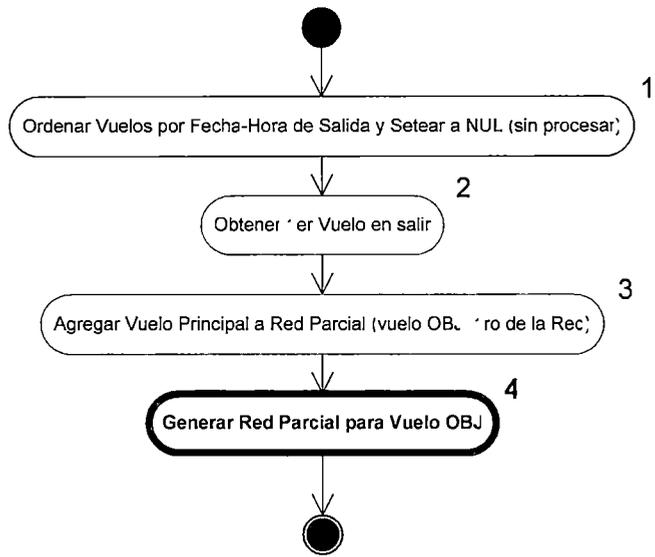


Figura 4-13. Diagrama de Flujo Principal del Algoritmo de Descomposición

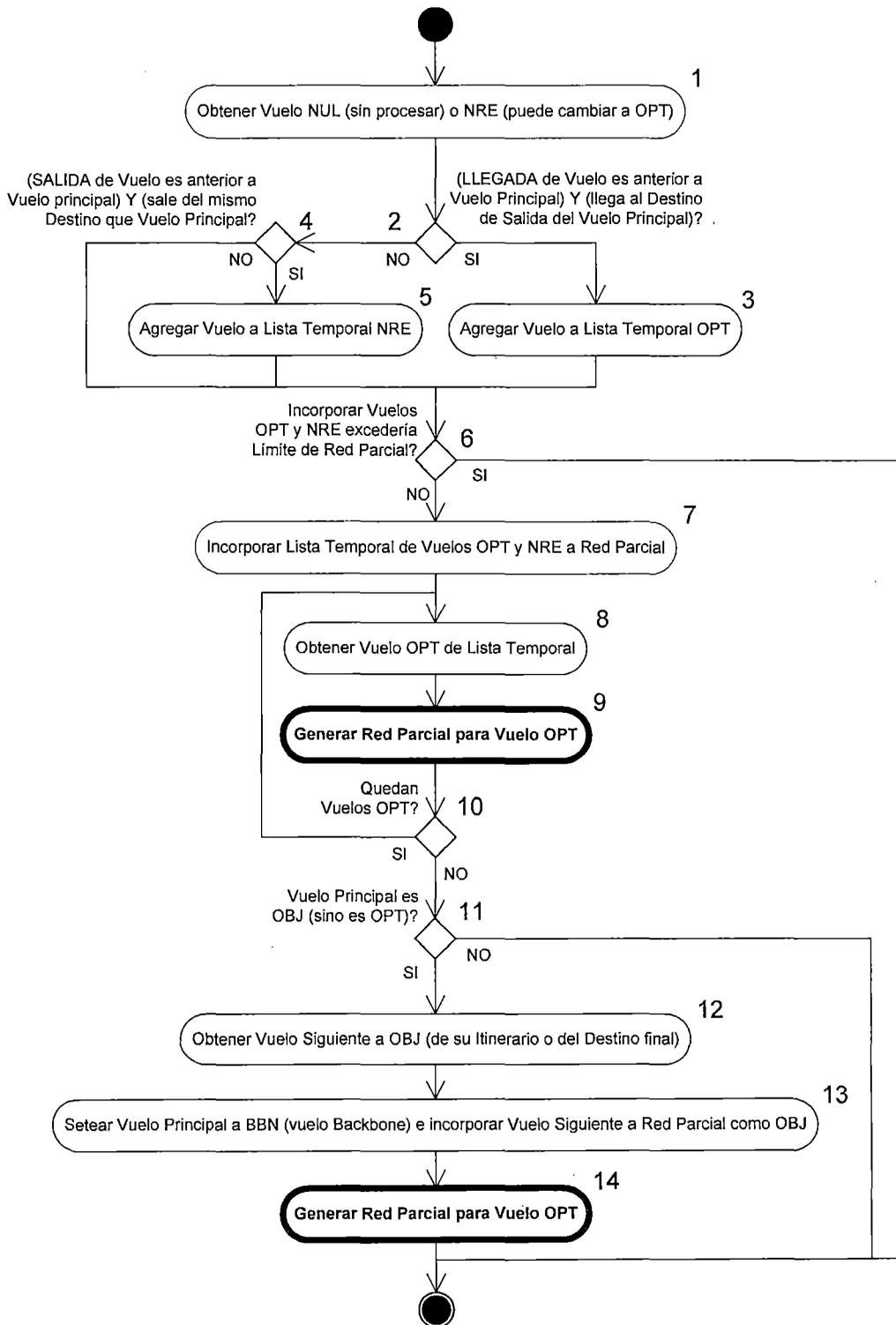


Figura 4-14. Diagrama de Flujo Recursivo del Algoritmo de Generar Red Parcial

4.6.2. Solución de una Red Parcial

En esta fase se tiene como entrada los vuelos que conforman la sub-red generada, los cuales tienen alta dependencia entre sí y son representativos del problema global, se requiere asignar tripulación a dichos vuelos, de acuerdo a las restricciones del problema (ver 3.3.2. Restricciones y Consideraciones) y cumpliendo con los requisitos señalados (ver 4.1 Análisis de Requisitos).

Para esta fase y a nivel general se plantea el algoritmo de la Figura 4-15. Como se puede apreciar, los pasos considerados se basan en la asignación óptima de los miembros del Crew requerido a cada vuelo de la red parcial, para ello los miembros del personal de vuelo de la aerolínea son seleccionados de acuerdo al vuelo que se está procesando (tipo de tripulante requerido según tipo de avión y función a cubrir, y destino de salida entre otras), y a las restricciones del problema (límite de horas de vuelo al día y mes, periodos de indisponibilidad por actividades pre-programadas del personal del vuelo), luego estos "candidatos" son seleccionados y almacenados en el conjunto "Solución" de la red parcial, siempre que conformen una solución por completar del problema o una solución mejor que la anterior encontrada (p.ej.: pueden existir incompatibilidades⁽¹⁾ entre los miembros de la tripulación y no sería una solución), en caso contrario se rechazan y no vuelven a ser seleccionados.

Finalmente las soluciones encontradas para cada vuelo de la red parcial derivan en la solución de la misma, la cual es evaluada según los requisitos de la solución buscada (ver sección 4.1. Análisis de los Requisitos), se repite el proceso de solución de la red parcial seleccionando personal de vuelo

¹ Incompatibilidades entre el personal de vuelo resultan especialmente importantes de considerar cuando ocurren en itinerarios de largo recorrido y a nivel del personal técnico (piloto y copiloto), generalmente son preestablecidas como datos iniciales (restricciones) del proceso de asignación de tripulación (informadas previamente al planificador).

antes no seleccionado y se evalúa la nueva solución, hasta alcanzar un número de iteraciones definido o recorrer el universo de soluciones factibles.

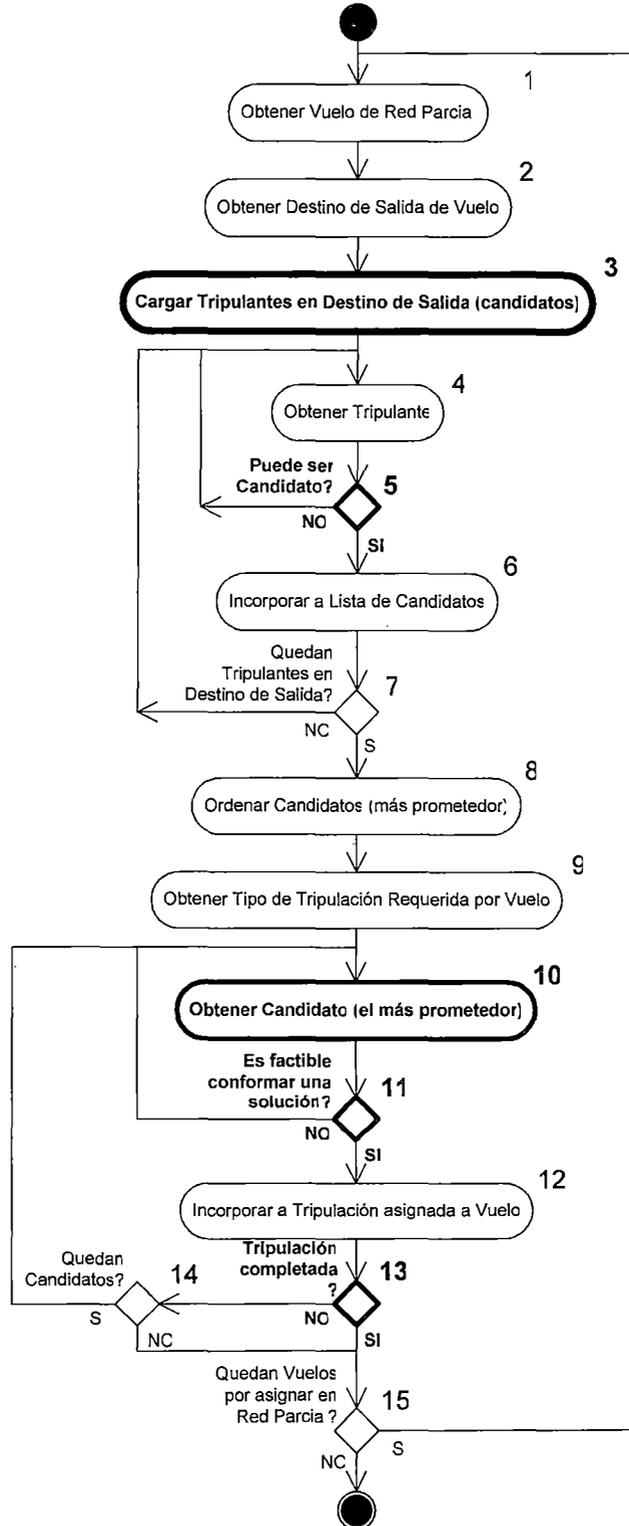


Figura 4-15. Diagrama de Flujo Procesar Red Parcial del Modelo de Solución

4.6.3. Diagrama de Proceso del Modelo de Solución

En la Figura 4-16 se muestra el diagrama de actividad completo del modelo que implementa el método de solución propuesto. Comentamos a continuación c/u de los pasos del diagrama.

Paso 1. Inicialización del controlador de estado actual de la red global y de red parcial (asignación de memoria dinámica e inicialización de variables de control).

Paso 2. Proceso de generación de una Red Parcial. Se realiza aquí la descomposición del problema global.

Paso 3. Si no hay vuelos en la red generada se ha terminado el proceso de asignación.

Paso 4. Se salva la solución global actual, antes de iniciar el proceso de la red parcial generada.

Paso 5. Inicialmente la lista de tripulantes seleccionados debe estar vacía. Adicionalmente para controlar la iteración y búsqueda de nueva soluciones, se identifica el destino con más tripulantes de la red y el primer vuelo que sale de dicho destino, dicho vuelo será el "vuelo de trabajo".

Paso 6. Proceso de asignación de tripulación a los vuelos de la Red Parcial, se realiza aquí la solución de la Red Parcial.

Paso 7. Se incorpora en la lista de tripulantes seleccionados los que forman parte de la nueva solución encontrada. En nuestro caso consideramos sólo a los tripulantes que han sido asignados al "vuelo de trabajo" obtenido en el "Paso 5."

Paso 8. Se obtienen los indicadores de calidad de la solución encontrada.

Paso 9-10-11. Si es la primera solución encontrada (1ra iteración) o si la solución encontrada es mejor que la anterior, se actualiza la solución actual de la Red Parcial.

Paso 12-13-14. Si aún quedan tripulantes no seleccionados se restaura el estado inicial previo al proceso de la Red Parcial y se vuelve a iterar pero con una lista de tripulantes menor pues se han marcado los ya seleccionados. Si ya no quedan tripulantes no-seleccionados se actualiza el estado de la red global con la mejor solución encontrada, y se continúa con la siguiente Red Parcial.

Paso 15. Al finalizar el proceso de todas las redes parciales se realiza la obtención de los indicadores de calidad de la solución global encontrada.

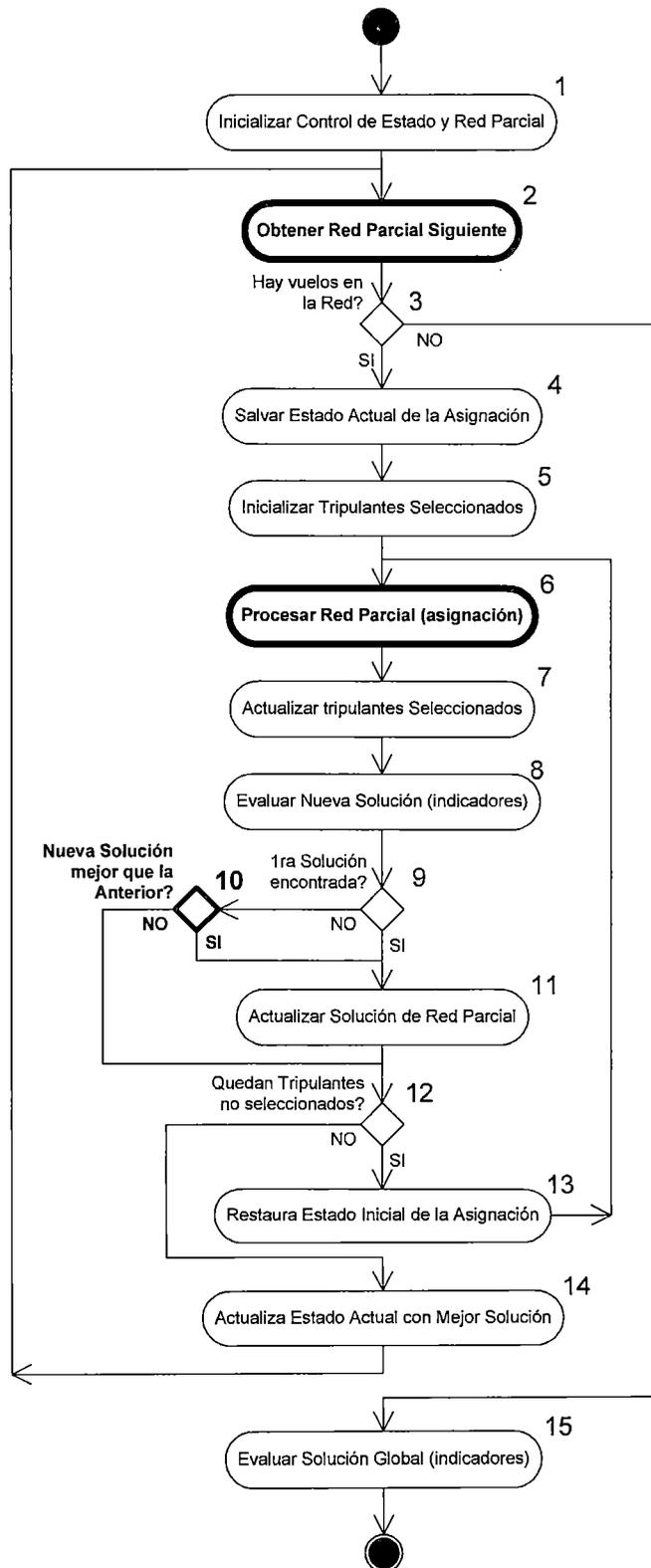


Figura 4-16. Diagrama de Flujo General del Modelo de Solución

CAPÍTULO V

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN

5.1. ESCENARIO DE PRUEBAS

Para la realización de las pruebas del método planteado se ha construido un programa que implementa el método de asignación de tripulación por descomposición en redes parciales, de acuerdo al modelo planteado (ver “4.6 Modelo de solución basado en el Método Propuesto”), basado en un algoritmo recursivo (para la generación de redes parciales) y un algoritmo voraz (para la asignación de tripulación). Al programa que implementa el método de asignación por redes parciales le denominamos Programa Método de Redes.

Adicionalmente se cuenta con una implementación del método experto humano (ver “2.1.1. Método Básico - Experto Humano”), este programa realiza una asignación conveniente de tripulantes basado en un algoritmo que sigue la estrategia vuelo-por-vuelo, procesando de forma iterativa los vuelos del periodo de programación según el orden de salida de los mismos, y asigna tripulación de acuerdo a una selección de los mejores candidatos, respetando las restricciones propias del problema de asignación de tripulación. Al programa que implementa el método de asignación vuelo por vuelo le denominamos Programa Experto Humano.

Se muestra a continuación el escenario de pruebas construido.

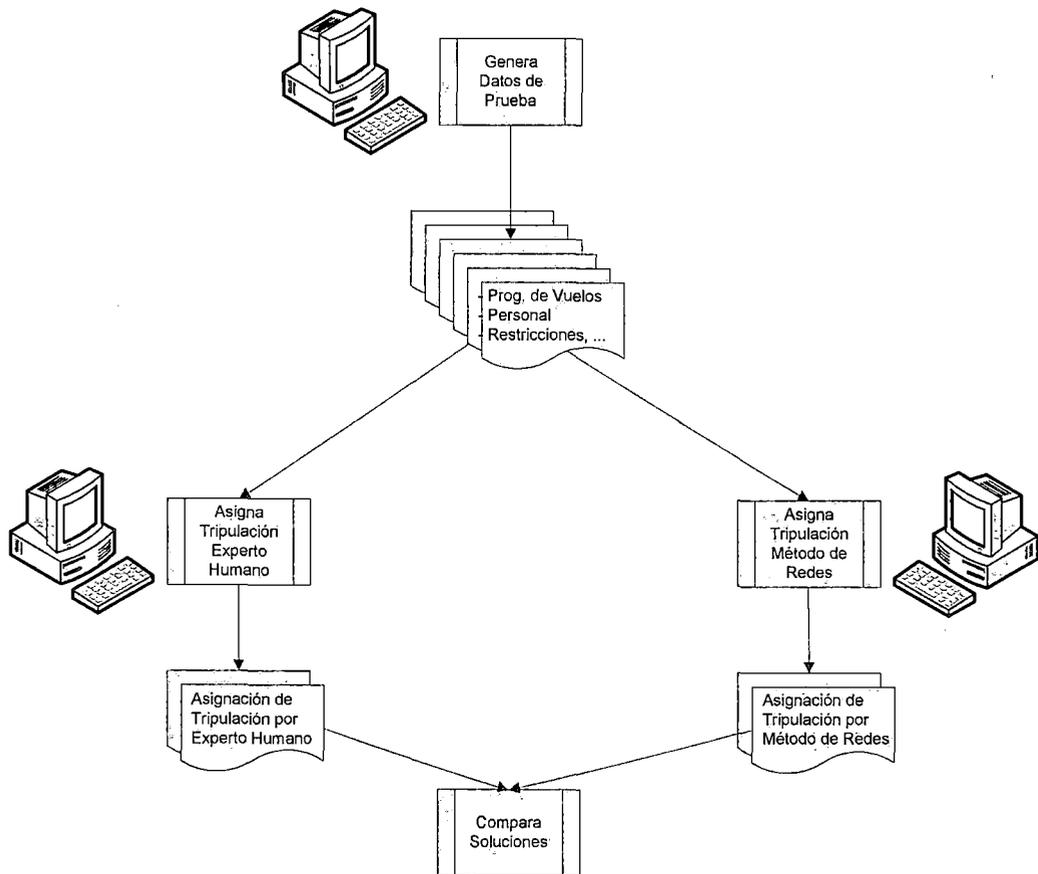


Figura 5-1. Gráfico del escenario de pruebas Método de Redes vs. Experto Humano

Como se puede apreciar los datos del problema (vuelos programados para el periodo de programación, datos del personal de vuelo, parámetros del problema tales como el periodo de programación, entre otros), son generados y almacenados en varios archivos, estos datos serán procesados tanto por el programa experto humano como por el programa método de redes, finalmente los resultados obtenidos serán procesados para obtener los indicadores de la solución obtenida por cada programa, estos datos serán posteriormente analizados para determinar las bondades de cada método.

5.2. PROGRAMA DE ASIGNACIÓN DE TRIPULACIÓN POR EL MÉTODO DE REDES PARCIALES

En esta sección se detallan las especificaciones del programa construido que implementa el método de asignación propuesto (ver “4.6. Modelo de solución basado en el Método Propuesto”), nos enfocamos principalmente en los siguientes procesos principales:

- Descomposición de la red global en sub-redes pseudo-independientes.
- Solución de cada red parcial obtenida.

Se describen los módulos que contiene el programa, así como también partes representativas del código para revisar en detalle la estructura del mismo.

5.2.1. Construcción del Programa Método de Redes Parciales

El programa se ha construido en lenguaje C y C++, utilizando el compilador de MS Visual C++ 6.0, y hace uso de librerías para leer archivos con formato de texto delimitado, tanto para leer los datos de entrada del proceso como para escribir los resultados de la asignación de tripulación. El formato de archivos de texto delimitado es un estándar y está soportado por la mayoría de aplicaciones y Bases de Datos, esto permite el intercambio de datos entre el programa método de redes y alguna otra aplicación que se encargue de gestionar los datos del problema como puede ser la aplicación que se encarga de la programación del rol de vuelos de la tripulación.

5.2.1.1. Cuerpo principal

Esquema de Ejecución del Programa Método de Redes

Como se aprecia en la Figura 5-1, el programa método de redes puede ser llamado por una aplicación principal la cual se encargue de la gestión del personal de vuelo, dicha aplicación gestionaría los datos del problema (rol de vuelos programados, personal de vuelo y datos de rango, ubicación y disponibilidad del personal de vuelo entre otros); en el momento que la aplicación requiere generar el programa de vuelos del personal de vuelo llamaría al programa método de redes pasándole como datos de entrada la información asociada al proceso en archivos de texto delimitado. Los de respuesta del programa método de redes se almacenarían también en archivos de texto delimitado siendo recogidos por la aplicación principal completando así el ciclo de ejecución del programa.

Código del Proceso Principal

Se muestran aquí las rutinas principales del programa método de redes implementado, el cual genera redes parciales (descomposición) con un sub-conjunto de vuelos del problema global, y realiza el proceso de cada red generada (asignación de tripulación), hasta procesar todos los vuelos del problema inicial.

La asignación de tripulación en cada red parcial se basa en un algoritmo voraz, se muestra aquí una versión resumida de las rutinas principales del programa método de redes. El código extendido de las rutinas principales del programa se encuentra en "Anexo A: Codificación del Programa".

Tabla 5-1. Codificación Resumida del Programa Asignación Método de Redes

```

metred_proc_redparcial()
{
  int n_redes=0,an_nod,n_itera,i_band_seguir; //Control de iteraciones y nodos de la red
  .
  .
  struct str_red_kpis saux_red_kpis; //KPIs de c/iteracion de la red parcial en proceso
  (auxiliar)

  log_run(INF_MSG,"metred_proc_redparcial","Programacion de Tripulacion y Reservas
- Inicio");
  log_run(INF_MSG,"metred_proc_redparcial","Para el Periodo [%ld-%04d]-[%ld-
%04d]",d_prp->f_ini,d_prp->h_ini,d_prp->f_fin,d_prp->h_fin);
  .
  .
  do {
    if (redparcial_next(s_mgrred) != GOOD) {
      log_run(CRI_MSG,"metred_proc_redparcial","Error al generar red parcial, error
[%d]",EXIT_ERROR);
      redparcial_done(s_mgrred);
      return(BAD);
    }
    if (s_mgrred.nvred>0) {
      .
      .
      n_redes++;

      //////////////////////////////////////
      //Proceso Principal de Red Parcial - Inicio //
      //////////////////////////////////////
      //Se salvan estado actual previo al inicio del proceso de la red parcial (valores de
tripulantes, localizacion, estado de la asignacion global)
      rp_salvar_estado_act(s_rp_bak_state);

      //Inicializa memoria de tripulantes seleccionados, debe descartar los ya utilizados!
      //Lista de datos del tipo: (vuelo-de-base, trip_asignado). Solo se exploran las

```

```

alternativas en la base
    //      (los demas destinos no tienen muchas posibilidades -podrian salvarse
adicionalmente los destinos con mas tripulantes-)
    rp_ini_trip_selec(s_rp_tri_ctrl,s_mgrred.s_redtree);
    .
    .
    n_itera=0;
    do {
        n_itera++;

        log_run(INF_MSG,"metred_proc_redparcial","Red      parcial      [%03d-%02d]
generada, nro. de vuelos [%d] (Tripulantes: %03d)",
            n_redes,n_itera,s_mgrred.nvred,nd_tri-s_rp_tri_ctrl.nrp_trisel);
        redparcial_tree_prnnodes("metred_proc_redparTREE",s_mgrred.s_redtree);
        .
        .
        if (proc_redparcial(s_mgrred.s_redtree,0,0,0,0,f_iresind,h_iresind) != GOOD) {
            return(BAD);
        }

        //Actualizar tripulantes seleccionados (c/iteracion descarta los ya utilizados
reduciendo el universo de tripulantes)
        rp_act_trip_selec(s_rp_tri_ctrl,s_rp_bak_state);

        //Evaluar solucion de red parcial - Funcion Objetivo
        rp_eval_redparcial(s_mgrred,saux_red_kpis,0);

        //Verificar si se ha encontrado una mejor solucion
        if          ((n_itera          ==          1)          ||
(rp_comp_sol(saux_red_kpis,s_rp_bak_state.s_rp_mejor_sol.s_red_kpis) > 0)) {
            //La 1ra vez siempre se salva la solucion encontrada!
            rp_act_sol_redparcial(s_rp_bak_state.s_rp_mejor_sol,saux_red_kpis);
        }

        i_band_seguir=0;
        if (rp_exist_trip_noselec(s_rp_tri_ctrl)) { //Aun quedan tripulantes sin
seleccionar!

```

```

        rp_restaura_estado_act(s_rp_bak_state); //Recupera datos iniciales, se
continua la busqueda
        i_band_seguir=1;
    }
}
while (i_band_seguir);

//Actualiza Red Parcial con Mejor Solucion encontrada y KPIs
rp_set_sol_redparcial(s_rp_bak_state.s_rp_mejor_sol,saux_red_kpis);
show_destri();
////////////////////////////////////
//Proceso Principal de Red Parcial - Fin //
////////////////////////////////////

}
}
while (s_mgrred.nvred>0); // while ((s_mgrred.nvred>0) && (n_redes<40));
.
log_run(INF_MSG,"metred_proc_redparcial","Programacion de Tripulacion y Reservas
- Fin");

metred_eval_red("metred_eval_redglobal",s_mgrred,saux_red_kpis,1);
.
.
return(GOOD);
}

```

5.2.1.2. Descomposición de la Red Global en redes Parciales

De acuerdo a las especificaciones del proceso de descomposición del PPT global en redes parciales, se ha implementado un proceso basado en un algoritmo recursivo para la generación de las redes parciales. El código desarrollado implementa el diagrama del proceso generar red parcial (ver Figura 4-11) del método de asignación de tripulación elaborado (ver "4.5.5 Especificación de Pasos del Método Propuesto").

Código del Proceso de Descomposición en Redes Parciales

Se muestran aquí las rutinas principales de generación de redes parciales, del programa método de redes implementado, las cuales se encargan de obtener un sub-conjunto de vuelos de la red del problema inicial (descomposición), para su posterior tratamiento (asignación de tripulación).

La descomposición del problema inicial se basa en un algoritmo recursivo de generación de redes parciales, se muestra aquí una versión resumida de la rutina principal de generación de una red parcial. El código extendido de las rutinas de generación de redes parciales se encuentra en "Anexo A: Codificación del Programa".

Tabla 5-2. Codificación Resumida de Descomposición en Redes Parciales

```
//Obtiene los vuelos que conforman una Red Parcial a partir de la lista ordenada de  
vuelos No-Procesados (NUL) y fh_ini  
//Se recibe tambien datos de la amplitud de la Red Parcial  
redparcial_nextrecursivo(struct str_mgrred &vstr_mgrred, int vprinc, int nivel_recur)  
{  
.  
.  
.  
    int    l_vred_opt[MAX_VUERED],nvprinc_opt,l_vred_nre[MAX_VUERED],nvprinc_nre;  
//Listas temporales de vuelos OPT y NRE  
  
    vprinc_tip = vstr_mgrred.lv_fhiope_tip[vprinc]; //Solo puede ser OBJ u OPT...!!!  
    nvprinc_opt=0; nvprinc_nre=0;  
  
    if (vstr_mgrred.nvred > 1) { //El 1er vuelo OBJ no tiene OPT ni NRE  
        desi_vprinc = vue_des_ini(vue_fhiope[vprinc]);  
        vue_ini_ope(vue_fhiope[vprinc],f_iope_vprinc,h_iope_vprinc);  
  
        for (i=0;i<vstr_mgrred.nvred_can;i++) { //Logica compuesta para OPTs y NREs a la
```

```

vez...!!!
    i_desf = vue_des_fin(vue_fhiope[vstr_mgrred.lv_fhiope_can[i]]);
    .
    .
    if (i_desf == desi_vprinc) {

        vue_fin_ope(vue_fhiope[vstr_mgrred.lv_fhiope_can[i]],i_f_fope,i_h_fope);
        if (comp_fh(i_f_fope,i_h_fope,f_iope_vprinc,h_iope_vprinc) <= 0) {
            //OPT: Si llega al destino de salida del vuelo principal y antes de que
este salga
            l_vred_opt[nvprinc_opt++] = vstr_mgrred.lv_fhiope_can[i];
        } //OPT
    }
    else if (comp_fh(i_f_iope,i_h_iope,vstr_mgrred.vi_f_iope,vstr_mgrred.vi_h_iope)
> 0) {
        if      ((vstr_mgrred.lv_fhiope_tip[vstr_mgrred.lv_fhiope_can[i]]      !=
RED_VUE_TIPO_NRE) &&
            (comp_fh(i_f_iope,i_h_iope,f_iope_vprinc,h_iope_vprinc) <= 0)) {
            //NRE: Si sale del destino de salida del vuelo principal y antes de que
este salga
            l_vred_nre[nvprinc_nre++] = vstr_mgrred.lv_fhiope_can[i];
        } //NRE
    }
}

if ((vstr_mgrred.nvred + nvprinc_opt + nvprinc_nre) > vstr_mgrred.nvr_max) { //Se
superaria el Limite
    vstr_mgrred.overflow_ctrl = RED_VUE_GEN_OVERFLOW; //Se establece el
control de salida por Overflow
    return(GOOD); // Se devuelve OK antes de superar el Limite (aun no se ha
superado!)
}

// Agregar vuelos a la lista y marcarlos como NRE
for (i=0;i<nvprinc_nre;i++) { //Al final se tiene: vstr_mgrred.nvred += nvprinc_nre;
    .
    .
    //Arbol

```

```

vstr_mgrred.s_redtree.nodos[vstr_mgrred.s_redtree.n_nod].red_tip=RED_VUE_TIPO_N
RE;

vstr_mgrred.s_redtree.nodos[vstr_mgrred.s_redtree.n_nod].ipos_fhiope=l_vred_nre[i];
    vstr_mgrred.s_redtree.n_nod++; //No se sobre-escriben los NREs
}

// Agregar vuelos a la lista y marcarlos como OPT
.
.
for (i=0;i<nvprinc_opt;i++) { //Proceso de OPTs
    //Arbol

    vstr_mgrred.s_redtree.nodos[vstr_mgrred.s_redtree.n_nod].red_tip=RED_VUE_T
IPO_OPT;

    vstr_mgrred.s_redtree.nodos[vstr_mgrred.s_redtree.n_nod].ipos_fhiope=l_vred_o
    pt[i];

    vstr_mgrred.s_redtree.n_nod++;

    if (redparcial_nextrecursivo(vstr_mgrred,l_vred_opt[i],nivel_recur+1) != GOOD) {
//Se superaria el Limite
        return(BAD); // Se devuelve error antes de superar el Limite (aun no se ha
        superado!)
    }
    .
    .
}
}

if (vprinc_tip == RED_VUE_TIPO_OBJ) { // Sino seria OPT y no se hace nada!
    // Seleccionar vuelo siguiente (OBJ)
    idv_sig = iti_vue_sgt(vue_fhiope[vprinc]); // vuelo siguiente del itinerario de
    'vprinc'. Necesitamos su id en 'vue_fhiope'
    .
    .
}

```

```

        if (idv_sig > 0) { // Siguiente vuelo del itinerario de 'vprinc'. Nunca seria '0' un
vuelo siguiente!
        .
        .
        cambio_iti = 0; //Se continua en el mismo itinerario!
        }
        else { // 1er vuelo en destino final con salida inmediata-posterior a 'vprinc'
        .
        .
                idv_sig = vstr_mgrred.lv_fhiope_can[i];
                cambio_iti = 1; //Se continua con otro itinerario (cambio de
itinerario)!
                break;
        .
        .
        }
        if (idv_sig > 0) { //Si se ha seleccionado vuelo siguiente...!!!. Nunca seria '0' un
vuelo siguiente!
                if (cambio_iti == 1) {
                        //Backup, punto de retorno para revertir si OverFlow.
                        //La red parcial solo contiene itinerarios completos en caso de OverFlow
se elimina el ultimo itnerario
                        //Hasta aqui Res Actual OK y se empieza la siguiente (se sobre-escibe
'alv_fhiope_tip')
                        //Arbol
                        an_nod = vstr_mgrred.s_redtree.n_nod; //con el numero de nodos es
suficiente pues se ha linealizado
                }
                //Arbol actualizar
                ai_pos = redparcial_tree_pos(vstr_mgrred.s_redtree,vprinc);
                .
                .
                vstr_mgrred.s_redtree.nodes[ai_pos].red_tip=RED_VUE_TIPO_BBN;

                vstr_mgrred.s_redtree.nodes[vstr_mgrred.s_redtree.n_nod].red_tip=RED_VUE_T
IPO_OBJ;
        .

```

```

vstr_mgrred.s_redtree.nodes[vstr_mgrred.s_redtree.n_nod].ipos_fhiope=idv_sig;
vstr_mgrred.s_redtree.n_nod++;

if (redparcial_nextrecursivo(vstr_mgrred,idv_sig,1) != GOOD) {
return(BAD);
}
else { //Debe devolverse GOOD pues la Red Actual esta Ok y ha fallado la
siguiente...!!!
if (vstr_mgrred.overflow_ctrl == RED_VUE_GEN_OK) {
return(GOOD);
}
else if (vstr_mgrred.overflow_ctrl == RED_VUE_GEN_OVERFLOW) {
// La ultima ampliación de la red desborda el limite soportado
.
.
if (cambio_iti == 1) {
//Se supera el limite de tamaño de red parcial se eliminan vuelos incorporados
del último itinerario.
//La red parcial solo contiene itinerarios completos!
.
.
//Arbol
vstr_mgrred.s_redtree.n_nod = an_nod; //No se sobre-escriben los NREs,
basta con actualizar el numero de nodos!
vstr_mgrred.overflow_ctrl = RED_VUE_GEN_OK; //Se devuelve OK
}
return(GOOD); //Se propaga RED_VUE_GEN_OVERFLOW hasta (cambio_iti
== 1)...!!!
}
else {
EXIT_ERROR=9;
return(BAD);
}
}
}
}

```

```
return(GOOD);  
}
```

5.2.1.3. Solución de cada Red Parcial Generada

Como se ha comentado el proceso de solución de cada Red Parcial se basa en un algoritmo voraz el cual se describe a continuación.

En esta fase se tiene como entrada los vuelos que conforman la sub-red generada, los cuales tienen alta dependencia entre sí y son representativos del problema global, se requiere asignar tripulación a dichos vuelos, de acuerdo a las restricciones del problema y cumpliendo con los requisitos señalados en capítulos anteriores.

Descripción del Algoritmo Voraz de Solución de Red Parcial

Los pasos considerados se basan en la asignación óptima de los miembros del Crew requerido a cada vuelo de la red parcial, para ello los miembros del personal de vuelo de la aerolínea son seleccionados de acuerdo al vuelo que se está procesando (tipo de tripulante requerido según tipo de avión y función a cubrir, y destino de salida entre otras), y a las restricciones del problema (límite de horas de vuelo al día y mes, periodos de indisponibilidad por actividades pre-programadas del personal del vuelo), luego estos "candidatos" son seleccionados y almacenados en el conjunto "Solución" de la red parcial, siempre que conformen una solución por completar del problema o una solución mejor que la anterior encontrada (p.ej.: pueden existir incompatibilidades entre los miembros de la tripulación y no sería una solución), en caso contrario se rechazan y no vuelven a ser seleccionados.

Finalmente las soluciones encontradas para cada vuelo de la red parcial derivan en la solución de la misma, la cual es evaluada según los requisitos de la solución buscada (ver sección 4.1. Análisis de los Requisitos), se repite el proceso de solución de la red parcial seleccionando personal de vuelo antes no seleccionado y se evalúa la nueva solución, hasta alcanzar un número de iteraciones definido o recorrer el universo de soluciones factibles.

Código del Proceso de Solución de cada Redes Parcial – Algoritmo Voraz

Se muestran aquí las rutinas principales del programa método de redes implementado, el cual realiza el proceso de asignación de tripulación a cada una de las redes parciales en que se ha descompuesto el problema global.

La asignación de tripulación en cada red parcial se basa en un algoritmo voraz, se muestra aquí una versión resumida de las rutinas principales de generación de una red parcial. El código extendido de las rutinas de asignación de tripulación se encuentra en “Anexo A: Codificación del Programa”.

Tabla 5-3. Codificación Resumida de Solución de una Red Parcial

```
/* Esta Rutina realiza la Eleccion de los Tripulantes, Actualiza */
/* los datos de los elegidos y los registra en 'd_prt' */
asig_crew_sel_act(int idv, int It[][MAX_TD], int ln[], struct dat_tca *d_tca_, int flt[])
{
.
.
ntmr=d_tca_->nd_tmr;
```

```

for (j=0;j<ntmr;j++) {
    tt=d_tca_->d_tmr[j].id_tt;
    nt=d_tca_->d_tmr[j].nro_tmr;
    pos=0; //Donde comienza a buscar!!!
    iband_fact=0; //Inicialmente no ocurre rechazo por factibilidad
    for (k=0;k<nt;k++) {
        do {
            //Se envia lista de tripulantes del tipo 'tt' y cantidad de ellos 'ln[tt]'
            //Si 'pos' supera el rango se devuelve '-1'
            pos=next_tcrew(idv,lt[tt],ln[tt],pos);
            if (pos >= 0) {
                // Evaluar aqui la factibilidad de conformar crew con tripulante 'lt[tt][pos]'...!!!
                ifact=asig_crew_factibilidad(idv,lt[tt][pos],tt,d_prt,nd_prt);
                if (ifact != 1) {
                    log_run(LOW_MSG,"asig_crew_sel_act","Vuelo [%ld], No es factible conformar
crew con Tripulante %d, Tipo [%d]",
                        d_vue[idv].cod_vue,d_tri[lt[tt][pos]].cod_tri,d_tt[tt].cod_tt);
                    iband_fact=1;
                }
            }
            iseguir_buscando=0;
            if ((pos >= 0) && (ifact != 1)) {
                iseguir_buscando=1;
                pos++;
            }
        }
        while (iseguir_buscando);
        .
        .
        d_prt[nd_prt].id_vue=idv;
        d_prt[nd_prt].id_tri=idt;
        d_prt[nd_prt].id_tt=tt;
        nd_prt++;

        pos++; //Para empezar a buscar desde el siguiente en la lista
    }
}

```

```

return(GOOD);
}

asig_crew_seleccion (int idv, int lt[][MAX_TD], int ln[], struct dat_tca *d_tca_, int flt[])
{
    ord_ltripdes(idv,lt,ln,1); //ordena para obtener el mas prometedor, p.ej. el miembro del
    Vuelo inicial del itinerario
        //El parametro '1' indica que ordene Tripulacion normal
    if (asig_crew_sel_act(idv,lt,ln,d_tca_,flt) != GOOD) {
        //log_run(CRI_MSG,"asig_crew_seleccion","Error al Elegir Tripulantes");
        EXIT_ERROR=2; //Generalmente es por exceder algun tamaño definido, problema de
        memoria!!!
        return(BAD);
    }
    return(GOOD);
}

asig_crew (int idv, int &i, long &f_act, int &h_act, int lt[][MAX_TD], int ln[], int flt[])
{
    int idi,nvue,nva,idvf;
    .
    .
    idi=d_vue[idv].id_iti;
    log_run(INF_MSG,"asig_crew","Programacion de Vuelo [%ld] %s-%s [%ld-%04d]
    Itinerario [%ld]",
    d_vue[idv].cod_vue,d_des[vue_des_ini(idv)].cod_des,d_des[vue_des_fin(idv)].cod_des,
        d_vue[idv].f_sal,d_vue[idv].h_sal,d_iti[idi].cod_iti);

    if (asig_crew_load_candidatos(idv,lt,ln) != GOOD) { //Debe ser una carga inteligente y
    no cargar refuerzos!!!
        log_run(CRI_MSG,"asig_crew","Error al Cargar Tripulantes candidatos");
        return(BAD);
    }

    if (asig_crew_seleccion (idv,lt,ln,&d_tca[d_avi[d_iti[idi].id_avi].id_tca],flt) != GOOD) {
        log_run(CRI_MSG,"asig_crew","Error al Elegir Tripulantes"); //No selecciona

```

```

refuerzos!!!
    return(BAD);
}
//if (asig_crew_essolucion()) { //Aunque no se complete el crew requerido debe
aceptarse el nivel conseguido de solucion.
//}

//Aqui se asignan los Refuerzos!!!
nvue=iti_nvue(d_vue[idv].id_iti);
nva=((nvue%2)==0)?(nvue/2):((nvue/2)+1); //Para: 2->1, 3->2, 4->2, 5->3, etc.!
idvf=d_iti[d_vue[idv].id_iti].id_vue+nva;

if ((d_rp_prp.prg_ref == YES) &&
    (d_iti[d_vue[idv].id_iti].int_nac == YES) && //Itinerario Internacional
    (iti_large(d_vue[idv].id_iti) == 1) && //Itinerario Largo
    (idv < idvf)) { //Hasta la mitad del Itinerario
    if (asig_ref (idv,idi,idvf,lt,ln,flt) != GOOD) {
        return(BAD);
    }
}
return(GOOD);
}

```

5.3. TOMA DE RESULTADOS

5.3.1. Características de la Muestra

Para la realización de pruebas se ha elegido la programación de vuelos de una aerolínea que rutas nacionales e internacionales, tal como LAN Perú, que realiza al día cerca de 50 salidas a destinos nacionales y 20 internacionales aproximadamente. No obstante para el de vuelos se ha considerado el de una aerolínea de nivel medio, tal como TACA Perú que

realiza cerca de 22 salidas al día a destinos internacionales (excepto el Lima-Cuzco-Lima), para un periodo de 1 mes se tendría lo siguiente:

- Nro. Itinerarios al día: 22
- Nro. Vuelos por Itinerario^(*): 2 (aprox., vuelos de ida y vuelta)
- Nro. Itinerarios al mes: $22*30 = 660$ itinerarios (salidas de Lima)
- Nro. Vuelos al mes: $(22*2)*30 = 1320$ vuelos

El número de vuelos por itinerarios es como mínimo 2 (vuelos de ida y vuelta) pero algunos itinerarios no son directos tal como el Lima-Cuzco-Juliaca-Arequipa-Lima, y se realizan escalas lo cual incrementa el número de vuelos.

Debido a lo anterior se realiza un ajuste respecto al número de vuelos, considerando la programación de vuelos nacionales de LAN Perú de las Tablas 5-4 y 5-5, en la que se indican los itinerarios con escalas (columna ESCALAS) tenemos:

- Porcentaje de escalas por vuelos: %25 (1 escala c/4 vuelos aprox.)
- Nro. Vuelos al mes: $125\%(1320 \text{ vuelos}) = 1650$ vuelos

La muestra seleccionada para las pruebas tendrá un aproximado de 660 itinerarios y 1650 vuelos para un periodo de 1 mes.

Se muestra a continuación los itinerarios de vuelo de LAN Perú nacionales e internacionales, incluyendo rutas intermedias (contabilizadas como escalas), se observa además que se cuenta con una flota de aviones Boeing 767 o B763 (300 pasajeros) y Airbus 319 (120 pasajeros) y Airbus 320 (150 pasajeros), aviones de largo, corto y medio alcance respectivamente.

Tabla 5-4. LAN Perú – Vuelos Internacionales al 17/06/2008



VUELOS	RUTAS DESDE Y HACIA LIMA	FRECUENCIA	SALIDA	LLEGADA	AVION
LP580	LIMA-QUITO	DIARIO	12:50	15:05	A319
LP581	QUITO-LIMA	DIARIO	20:55	23:10	A319
LP706	LIMA-MADRID	MA,VI,DO	19:45	14:25+1	B763
LP707	MADRID-LIMA	LU,MI,SA	17:00	22:20	B763
LP630	LIMA-GUAYAQUIL	DIARIO	10:10	12:10	B763
LP631	GUAYAQUIL-LIMA	DIARIO	17:30	19:20	B763
LP564	LIMA-CARACAS	DIARIO	12:45	17:15	B763
LP565	CARACAS-LIMA	DIARIO	19:50	23:20	B763
LP427	LIMA-BUENOS AIRES	DIARIO	1:25	7:40	B763
LP429	LIMA-BUENOS AIRES	DIARIO	7:15	13:30	B763
LP428	BUENOS AIRES-LIMA	DIARIO	20:10	22:55	B763
LP426	BUENOS AIRES-LIMA	DIARIO	8:45	11:30	B763
LP626	LIMA-MEXICO	LU,MI,VI,DO	13:15	19:05	B763
LP627	MEXICO-LIMA	LU,MI,VI,DO	23:55	05:40+1	B763
LP639	LIMA-SANTIAGO	DIARIO EX. 12,13,16,17 y 22jun	0:30	4:55	A319
LP5601	LIMA-SANTIAGO	MA,MI,JU,SA	1:05	5:25	B763
LP5633	LIMA-SANTIAGO	LU,VI,DO	1:05	5:30	A320
LP5531	LIMA-SANTIAGO	DIARIO	7:30	11:50	B763
LP5635	LIMA-SANTIAGO	DIARIO	20:25	00:45+1	B763
LP643	LIMA-SANTIAGO	EX MA	15:15	19:40	A319
LA573	LIMA-SANTIAGO	15-jun	14:40	19:00	B763
LP429	LIMA-SANTIAGO	LU,VI,DO	7:15	16:50	B763
LP5634	SANTIAGO-LIMA	DIARIO	6:25	9:10	B763
LP5636	SANTIAGO-LIMA	01-jun	9:00	11:45	B763
LP638	SANTIAGO-LIMA	DIARIO	8:50	11:35	A319
LP5530	SANTIAGO-LIMA	DIARIO	20:05	22:50	B763
LP5632	SANTIAGO-LIMA	JU,SA,DO	21:10	23:55	A320
LP5600	SANTIAGO-LIMA	LU,MA,MI,VI	21:10	23:55	B763
LP5642	SANTIAGO-LIMA	EX MA (del 01jun al 09jun)	20:30	23:15	A319
LP5642	SANTIAGO-LIMA	MI,JU,VI,SA (del 13jun al 30jun)	20:30	23:15	A319
LP5642	SANTIAGO-LIMA	EX MA (del 22jun al 30jun)	20:30	23:15	A319
LP428	SANTIAGO-LIMA	LU,VI,DO	16:10	22:55	B763
LP765	LIMA-SAO PAULO	DIARIO	0:50	7:40	A319
LP781	LIMA-SAO PAULO	MA,DO	7:30	14:20	B763
LP764	SAO PAULO-LIMA	DIARIO	8:25	11:45	A319
LP780	SAO PAULO-LIMA	MA,DO	15:20	18:40	B763
LP5600	LIMA-LOS ANGELES	MA,MI,JU,SA	1:40	8:15	B763
LP604	LIMA-LOS ANGELES	EX MA y MI	0:40	7:15	B763
LP5601	LOS ANGELES-LIMA	LU,MA,MI,VI	13:20	23:55	B763
LP605	LOS ANGELES-LIMA	EX MA y MI	13:50	00:25+1	B763
LP5530	LIMA-NEW YORK	DIARIO	23:50	08:30+1	B763
LP5531	NEW YORK-LIMA	DIARIO	23:30	06:30+1	B763
LP510	LIMA-MIAMI	DIARIO	10:40	17:25	B763

LP514	LIMA-MIAMI	MA,JU,SA (desde 17jun)	0:20	7:05	B763
LP511	MIAMI-LIMA	DIARIO	1:45	6:15	B763
LP515	MIAMI-LIMA	MA,JU,SA (desde 17jun)	17:15	21:45	B763
LP567	LIMA-LA PAZ	LU,MI,SA	0:25	3:05	A319
LP566	LA PAZ-LIMA	LU,MI,SA	10:35	11:30	A319
LP567	LIMA-SANTA CRUZ	LU,MI,SA	0:25	5:05	A319
LP566	SANTA CRUZ-LIMA	LU,MI,SA	8:40	11:30	A319
LP582	LIMA-BOGOTA	DIARIO	12:40	15:35	A319
LP583	BOGOTA-LIMA	DIARIO	20:15	23:15	A319
LP580	LIMA-MEDELLIN	DIARIO	12:50	17:05	A319
LP581	MEDELLIN-LIMA	DIARIO	18:55	23:10	A319

Tabla 5-5. LAN Perú – Vuelos Nacionales al 05/09/2008 Parte I 

RUTAS DESDE / HACIA LIMA					
VUELOS	RUTAS	FREC.	SALE	LLEGA	ESCALAS
LP115	LIMA-CUSCO	DIARIO	4:55	8:50	DIRECTO
LP017	LIMA-CUSCO	DIARIO	5:40	6:55	DIRECTO
LP025	LIMA-CUSCO	DIARIO	6:00	7:15	DIRECTO
LP123	LIMA-CUSCO	DIARIO	6:05	7:20	DIRECTO
LP019	LIMA-CUSCO	DIARIO	7:45	9:00	DIRECTO
LP073	LIMA-CUSCO	DIARIO	8:30	9:45	DIRECTO
LP027	LIMA-CUSCO	DIARIO	9:25	10:40	DIRECTO
LP023	LIMA-CUSCO	DIARIO	11:25	12:40	DIRECTO
LP071	LIMA-CUSCO	DIARIO	9:40	10:55	DIRECTO
LP037	LIMA-CUSCO	DIARIO	11:50	13:05	DIRECTO
LP111	LIMA-CUSCO	DIARIO	13:00	14:15	DIRECTO
LP029	LIMA-CUSCO	DIARIO	12:35	13:50	DIRECTO
LP035	LIMA-CUSCO	DIARIO	13:25	14:40	DIRECTO
LP039	LIMA-CUSCO	DIARIO	14:45	16:00	DIRECTO
LP041	LIMA-CUSCO	DIARIO	14:20	15:35	DIRECTO
LP045	LIMA-CUSCO	MI-VI-DOM	8:10	9:25	DIRECTO
LP016	CUSCO-LIMA	DIARIO	7:25	8:45	DIRECTO
LP024	CUSCO-LIMA	DIARIO	7:45	9:05	DIRECTO
LP018	CUSCO-LIMA	DIARIO	9:30	10:50	DIRECTO
LP115	CUSCO-LIMA	DIARIO	9:15	10:35	DIRECTO
LP026	CUSCO-LIMA	DIARIO	11:10	12:30	DIRECTO
LP022	CUSCO-LIMA	LU-MA-JU-SA	13:10	14:30	DIRECTO
LP074	CUSCO-LIMA	DIARIO	12:50	14:10	DIRECTO
LP036	CUSCO-LIMA	LU-MA-JU-VI-SA-DOM	13:35	14:55	DIRECTO
LP072	CUSCO-LIMA	DIARIO	14:00	15:20	DIRECTO
LP123	CUSCO-LIMA	DIARIO	7:55	10:50	JUL
LP034	CUSCO-LIMA	DIARIO	15:10	16:30	DIRECTO
LP028	CUSCO-LIMA	DIARIO	14:20	15:40	DIRECTO
LP038	CUSCO-LIMA	DIARIO	16:30	17:50	DIRECTO
LP040	CUSCO-LIMA	DIARIO	16:05	17:25	DIRECTO

LP111	CUSCO-LIMA	DIARIO	14:45	18:50	JUL/AQP
LP044	CUSCO-LIMA	MI-VI-DOM	13:10	14:30	DIRECTO
LP115	LIMA-AREQUIPA	DIARIO	4:55	6:20	DIRECTO
LP117	LIMA-AREQUIPA	DIARIO	4:05	5:30	DIRECTO
LP105	LIMA-AREQUIPA	DIARIO	11:20	12:45	DIRECTO
LP111	LIMA-AREQUIPA	DIARIO	13:00	16:55	CUZ/JUL
LP109	LIMA-AREQUIPA	DIARIO	15:50	17:15	DIRECTO
LP100	LIMA-AREQUIPA	DIARIO	13:45	15:10	DIRECTO
LP103	LIMA-AREQUIPA	DIARIO	16:40	18:05	DIRECTO
LP119	LIMA-AREQUIPA	DIARIO	19:00	20:25	DIRECTO
LP107	LIMA-AREQUIPA	DIARIO	19:50	21:15	DIRECTO
LP115	AREQUIPA-LIMA	DIARIO	6:50	10:35	JUL/CUZ
LP116	AREQUIPA-LIMA	DIARIO	6:00	7:30	DIRECTO
LP104	AREQUIPA-LIMA	DIARIO	13:15	14:45	DIRECTO
LP108	AREQUIPA-LIMA	DIARIO	17:45	19:15	DIRECTO
LP100	AREQUIPA-LIMA	DIARIO	15:40	18:30	JUL
LP111	AREQUIPA-LIMA	DIARIO	17:20	18:50	DIRECTO
LP102	AREQUIPA-LIMA	DIARIO	18:35	20:05	DIRECTO
LP118	AREQUIPA-LIMA	DIARIO	20:55	22:25	DIRECTO
LP106	AREQUIPA-LIMA	DIARIO	21:45	23:15	DIRECTO
LP115	LIMA-JULIACA	DIARIO	4:55	7:35	AQP
LP123	LIMA-JULIACA	DIARIO	6:05	8:45	CUZ
LP111	LIMA-JULIACA	DIARIO	13:00	15:35	CUZ
LP100	LIMA-JULIACA	DIARIO	13:45	16:25	AQP

Tabla 5-6. LAN Perú – Vuelos Nacionales al 05/09/2008 Parte II



RUTAS DESDE / HACIA LIMA					
VUELOS	RUTAS	FREC.	SALE	LLEGA	ESCALAS
LP115	JULIACA-LIMA	DIARIO	8:00	10:35	CUZ
LP123	JULIACA-LIMA	DIARIO	9:15	10:50	DIRECTO
LP111	JULIACA-LIMA	DIARIO	16:05	18:50	AQP
LP100	JULIACA-LIMA	DIARIO	16:55	18:30	DIRECTO
LP073	LIMA-PTO MALDONADO	DIARIO	8:30	11:05	CUZ
LP071	LIMA-PTO MALDONADO	DIARIO	9:40	12:10	CUZ
LP074	PTO MALDONADO-LIMA	DIARIO	11:30	14:10	CUZ
LP072	PTO MALDONADO-LIMA	DIARIO	12:40	15:20	CUZ
LP161	LIMA-TACNA	DIARIO	18:35	20:20	DIRECTO
LP163	LIMA-TACNA	DIARIO	5:05	6:50	DIRECTO
LP045	LIMA-TACNA	MI-VI-DOM	8:10	10:35	CUZ
LP160	TACNA-LIMA	DIARIO	20:50	22:40	DIRECTO
LP162	TACNA-LIMA	DIARIO	7:20	9:10	DIRECTO
LP044	TACNA-LIMA	MI-VI-DOM	11:35	14:30	CUZ
LP206	LIMA-TRUJILLO	DIARIO	15:25	16:30	DIRECTO
LP202	LIMA-TRUJILLO	DIARIO	9:20	10:25	DIRECTO
LP204	LIMA-TRUJILLO	DIARIO	20:40	21:45	DIRECTO

LP203	TRUJILLO-LIMA	DIARIO	10:55	11:55	DIRECTO
LP207	TRUJILLO-LIMA	DIARIO	17:00	18:00	DIRECTO
LP205	TRUJILLO-LIMA	DIARIO	22:15	23:15	DIRECTO
LP272	LIMA-CHICLAYO	DIARIO	4:00	5:25	DIRECTO
LP276	LIMA-CHICLAYO	DIARIO	16:20	17:45	DIRECTO
LP328	LIMA-CHICLAYO	DIARIO	17:25	18:50	DIRECTO
LP273	CHICLAYO-LIMA	DIARIO	5:55	7:05	DIRECTO
LP277	CHICLAYO-LIMA	DIARIO	18:15	19:25	DIRECTO
LP329	CHICLAYO-LIMA	DIARIO	22:10	23:20	DIRECTO
LP302	LIMA-PIURA	DIARIO	4:25	6:00	DIRECTO
LP306	LIMA-PIURA	DIARIO	12:35	14:10	DIRECTO
LP304	LIMA-PIURA	DIARIO	19:50	21:25	DIRECTO
LP303	PIURA-LIMA	DIARIO	6:30	7:55	DIRECTO
LP307	PIURA-LIMA	DIARIO	14:40	16:05	DIRECTO
LP305	PIURA-LIMA	DIARIO	21:55	23:20	DIRECTO
LP328	LIMA-TUMBES	DIARIO	17:25	20:15	CIX
LP329	TUMBES-LIMA	DIARIO	20:45	23:20	CIX
LP254	LIMA-TARAPOTO	DIARIO	9:40	11:00	DIRECTO
LP256	LIMA-TARAPOTO	DIARIO	20:20	21:40	DIRECTO
LP255	TARAPOTO-LIMA	DIARIO	11:30	12:40	DIRECTO
LP257	TARAPOTO-LIMA	DIARIO	22:10	23:20	DIRECTO
LP374	LIMA-IQUITOS	DIARIO	4:55	6:40	DIRECTO
LP372	LIMA-IQUITOS	LU-MA-JU-SA	7:55	9:40	DIRECTO
LP370	LIMA-IQUITOS	MI-VI-DO	18:20	20:05	DIRECTO
LP378	LIMA-IQUITOS	DIARIO	19:20	21:05	DIRECTO
LP376	LIMA-IQUITOS	DIARIO	15:55	17:40	DIRECTO
LP375	IQUITOS-LIMA	DIARIO	7:10	8:50	DIRECTO
LP373	IQUITOS-LIMA	LU-MA-JU-SA	10:10	11:50	DIRECTO
LP377	IQUITOS-LIMA	DIARIO	18:10	19:50	DIRECTO
LP371	IQUITOS-LIMA	MI-VI-DO	20:35	22:15	DIRECTO
LP379	IQUITOS-LIMA	DIARIO	21:35	23:15	DIRECTO
LP352	LIMA-PUCALLPA	DIARIO	4:30	5:35	DIRECTO
LP356	LIMA-PUCALLPA	DIARIO	20:35	21:40	DIRECTO
LP353	PUCALLPA-LIMA	DIARIO	6:05	7:15	DIRECTO
LP357	PUCALLPA-LIMA	DIARIO	22:10	23:20	DIRECTO
LP292	LIMA-CAJAMARCA	DIARIO	8:15	9:20	DIRECTO
LP293	CAJAMARCA-LIMA	DIARIO	9:50	10:50	DIRECTO

Tabla 5-7. LAN Perú – Rutas Nacionales Intermedias al 05/09/2008



RUTAS INTERMEDIAS					
LP045	TACNA-CUZCO	MI-VI-DOM	11:35	12:45	CUZ
LP044	CUZCO-TACNA	MI-VI-DOM	9:55	11:05	CUZ
LP115	AREQUIPA-CUSCO	DIARIO	6:50	8:50	JUL
LP111	CUSCO-AREQUIPA	DIARIO	14:45	16:55	JUL
LP115	JULIACA-CUSCO	DIARIO	8:05	8:50	DIRECTO

LP111	CUSCO-JULIACA	DIARIO	14:45	15:35	DIRECTO																					
LP123	CUSCO-JULIACA	DIARIO	7:55	8:45	DIRECTO																					
LP115	AREQUIPA-JULIACA	DIARIO	6:50	7:35	DIRECTO																					
LP100	AREQUIPA-JULIACA	DIARIO	15:40	16:25	DIRECTO																					
LP111	JULIACA-AREQUIPA	DIARIO	16:05	16:55	DIRECTO																					
LP073	CUSCO-PTO MALDONADO	DIARIO	10:15	11:05	DIRECTO																					
LP071	CUSCO-PTO MALDONADO	DIARIO </tr <tr> <td>LP074</td> <td>PTO MALDONADO-CUSCO</td> <td>DIARIO</td> <td>11:35</td> <td>12:20</td> <td>DIRECTO</td> </tr> <tr> <td>LP072</td> <td>PTO MALDONADO-CUSCO</td> <td>DIARIO</td> <td>12:40</td> <td>13:30</td> <td>DIRECTO</td> </tr> <tr> <td>LP328</td> <td>CHICLAYO-TUMBES</td> <td>DIARIO</td> <td>19:15</td> <td>20:15</td> <td>DIRECTO</td> </tr> <tr> <td>LP329</td> <td>TUMBES-CHICLAYO</td> <td>DIARIO</td> <td>20:25</td> <td>21:45</td> <td>DIRECTO</td> </tr>	LP074	PTO MALDONADO-CUSCO	DIARIO	11:35	12:20	DIRECTO	LP072	PTO MALDONADO-CUSCO	DIARIO	12:40	13:30	DIRECTO	LP328	CHICLAYO-TUMBES	DIARIO	19:15	20:15	DIRECTO	LP329	TUMBES-CHICLAYO	DIARIO	20:25	21:45	DIRECTO
LP074	PTO MALDONADO-CUSCO	DIARIO	11:35	12:20	DIRECTO																					
LP072	PTO MALDONADO-CUSCO	DIARIO	12:40	13:30	DIRECTO																					
LP328	CHICLAYO-TUMBES	DIARIO	19:15	20:15	DIRECTO																					
LP329	TUMBES-CHICLAYO	DIARIO	20:25	21:45	DIRECTO																					

Se muestra a continuación la red de vuelos nacionales e internacionales de LAN Perú.

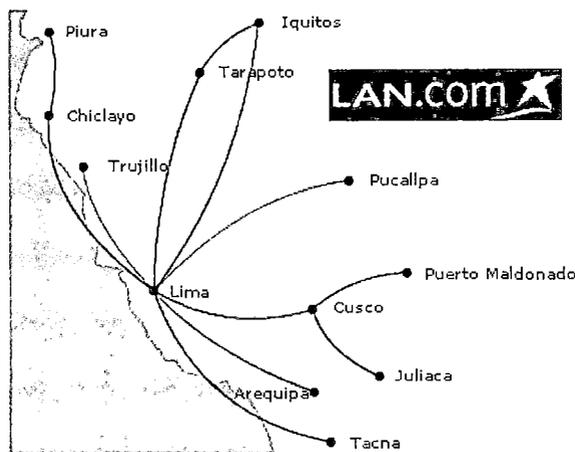


Figura 5-2. LAN Perú - Red de Vuelos Nacionales

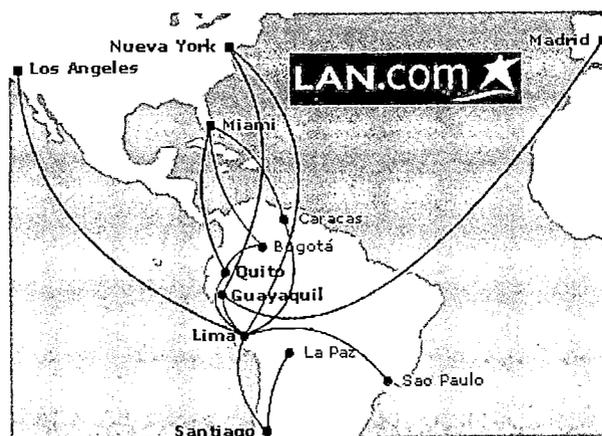


Figura 5-3. LAN Perú - Red de Vuelos Internacionales

5.3.2. Datos de las Pruebas Realizadas

De acuerdo al muestreo realizado los datos de entrada y sus tamaños considerados de personal de vuelo, flota y otros datos del problema se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5-8. Datos de entrada y tamaños considerados

DATOS ENTRADA	FIGHERO	NRO. REGISTROS		OBSERVACIONES
		MAX.	PROM.	
		Tipo de Avión	Tipo_Avi.TXT	
Capacidad del Avión	TpCapAvi.TXT	8	4	Airbus-320 120 pasajeros, Airbus-320 150 pasajeros
Aviones	aviones.TXT	15	8	Total de aviones de la flota de la aerolínea
Tripulación Requerida	Tripmrq.TXT	72	24	Por ejemplo para Airbus 320 de 120 pasajeros: Piloto, Copiloto, Supervisor y 3 Auxiliares
Destinos	Destinos.TXT	80	40	Lima, Cuzco, Bogotá, Sao Paulo, etc.
Rutas	Rutas.TXT	50	35	Lima-Cuzco, Lima-La Paz, La Paz-Santa Cruz, etc.
Itinerarios de Vuelo	Itinerar.TXT	800	660	Lima-Bogotá-Lima (132/133) a las 10:55
Vuelos	Vuelos.TXT	2000	1650	Lima-Bogotá (130) a las 10:55, Bogotá-Lima (133) a las 16:30
Tipo de Tripulante	Tip_Tri.TXT	9	6	Piloto, Copiloto, Supervisor, Auxiliar
Tripulantes	Triptes.TXT	640	450	Personal de Vuelo
Reservas	Reservas.TXT	30	20	Servicio de Reserva (en la base o domicilio)
Preferencias de Vuelos	Preferen.TXT	100	50	Solicitudes de rutas de vuelo de la tripulación

Equidad de Vuelos	Equidad.TXT	32000	15750	Estadísticas de rutas voladas por tripulante
Incompatibilidad	cmpn_tri.TXT	500	350	Relación de tripulantes (de 2 en 2) con compatibilidad negativa
Tipo de Indisponibilidad	Tip_Ind.TXT	15	8	Tipos de indisponibilidad (vacaciones, permisos)
Fechas Especiales	Fech_Esp.TXT	20	12	Si es por fecha especial (Navidad, Día de la Madre)
Indisponibilidad	Indispc.TXT	1500	900	Indisponibilidades previstas del personal de vuelo (inicio y fin)
Tripulación Estadísticas	Trip_Val.TXT	640	450	Estadísticas del personal de vuelo (horas de vuelo al mes, trimestre y año, etc.)
Restricciones y Otros	Paramtrs.TXT	1	1	Restricciones de horas de vuelo, costos de estadía
Parametros de la Asignación	Prm_Prc.TXT	1	1	Fecha de inicio y fin del periodo de proceso de asignación, sólo tripulación, reservas o ambos.

Para cada prueba realizada se han generado todos los datos de la Tabla 5-8, y se ha considerado el tamaño promedio de registros de c/u de ellos teniéndose en promedio más de 1650 vuelos al mes correspondientes a itinerarios nacionales e internacionales.

Los datos de prueba están contenidos en ficheros de texto delimitado, estos ficheros son recogidos tanto por el programa experto humano como por el programa método de redes, realizando ambos programas el proceso de asignación de tripulación y comparándose posteriormente los indicadores de la solución obtenida por cada uno de ellos (ver 5.1 Escenario de Pruebas).

Los resultados del proceso de asignación tanto por experto humano como por método de redes son ficheros de datos con el resultado del proceso (OK

/ KO) y las asignaciones de tripulación a los vuelos de entrada así como también el personal de vuelo asignado a servicios de reservas en la base (operativas) o en su domicilio (imaginarias). Los datos de respuesta del proceso se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5-9. Datos de salida y tamaños considerados

DATOS SALIDA	FICHERO	NRO. REGISTROS		OBSERVACIONES
		MAX.	PROM.	
Resultado	RESP_US.TXT	1	1	Código del resultado del proceso (OK, ERROR)
Log de Operación	LOG_PS.TXT	N.A.	15000	Log de actividad del proceso de asignación
Asignación de Tripulación	PRG_TRI.TXT	10000	8250	Relación de vuelos, tripulantes y función
Asignación de Reservas	PRG_RSV.TXT	2000	1200	Asignación de personal de reserva operativa o domiciliaria
Estado Final de los Tripulantes	TRIP_VAL.TXT	640	450	Datos asociados a los tripulantes luego del proceso (destino final, horas de vuelo, etc.)

5.3.3. Análisis de Resultados

Luego de realizar pruebas en el marco del escenario planteado (ver 5.1 Escenario de Pruebas”) se obtienen los resultados siguientes del proceso de asignación por el programa método de redes.

En la Figura 5-4 siguiente se muestra el grado de cobertura logrado para los vuelos programados un total de 1046 para el periodo de asignación,

obteniéndose un 97,61% de vuelos a los que se les ha completado el equipo de vuelo requerido, el 2,39% restante son vuelos que no se logró completar el equipo de vuelo.



Figura 5-4. Resultado de la Asignación de Tripulación – Vuelos completados

En la Figuras 5-5 se realiza el mismo análisis pero a nivel más detallado, por tripulantes asignados y función de vuelo, se observa que el porcentaje de cumplimiento es similar teniéndose un 98,31% de puestos de tripulación cubiertos de un total de 8031, y quedando sin asignar 136 puestos de tripulación que no se han cubierto, correspondientes al 1,69% del total.

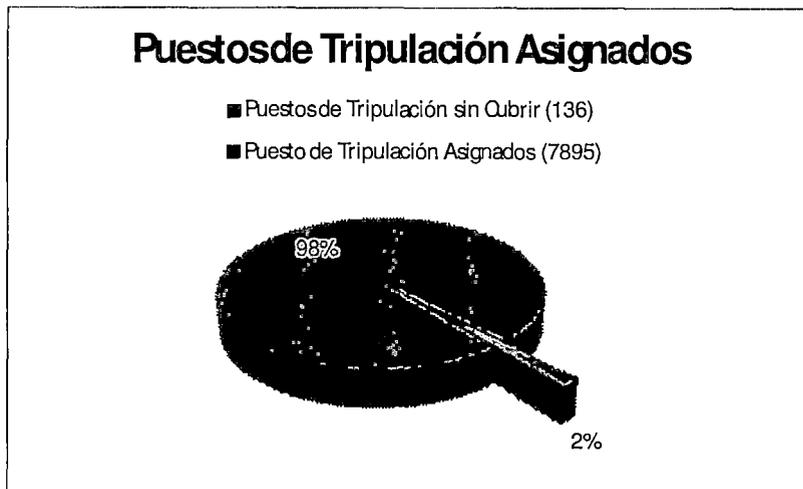


Figura 5-5. Resultado de la Asignación de Tripulación – Puestos asignados

En la Figura 5-6 se muestra la distribución de puestos de vuelo asignados.

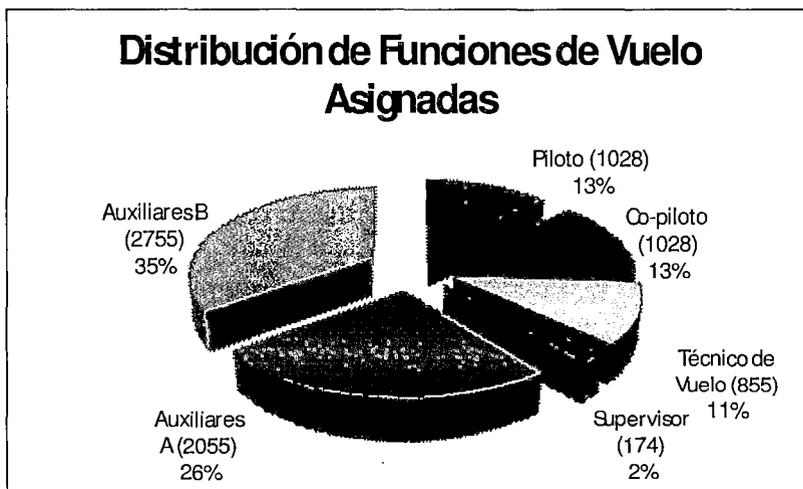


Figura 5-6. Distribución de la Tripulación asignada por funciones de vuelo

En la Figura 5-7 se observa como se distribuyen los puestos de vuelo no cubiertos, destacando que la mayor escasez de los mismos está asociada a puestos de tripulación de cabina de pasajeros, específicamente en el personal de asistencia al pasajero Auxiliares A y B en gráfico y que en

conjunto suman son 85 puestos no cubiertos, estos puestos tendrán que ser cubiertos por personal de alguna empresa que ofrezca estos servicios asociada a la aerolínea.

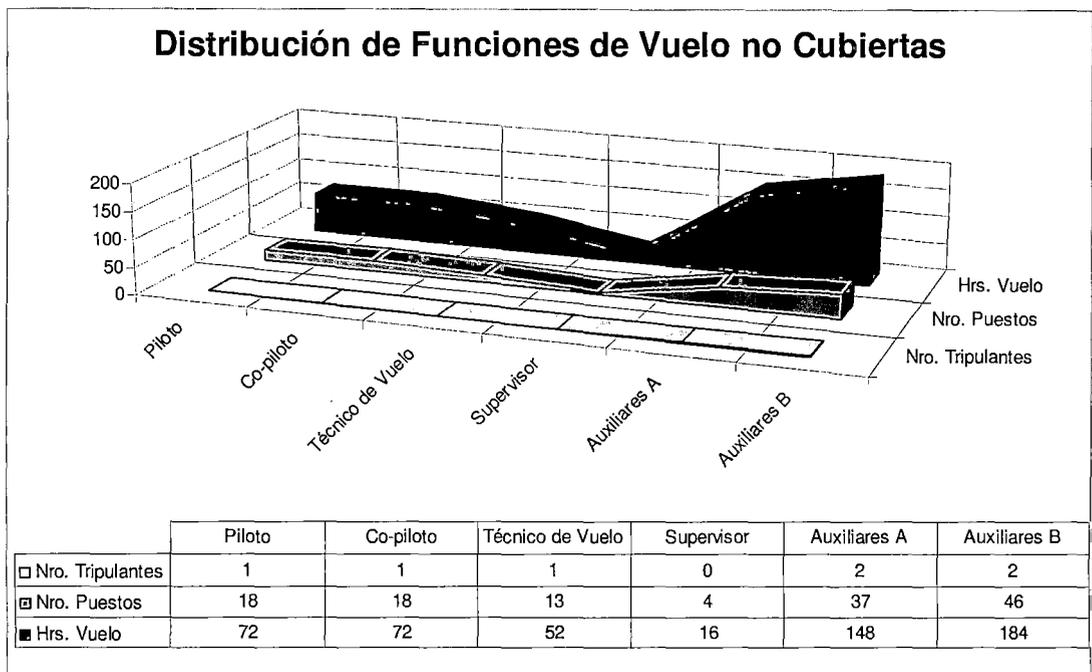


Figura 5-7. Distribución de Funciones de Vuelo no Cubiertas

En el gráfico anterior se incluye también el número de tripulantes faltante, considerando un promedio de 4 horas de vuelo asociado a cada puesto no cubierto, y que el personal de vuelo puede volar en promedio 80 horas al mes, se tiene por ejemplo que en el caso de los pilotos con 1 piloto adicional bastaría para cubrir las 72 horas de vuelo que representan los 18 puestos no cubiertos.

5.3.3.1. Comparativa experto humano y método de redes

A Nivel de Funciones de Vuelo Asignadas

A nivel de la tripulación que ambos programas logran asignar se obtienen en ambos casos niveles altos de cobertura de los vuelos que requieren se les asigne tripulación, el orden de efectividad es del orden del 97%, según se ha mostrado en los gráficas de resultados anteriores. No se observa aquí una diferencia relevante entre ambos programas.

A Nivel de Costos

A nivel de costos la comparativa se hace considerando que se tiene un grupo humano de personal de vuelo con contrato fijo y otro con contrato variable, este último grupo con un contrato de horas de vuelo menor, como p.ej. 35 horas de vuelo al mes. Para que los costos operativos de la aerolínea sean adecuados, el personal con contrato fijo debe volar hasta completar en la medida de lo posible el número promedio de horas de vuelo al mes (en nuestro caso 75 hrs.), y el personal con contrato variable no debe exceder la cantidad de horas de su contrato o la aerolínea debería retribuirle por horas extras de vuelo.

Las pruebas realizadas se enfocan en las horas no completadas, respecto al promedio mensual fijado, que el personal con contrato fijo no logra cubrir, tanto con el programa experto humano como con el programa método de redes.

En la Figura 5-8 siguiente y para 119 empleados con contrato fijo (de un total de 447), se observa que en el caso del programa experto humano el número de horas no-cubiertas, es decir el número de horas por debajo

del promedio mensual es un total de 1070 hrs. asociadas a 85 tripulantes. En el caso del programa método de redes el número de horas no cubiertas es menor, del orden de 680 hrs. asociadas a 76 tripulantes.

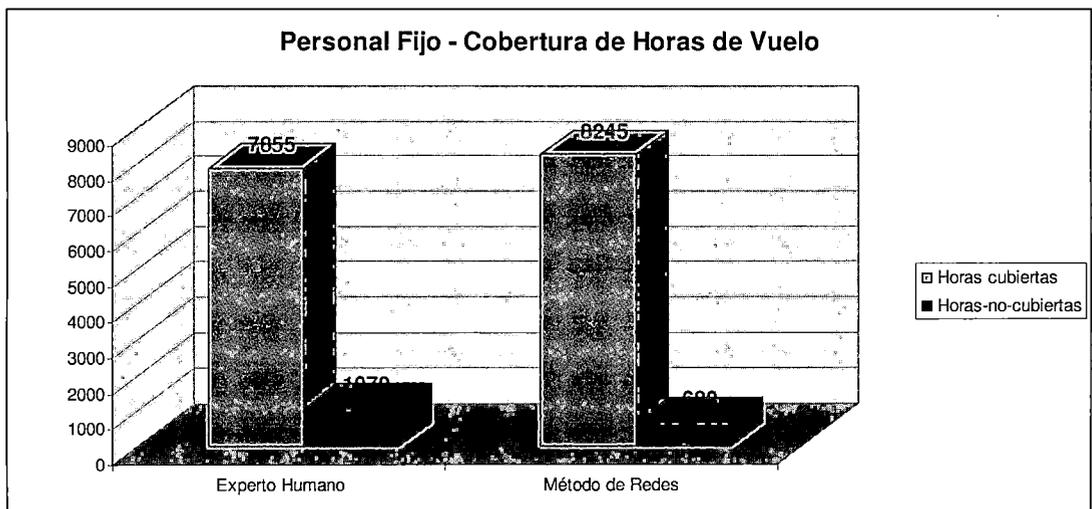


Figura 5-8. Distribución de Funciones de Vuelo no Cubiertas

De la figura anterior y a nivel de porcentajes de eficiencia, el programa experto humano tiene como resultado un 11,99% de horas no cubiertas (1070 de 8925), mientras que el programa método de redes obtiene un 7,62% de horas no cubiertas (680 de 8925), para el personal con contrato fijo.

El programa método de redes disminuye en 390 el total de horas no cubiertas, obteniendo una mejora de 36,45% (390 de 1070), respecto del programa experto humano.

5.3.4. Reportes de la Asignación de Tripulación

Se muestran algunos reportes de vuelos internacionales y el equipo de vuelo que ha sido asignado, pudiéndose apreciar la inclusión de personal de vuelo

que viaja como Deadhead, sin formar parte de la tripulación, este personal es trasladado para cubrir alguna ruta posterior del itinerario en el caso de itinerarios de largo recorrido. Si los Deadhead son enviados desde la base se trataría de una Doble Tripulación.

Airline		Pág. :	239
REFORTE DE PROGRAMACION DE TRIPULACION		Fecha :	20/09/2008
		Hora :	09:57:15
ITINERARIO : LIM-MIA-LIM		Avión : 321	
APELLIDOS Y NOMBRES		TIPO TRIPULANTE	ESCALAFON
VUELOS : LIM - MIA		DIA-HORA SAL/LLEG : 01/09/2008 10:50 01/09/2008 17:30	
ALVAREZ ZEVALLOS, FEDERICO	Piloto	0	
BELLINA ACEVEDO, JAVIER	Copiloto	0	
VALDIVIESO ISISOLA, JUAN FRANCISCO	Supervisor	0	
BENEL CHAMAYA, KAREM	Auxiliar B	0	
GUERRERO HERRERA, MERIELA	Auxiliar B	0	
CAFFERATA DE LA BARRA, IVAN	Auxiliar C	0	
CARBONELL LOC, VANESSA	Auxiliar C	0	
GADER MORAN, FARAH	Auxiliar C	0	
GALLAGHER VELAZCO, SANDRA	Auxiliar C	0	
VUELOS : MIA - LIM		DIA-HORA SAL/LLEG : 01/09/2008 18:35 01/09/2008 23:05	
MECLENBURG RASCHIO, ADOLFO	Piloto	0	
ARELU LIENDO, HIGUEL	Copiloto	0	
ACUÑA RABINA, THILDA	Supervisor	45	
AGUIRRE MONTEVERDE, NADIA ERIKA	Auxiliar B	0	
ACUÑA R., SONIA	Auxiliar B	21	
ARANDA DEL CARPIO, JESSICA	Auxiliar C	0	
AMPUERO LIZARRAGA, ROXANA	Auxiliar C	0	
BACA HISAD, ERLA	Auxiliar C	0	
ALLISON CARDENAS, VERONICA	Auxiliar C	53	
ITINERARIO : LIM-MEX-LIM		Avión : 321	
APELLIDOS Y NOMBRES		TIPO TRIPULANTE	ESCALAFON
VUELOS : LIM - MEX		DIA-HORA SAL/LLEG : 01/09/2008 11:00 01/09/2008 16:35	
MORAN SANCHEZ, VLADIMIR	Piloto	0	
DE SOUZA FERREYRA, JAHE	Copiloto	0	
RAMIREZ TABOADA, RUTH	Supervisor	0	
DUARTE LUNA PERALTA, MARIA DEL PILAR	Auxiliar B	0	
GUZMAN CALVEZ, HARITZA	Auxiliar B	0	
BLACK FERRARI, CATERINA	Auxiliar C	0	
DOMERO ANGULO, ARACELLI	Auxiliar C	0	
ECHEVERRIA CARCAHO, GIOVANNA	Auxiliar C	0	
GANOZA SARMIENTO, JOHANA	Auxiliar C	0	
MONTOYA LEON, HUGO	Deadhead	0	
ECHECOPAR FLOREZ, JAVIER	Deadhead	0	
BUSCHBECK BASELLI, SUSANNE	Deadhead	0	
BASTANTE PONCE, ROSA	Deadhead	0	
HERRADA PEZZINI, DENISSE	Deadhead	0	
BARRANTES LISTER, CLAUDIA	Deadhead	0	
BAUER SOBERON, URSULA	Deadhead	0	
GARCIA DE LAMA, ROSA CECILIA	Deadhead	0	
GIANOLI GALVEZ, GINA	Deadhead	0	

Figura 5-9. Reporte de Vuelo Internacional y Tripulación Asignada – Parte I

En la Figura anterior se observan los itinerarios Lima-Miami-Lima y Lima-México-Lima, se observa que el regreso Miami-Lima es realizado por un equipo que ya se encontraba en Miami a la espera; en el caso del Lima-México-Lima se le ha enviado doble tripulación que viaja como deadhead (traslado) para el vuelo de regreso.

En la Figura 5-10 siguiente se observa por ejemplo que el vuelo México-Lima tiene como piloto a Hugo Montoya y según se muestra en la Figura 5-9 anterior, se le había enviado como deadhead en el vuelo inicial Lima-México para el vuelo de regreso. Lo mismo se observa con el resto del personal enviado como doble tripulación.

Airline		Pág. : 240
REPORTE DE PROGRAMACION DE TRIPULACION		Fecha : 20/09/2008
		Hora : 10:20:43
ITINERARIO : LIM-MEX-LIM		Avión : 321
APELLIDOS Y NOMBRES	TIPO TRIPULANTE	ESCALAFON
VUELOS : MEX - LIM		DIA-HORA SAL/LLEG : 01/09/2008 17:30 01/09/2008 23:00
MONTOYA LECN, HUGO	Piloto	0
ECHECOPAR FLOREZ, JAVIER	Copiloto	0
BUSCHBECK BASELLI, SUSANNE	Supervisor	0
BASTANTE PONCE, ROSA	Auxiliar B	0
HERRADA PEZZINI, DENISSE	Auxiliar B	0
BARRANTES LISTER, CLAUDIA	Auxiliar C	0
BAUER SOBERON, URSULA	Auxiliar C	0
GARCIA DE LAMA, ROSA CECILIA	Auxiliar C	0
GIANOLI GALVEZ, GINA	Auxiliar C	0
ITINERARIO : LIM-PTY-SJO-PTY-LIM		Avión : 319
APELLIDOS Y NOMBRES	TIPO TRIPULANTE	ESCALAFON
VUELOS : LIM - PTY		DIA-HORA SAL/LLEG : 01/09/2008 11:10 01/09/2008 14:30
EGUSQUIZA BELLO, JUAN	Piloto	0
ESCOBAR TILLIT, RENZO	Copiloto	0
CHAVEZ BORJA, HARVEY	Ing. de vuelo	0
ARIAS VALDEZ, GERMAN	Auxiliar B	0
LOZANO CASTRO, JORGE	Auxiliar B	0
ALZAMORA NORMAND, PASCUAL	Auxiliar C	0
ASTETE NAKAMATSU, LUIS	Auxiliar C	0
GRILO RUIZ, JUAN MANUEL	Auxiliar C	0
FERNANDINI INSUA, MIGUEL	Deadhead	0
LARREA MARION, OSCAR	Deadhead	0
COYA SALAVERRY, ANTONIO	Deadhead	0
ALZAMORA PORTURAS, NORKA	Deadhead	0
LUNA TURBIO, BEATRIZ	Deadhead	0
ALVARADO BUSTAMANTE, VERONICA	Deadhead	0
ALVAREZ RAMIREZ, MIGUEL	Deadhead	0
GUERRA SABA, PAMELA	Deadhead	0
VUELOS : PTY - SJO		DIA-HORA SAL/LLEG : 01/09/2008 15:15 01/09/2008 16:25
EGUSQUIZA BELLO, JUAN	Piloto	0
ESCOBAR TILLIT, RENZO	Copiloto	0
CHAVEZ BORJA, HARVEY	Ing. de vuelo	0
ARIAS VALDEZ, GERMAN	Auxiliar B	0
LOZANO CASTRO, JORGE	Auxiliar B	0
ALZAMORA NORMAND, PASCUAL	Auxiliar C	0
ASTETE NAKAMATSU, LUIS	Auxiliar C	0
GRILO RUIZ, JUAN MANUEL	Auxiliar C	0
FERNANDINI INSUA, MIGUEL	Deadhead	0
LARREA MARION, OSCAR	Deadhead	0
COYA SALAVERRY, ANTONIO	Deadhead	0
ALZAMORA PORTURAS, NORKA	Deadhead	0

Figura 5-10. Reporte de Vuelo Internacional y Tripulación Asignada – Parte II

En la Figura 5-11 siguiente se muestra el rol de vuelos correspondiente al piloto Hugo Montoya, donde se puede apreciar el vuelo inicial Lima-México que se le asigna como Refuerzo, el cual se trata del deadhead que realiza

(ver Figura 5-9) para formar parte de la tripulación en el vuelo del regreso.

AIRLINE				Pág. :	1
ROL DE VUELOS DEL TRIPULANTE				Fecha :	20/09/2008
				Hora :	10:33:10
Tripulante : MONTOYA LEON, HUGO					
Tipo : PILOTO					
Fecha : 01/09/2008					
RUTAS		HORA			
INICIAL	FINAL	SALIDA	LLEGADA	HRS. VUELO	
LIM	MEX	11:00	16:35	05:35	
MEX	LIM	17:30	23:00	05:30	
TOTAL DE HORAS AL DIA:					05:30
Fecha : 03/09/2008					
RUTAS		HORA			
INICIAL	FINAL	SALIDA	LLEGADA	HRS. VUELO	
LIM	BUE	00:15	06:20	06:05	
TOTAL DE HORAS AL DIA:					06:05
Fecha : 04/09/2008					
RUTAS		HORA			
INICIAL	FINAL	SALIDA	LLEGADA	HRS. VUELO	
BUE	LIM	07:20	09:45	02:25	
TOTAL DE HORAS AL DIA:					02:25
Fecha : 06/09/2008					
RUTAS		HORA			
INICIAL	FINAL	SALIDA	LLEGADA	HRS. VUELO	
LIM	SCL	00:05	04:25	04:20	
SCL	LIM	07:00	09:30	02:30	
TOTAL DE HORAS AL DIA:					06:50
Fecha : 07/09/2008					
RUTAS		HORA			
INICIAL	FINAL	SALIDA	LLEGADA	HRS. VUELO	
LIM	MIA	10:50	17:30	06:40	
TOTAL DE HORAS AL DIA:					06:40
Fecha : 09/09/2008					
RUTAS		HORA			
INICIAL	FINAL	SALIDA	LLEGADA	HRS. VUELO	
MIA	LIM	09:30	14:00	04:30	
TOTAL DE HORAS AL DIA:					04:30
Fecha : 13/09/2008					
RUTAS		HORA			
INICIAL	FINAL	SALIDA	LLEGADA	HRS. VUELO	
LIM	IQT	08:30	10:05	01:35	
IQT	MIA	10:50	16:20	05:30	
TOTAL DE HORAS AL DIA:					07:05

Figura 5-11. Reporte de Vuelos asignados por Tripulante

En la figura siguiente se muestra el reporte de reservas asignadas, tanto operativas (en la base) como domiciliarias (imaginarias). Las reservas fijadas por la aerolínea, en nuestro caso son siempre las mismas por día y cubren con distinto perfil de personal de vuelo diversos intervalos de tiempo.

AIRLINE 		Pág. : 1 Fecha :20/09/2008 Hora :10/44/08			
REPORTE DE PROGRAMACION DE RESERVAS					
COD.	HORA INICIAL	HORA FINAL	TIPO RESERVA	APELLIDOS Y NOMBRES	TIPO TRIP.
FECHA : 01/09/2008					
RD	4:00	14:00	DOMICILIARIA	PENAGOS CUADROS, NORA	AUXILIAR B
RH	5:00	13:00	OPERATIVA	OLIVARI VALDIVIESO, SOPHIA	AUXILIAR C
RH	5:00	13:00	OPERATIVA	OLAVARRIA SALINAS, ARIELA	AUXILIAR C
RD1	8:30	18:00	DOMICILIARIA	PINZAS TELLO, MARIA DE LOURDES	AUXILIAR B
DS1	8:30	18:00	OPERATIVA	SCLIS FUSTER, MONICA	SUPERVISOR
RI1	10:00	22:00	DOMICILIARIA	ROBLES STANBURY, ELIAS	ING. DE VUELO
RC2	10:00	22:00	DOMICILIARIA	SANTILLANA CASTILLO, LUIS	COPILOTO
RC3	10:00	22:00	DOMICILIARIA	GAMARRA MOLINA, GINO RAUL	COPILOTO
RO	10:00	13:00	OPERATIVA	PEROVICH BROMBERG, TATIANA	AUXILIAR C
RP2	10:00	22:00	DOMICILIARIA	LANDAURE GONZALES, ARTURO	PILOTO
RD3	11:00	21:00	DOMICILIARIA	BIASEVICH BARRETO, JOSE	AUXILIAR B
RT	12:00	20:00	OPERATIVA	PALACIOS RAMIREZ, CECILIA	AUXILIAR C
RT	12:00	20:00	OPERATIVA	PETROVICH CASSINA, IGOR	AUXILIAR C
DS2	21:00	7:00	DOMICILIARIA	PINZAS TELLO, SILVIA	SUPERVISOR
RD2	21:00	7:00	DOMICILIARIA	CHANG LAM, PATRICIA	AUXILIAR B
RC4	22:00	10:00	DOMICILIARIA	VERMIGLIO PARRA DEL RIEGO,	COPILOTO
RC1	22:00	10:00	DOMICILIARIA	BARRIENTOS MINAYA, ANGEL	COPILOTO
RP3	22:00	10:00	DOMICILIARIA	HERNANDEZ SAN MARTIN, EMILIO	PILOTO
RP1	22:00	10:00	DOMICILIARIA	LEON LAS HERAS, ROLANDO	PILOTO
RI2	22:00	10:00	DOMICILIARIA	MORALES SEABRA, CARLOS	ING. DE VUELO
RN	22:40	2:00	OPERATIVA	BALTA ESPINOZA, LILIAN	AUXILIAR C
RN	22:40	2:00	OPERATIVA	REJAS GLASS, JENNIFER KAREN	AUXILIAR C
FECHA : 02/09/2008					
RD	4:00	14:00	DOMICILIARIA	AGUIRRE MONTEVERDE, NADIA	AUXILIAR B
RH	5:00	13:00	OPERATIVA	TARAZONA LOPEZ, LOTTY	AUXILIAR C
RH	5:00	13:00	OPERATIVA	CHANG RODRIGUEZ, ROSSANA	AUXILIAR C
RD1	8:30	18:00	DOMICILIARIA	AGUIRRE MONTEVERDE, ROSA	AUXILIAR B
DS1	8:30	18:00	OPERATIVA	PINZAS TELLO, SILVIA	SUPERVISOR
RI1	10:00	22:00	DOMICILIARIA	SARDA MEDINA, MARCO HERNAN	ING. DE VUELO
RC2	10:00	22:00	DOMICILIARIA	CAFIERO EGO-AGUIRRE, HARCELO	COPILOTO
RC3	10:00	22:00	DOMICILIARIA	MARTELLO SARRIO, MARCO ANTONIO	COPILOTO
RO	10:00	13:00	OPERATIVA	SILVESTRI PEPEP, PAOLA	AUXILIAR C
RP2	10:00	22:00	DOMICILIARIA	DIAZ LASSUS, CARLOS	PILOTO
RD3	11:00	21:00	DOMICILIARIA	JUSTO GAMARRA, CLAUDIA	AUXILIAR B
RT	12:00	20:00	OPERATIVA	NAVARRO DE LOS SANTOS, MATILDE	AUXILIAR C
RT	12:00	20:00	OPERATIVA	SILVESTRI PEPEP, ALESSANDRA	AUXILIAR C
DS2	21:00	7:00	DOMICILIARIA	VALDIVIESO ISISOLA, JUAN	SUPERVISOR
RD2	21:00	7:00	DOMICILIARIA	HOCES MOSTACERO, ROSARIO	AUXILIAR B
RC4	22:00	10:00	DOMICILIARIA	DIAZ, SERGIO	COPILOTO
RC1	22:00	10:00	DOMICILIARIA	ARBULU LIENDO, HIGUEL	COPILOTO
RP3	22:00	10:00	DOMICILIARIA	SCHREIBER, ED.	PILOTO
RP1	22:00	10:00	DOMICILIARIA	LINARES CASTRO, CARLOS	PILOTO
RI2	22:00	10:00	DOMICILIARIA	CASTRO, FERNANDO	ING. DE VUELO
RN	22:40	2:00	OPERATIVA	OCAMPO GALDOS, PAMELA	AUXILIAR C
RN	22:40	2:00	OPERATIVA	RODRIGUEZ FIGUEROA, NICOLE	AUXILIAR C
FECHA : 03/09/2008					
RD	4:00	14:00	DOMICILIARIA	VASLLI VIEIRA, EDUARDO	AUXILIAR B
RH	5:00	13:00	OPERATIVA	CORNEJO MINO, CHRISTIAN PAOLO	AUXILIAR C
RH	5:00	13:00	OPERATIVA	RAMOS RAMIELLA, MARIELLA	AUXILIAR C
RD1	8:30	18:00	DOMICILIARIA	MURO IZQUIERDO, ELIAS	AUXILIAR B
DS1	8:30	18:00	OPERATIVA	VALDIVIESO ISISOLA, JUAN	SUPERVISOR
RI1	10:00	22:00	DOMICILIARIA	URBINA BELLINA, JORGE	ING. DE VUELO

Figura 5-12. Reporte de Reservas asignadas

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- 1 Los pasos establecidos por el método de asignación propuesto mediante descomposición en redes parciales proporcionan una estrategia para solucionar el problema de asignación de tripulación, posibilitando la descomposición del colosal problema inicial, en subpartes pseudo-independientes, lo cual facilita el tratamiento de cada versión reducida por métodos convencionales (p.ej. modelos de búsqueda, algoritmos genéticos y programación lineal) que son de libre consideración.
- 2 El modelo diseñado que se basa en el método de asignación elaborado, es sólo una opción de cómo se puede aplicar el método de asignación por descomposición en redes parciales, este modelo sigue la estrategia de descomposición desarrollada y para solucionar cada red parcial –que es la parte libre del método- utiliza un algoritmo voraz.
- 3 El programa que se ha construido implementa el modelo diseñado, y tiene la capacidad de procesar a la vez hasta 2000 vuelos y 800 itinerarios, pudiendo soportar los requerimiento de asignación de tripulación de una aerolínea de alcance medio, que realice cerca de

25 salidas al día (aprox.) desde su base. No obstante las restricciones y variables consideradas a efectos de probar el método propuesto son limitadas y se requeriría una implementación mayor del programa para incluir todas las que requiera una determinada aerolínea y que pueda ser aplicado adecuadamente.

- 4 La asignación de tripulación es un problema muy complejo de abordar, con gran cantidad de restricciones y variables a considerar, si bien el método elaborado es genérico, la implementación de soluciones basadas en él deben considerar, en la construcción del modelo de solución de cada red parcial elegido, todas las restricciones y variables del problema que son propias de cada aerolínea, tales como si se prefiere que cierto personal no realice determinadas rutas de vuelo, o si se tienen un acuerdo más beneficioso sobre los descansos del personal de vuelo, la particularización de la solución implementada es necesaria para obtener soluciones óptimas.
- 5 En el caso de grandes aerolíneas y grupos de filiales que tienen más de una base (como p.ej. LAN Airlines con filiales en Perú y Chile, e IBERIA L.A.E. con bases en Madrid y Barcelona), el método sigue siendo válido, pues la descomposición del problema en redes parciales es independiente de que exista una o muchas bases y la solución de cada red parcial es propia del modelo que implemente el método. Los modelos que se diseñen para problemas multi-base deben considerar aspectos tales como la base origen asociada a cada tripulante (para que regrese siempre a su base) y particularidades al seleccionar personal de vuelo si este sale de una base (particularidades laborales de cada filial).
- 6 El método de asignación desarrollado permite tratar el problema de

forma integrada, al descomponerlo en partes más reducidas, pseudo-independientes y por tanto más tratables, no siendo ya necesario realizar los 2 pasos del método clásico (generación de rotaciones y asignación de rotaciones al personal de vuelo), debido a que el método clásico sólo es una estrategia para reducir el problema por su colosal magnitud, y con el método planteado el problema ya se consigue reducir de forma óptima y suficiente, permitiendo aplicar estrategias de solución integrada en cada red parcial.

- 7 A nivel conceptual y según las investigaciones que se han realizado el método integrado es mejor que el método clásico de solución en 2 pasos, en nuestro caso la aplicación del método integrado se posibilita pero en cada red parcial, es decir en una parte del problema, mientras más vuelos con alta dependencia abarque la red parcial mayor será el grado de optimización conseguido. La red parcial está limitada por los recursos Hw/Sw que se dispongan y por el modelo de solución de redes parciales utilizado, dependiendo de ello debe fijarse el tamaño máximo de cada red parcial (el mayor posible) y considerar este límite al implementar la estrategia definida de descomposición del problema global.
- 8 Los tiempos de respuesta obtenidos con el programa implementado son considerablemente bajos, del orden de muy pocos minutos (en un computador con procesador Intel Centrino de 1,8GHz), pues el problema es descompuesto adecuadamente y cada parte es una versión muy reducida del problema. La memoria consumida por el programa es también mínima, cerca de 5 Mb de RAM. A nivel general el método de asignación por descomposición en redes parciales tiene tiempos considerablemente bajos, comparado con otras soluciones que implementan modelos que abarcan todos los vuelos del problema de una sola vez.

RECOMENDACIONES

- 1 El método propuesto en el presente trabajo es un punto de partida para implementar soluciones de asignación de tripulación, la parte de descomposición del problema global está definida pero la solución de cada red parcial no está restringida y es la parte libre del método. Deben probarse otros modelos de solución basados en el método propuesto que utilicen técnicas diferentes de optimización de cada red parcial, tales como los algoritmos genéticos y la programación lineal.
- 2 En la construcción de una solución para una determinada aerolínea, la solución de cada red parcial debe necesariamente considerar la particularidad de la compañía, por ejemplo en cuanto a las políticas laborales de beneficios que dispone el personal de vuelos (p. ej. si alguien vuela en Navidad el próximo año no le tocará), y su sistema de incentivos y pagos entre otros. Tener presente que cada aerolínea tiene sus particularidades y debe considerarse en el modelo de solución de cada red parcial.
- 3 Al momento de construir una solución basada en un modelo que implemente el método elaborado, se debe analizar la amplitud máxima que puede tener una red parcial, la cual es dependiente de los recursos Hw/Sw que se dispongan y de la estrategia de optimización de redes parciales –parte libre del método- en la que se base el modelo de solución. Mientras mayor sea la amplitud de la red parcial soportada, mejor será el rendimiento de la solución implementada.
- 4 Siendo que el método de asignación elaborado descompone el problema inicial en partes pseudo-independientes, y que cada parte es tratada por separado, sería posible que pueda también cada parte

procesarse en paralelo, utilizando tecnología middleware, es decir que se podría tener un conjunto de procesos de solución de redes parciales en uno o muchos computadores en los que se distribuyan las redes parciales generadas. Si esto fuera posible el tiempo de procesamiento sería aún menor, en el caso de grandes aerolíneas con volúmenes importantes de vuelos al día esto puede resultar algo muy importante. Investigar si es posible el procesamiento en paralelo de cada red parcial generada.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Tabla 7-1. Conceptos Claves y Términos

Conceptos y Términos	Claves	Significado
Aeronave (Aircraft)		Aeronave, avión.
Aeropuerto (Airport)		Lugar donde un vuelo comienza y termina.
Asignación (Assignment)		Aplicación del problema de asignación de tripulación.
Línea-de-trabajo anónima (bidline)		Cadena de servicios de vuelo generada durante el PAT o Problema de Asignación de Líneas-de-Trabajo de la Tripulación (CRP) de forma anónima, es decir sin tener en cuenta el programa esqueleto de los miembros de la tripulación. Las líneas-de-trabajo anónimas generadas son licitadas posteriormente por los miembros de la tripulación, pudiendo elegir, dependiendo de su escalafón, su programa de servicios para el periodo de planeamiento definido.

Conceptos y Términos	Claves	Significado
Sistemas de Oferta de Línea-de-Trabajo (Bidline Systems)		Una conocida aproximación a la programación de la tripulación en EE.UU., donde el escalafón individual de un miembro de la tripulación es considerado durante la asignación.
Reunión (Briefing)	informativa	Sesión informativa de los miembros de la tripulación donde se dan instrucciones previas al vuelo.
Cabina (Cabin)		Parte del avión donde los pasajeros están sentados durante la realización del vuelo, y donde trabaja la tripulación de cabina de pasajeros.
Auxiliar de cabina (Cabin attendant / CA)		La más baja posición de la tripulación, del personal de abordaje.
Tripulación de cabina (Cabin Crew)		Tripulación encargada del trato a los pasajeros, tanto en lo referente a su atención como a su seguridad, que puede consistir de varias funciones de la tripulación tales como: auxiliares de cabina, supervisores o pursers (sobre-cargos).
Capitán (Captain / CP)		Persona encargada de la seguridad del vuelo, la Tripulación así como también de los pasajeros mientras guía el avión desde el aeropuerto de salida hasta el de llegada.
Chef-de-Cabina (Chef-de-Cabin / CDC)		La más alta posición de la tripulación en una flota Boeing, para lo cual una degradación a auxiliar de cabina es posible. También se le llama Supervisor de cabina.

Conceptos y Términos	Claves	Significado
Cabina de Mando, Cabina del Piloto (Cockpit)		Parte frontal del avión donde trabaja la tripulación técnica (piloto, copiloto e ingeniero de vuelo).
Tripulación de Mando, Tripulación de Cabina del Piloto (Cockpit Crew)		Tripulación de abordó la cual está encargada de guiar el avión, puede consistir de al menos dos funciones de tripulación: capitán, primer oficial, y (opcionalmente) ingeniero de vuelo.
Duración de vuelo contratado (Contracted flight duration)		Cantidad de horas que un miembro de la tripulación es contratado para volar. Ejm.: 90 o 99 horas por mes.
Co-piloto (Co-pilot)		Lo mismo que primer oficial.
Tripulación (Crew)		Grupo de personal de vuelo que consiste de tripulación de cabina de mando y tripulación de cabina de pasajeros.
Problema de Asignación de la Tripulación / PAT (Crew Assignment Problem / CAP)		Segundo paso del Problema de Programación de la Tripulación (después del Problema de Rotación de la Tripulación) durante el cual piezas-de-trabajo tales como actividades de vuelo son asignadas. Igual a Problema de Asignación de Líneas-de-Trabajo (Rostering) de la Tripulación.
Funciones del Crew (Crew function)		Para la tripulación de cabina del piloto son capitán y primer oficial; una tripulación de cabina debe consistir de asistentes de cabina, supervisores o pursers (sobre-cargos).

Conceptos y Términos	Claves y Significado
Miembros del Crew (Crew member / CM)	Una persona a ser programada durante el problema de programación de la tripulación, posteriormente recibe un programa o lista de trabajo como su programa de tripulación individual.
NP-Duro / NP-Difícil (NP-Hard)	<p>Clasificación que se asocia a un problema teniendo en cuenta su complejidad computacional, NP es el acrónimo en inglés de <i>Polinómico no determinista</i> (Non-Deterministic Polynomial-time). Es el conjunto de problemas que pueden ser resueltos en tiempo polinómico por una máquina de Turing no determinista. Según su complejidad un problema NP puede ser: equivalente, fácil, duro o completo.</p> <p>Problemas NP-Duro son por ejemplo: el problema de parada, problema de la suma de conjuntos y problema de satisfacibilidad booleana.</p>
Problema de la Cadena de Aparejamientos de la Tripulación (Crew Pairing Chain Problem / CPCP)	Adicionalmente al problema de rotación de la tripulación, disponibilidades de la tripulación dependientes del tiempo y la localización son considerados desde el primer paso de la programación de la tripulación, mientras la carga de trabajo a ser asignada es dividida equitativamente entre todas las bases origen.

Conceptos y Términos	Claves	Significado
Problema de Rotación de la Tripulación / PRT (Crew Pairing Problem / CPP)		Primer paso del Problema de Programación de la Tripulación (antes Problema de Asignación de la Tripulación) durante el cual piezas-de-trabajo son creadas de entre las rutas de vuelo, la salida son líneas de trabajo anónimas para el paso de asignación.
Posición de la Tripulación (Crew position)		Igual a funciones de la Tripulación.
Problema de Recuperación de la Tripulación (Crew Recovery Problem / CRP)		Trata situaciones de interrupción en las cuales el programa original de la tripulación requiere varias modificaciones, importantes algunas veces, para mantener la operatividad de la aerolínea después del imprevisto acontecimiento.
Problema de Re-programación de la Tripulación (Crew Rescheduling Problem)		Igual a Problema de Recuperación de la Tripulación
Problema de Asignación de Líneas-de-Trabajo de la Tripulación (Crew Rostering Problem / CRP)		Problema de asignación de "líneas de trabajo" de la tripulación, las cuales se componen de servicios definidos para unos pocos días (de acuerdo al límite máximo de días de trabajo consecutivos). La misma abreviación es además aplicada para el Problema de Recuperación de la Tripulación.
Programa de la Tripulación (Crew Schedule)		Salida del problema de asignación de la tripulación que expresa la asignación de rutas de vuelo y actividades pre-programadas a miembros de la tripulación.

Conceptos Claves y Términos	Significado
Aproximaciones a la Programación de la Tripulación (Crew Scheduling Approaches)	Diferentes métodos de como el problema de programación de la tripulación, en particular el problema de asignación de la tripulación, es tratado en la práctica; las aproximaciones más conocidas son los sistemas "línea de oferta", "licitación preferencial", y "rol personalizado".
Problema de Programación de la Tripulación (Crew Scheduling Problem / CSP)	Determina el programa de vuelo publicado de una aerolínea, la tarea clave es asignar todos los miembros de la tripulación de cabina de piloto y de pasajeros necesarios, de tal modo que la aerolínea sea capaz de operar todos los vuelos al mínimo costo del personal; la asignación tiene que considerar todas las restricciones gubernamentales, convenios propios y reglas específicas de la empresa; adicionalmente la disponibilidad de la tripulación dependiente del tiempo y la ubicación tiene que ser considerada, en particular en un escenario donde el personal es dividido a múltiples "bases origen"; debido a su característica de problema NP-Duro, es descompuesto en dos pasos de programación de la tripulación.
Pasos de la programación de la tripulación (Crew scheduling steps)	El problema de programación de la tripulación es generalmente descompuesto en problema de rotación de la tripulación, y subsecuentemente el problema de asignación de la tripulación.

Conceptos Claves y Términos	Significado
Tránsito de Tripulación (Crew transit)	Lo mismo que tránsito.
Tipos de Tripulación (Crew types)	Cada miembro de la tripulación pertenece a la tripulación de cabina de pasajeros o a la tripulación de cabina de mando donde el o ella realizan una determinada función de la tripulación.
Traslado Aéreo, Traslado (Deadhead / Deadheading)	Un miembro de la tripulación viaja como pasajero de la aerolínea analizada, en orden a realizar un vuelo asignado, en tanto que tránsitos aéreos que no son <i>traslados</i> son manejados por otra empresa. Generalmente van de regreso a sus bases y ya no están en funciones.
Interrogatorio (Debriefing)	Sesión de interrogatorio a los miembros de la tripulación al finalizar el vuelo.
Bajar de Rango / Degrado (Downgrading)	Aplicado en la programación de la tripulación de las aerolíneas muy frecuentemente. De acuerdo a una jerarquía claramente definida entre las funciones de la tripulación, por ejm.: cuando un capitán hace de primer oficial, pero no a la inversa, de forma similar ocurre para la tripulación de cabina de pasajeros.

Conceptos y Términos	Claves	Significado
Programa (fingerprint)	esqueleto	Línea de trabajo donde sólo las actividades pre-programadas son asignadas, muestra la disponibilidad de un miembro de la tripulación para el periodo de programación. Se compone de las actividades pre-programadas que un miembro de la tripulación debe acometer sin excepción, tales como: vacaciones, permisos solicitados y concedidos, oficina, simuladores, entrenamiento, exámenes médicos, etc. Dichas actividades así llamadas 'fingerprint' son generalmente definidas previamente al proceso de programación, servicios de vuelo que se solapen con ellas no son permitidos.
Primer Oficial (First Officer / FO)		Segundo más alto rango en la jerarquía de la tripulación de cabina de mando.
Itinerario de Vuelo (Flight)		Generalmente llamado vuelo. Una secuencia de rutas de vuelo ofrecidas por la aerolínea, por ejm.: desde una aeropuerto de salida vía otro al aeropuerto destino.
Actividades de vuelo (Flight activity)		Implica todos los tipos de piezas-de-trabajo a ser consideradas durante la programación, ej.: rutas de vuelo, servicios de vuelo; para la Programación orientada al Equipo: actividades de vuelo compartidas.
Personal de Vuelo (Flight Crew)		Lo mismo que Personal de abordó.

Conceptos y Términos	Claves	Significado
Servicio de Vuelo (Flight duty / FD)		Representa una serie de rutas de vuelo que pueden ser servidas por un miembro de la tripulación dentro de un día de trabajo (24 horas); está rodeado (antes y después) por periodos de descanso.
Tiempo del Servicio de Vuelo (Flight duty time)		La suma de los tiempos de vuelo de una rotación (pairing), el tiempo gastado en alcanzar tierra entre dos rutas sucesivas y el tiempo requerido para el briefing y debriefing.
Ingeniero de Vuelo (Flight engineer / FE)		Tercera posición de la tripulación, del personal de cabina de mando el cual es raramente aplicado en la actualidad.
Ruta de Vuelo (Flight leg)		Representa un tránsito aéreo sin parada (enlace) desde un aeropuerto de salida a su correspondiente aeropuerto destino.
Volar-bajo de-rango (Fly-below-rank)		Lo mismo que degradado (degrado)
Base origen (Home base / HB)		Aeropuerto donde los miembros de la tripulación están estacionados; usualmente es el cierre para su domicilio de origen; cada miembro de la tripulación tiene sólo una base de origen donde todas las 'rotaciones' inician y terminan.

Conceptos y Términos	Claves	Significado
Red Centralizada (Hub-and-Spoke network)		Topología de red usualmente encontrada en EE.UU donde pequeños aeropuertos son enlazados con aeropuertos principales (llamados hubs); los hubs son conectados directamente, como en una red punto-a-punto.
Línea-de-trabajo (Line-of-work)		Representa un potencial itinerario de la tripulación, para un miembro de la tripulación dedicado durante el periodo de programación (usualmente 2 o 4 semanas). Consiste de servicios de vuelo asignados compatibles con el "programa esqueleto", incorporando además todas las reglas del gobierno, la compañía y convenios propios así como también la historia de trabajo individual del miembro de la tripulación y la duración restante del vuelo
Día libre (Off-day)		Día dentro del programa donde no hay actividad de vuelo asignada. Día que no es de trabajo con algún adicional requerimiento en el momento que el servicio del día previo finaliza o en el inicio del siguiente día.
Tripulación de abordo (Onboard crew)		Lo mismo que Tripulación.
Costo operacional (Operational cost)		Está compuesto por el salario de la tripulación, noches de hotel, y gastos por tránsito de la tripulación.

Conceptos Claves y Términos	Significado
Fase de operaciones (Operations phase)	El Problema de Recuperación de la Tripulación tiene que ser resuelto para el periodo directamente de la ocurrencia de una interrupción (ejm.: ausencia de la tripulación, etc.), el cual es generalmente muy corto ejm.: horas o días.
Aparejamiento o rotación (Pairing or rotation)	Es básicamente una secuencia de servicios de vuelo (pieza-de-trabajo), que inician y terminan en la base origen del miembro de la tripulación. Su duración máxima está limitada por una cota superior dada, ejm.: cinco días laborables. Una secuencia de rutas de vuelo (vuelos) que podrían ser tomadas por un individual miembro de la tripulación.
Generación de Rotaciones (Pairing generation)	Aplicación del problema de rotación de la tripulación.
Rol personalizado (Personalized rostering)	Una conocida aproximación a la programación de la tripulación en Europa donde el rol individual de un miembro de la tripulación es construido basado en una parte de carga trabajo justa-e-igual sin considerar el escalafón durante la asignación.

Conceptos y Términos	Claves	Significado
Pieza-de-trabajo (Piece-of-work)		La más pequeña unidad considerada para el problema analizado, ejm.: una ruta de vuelo para el problema de rotación de la tripulación, una rotación para el problema de asignación de la tripulación, y una actividad de vuelo compartida para el Problema de Programación orientada al Equipo.
Piloto (Pilot)		Lo mismo que capitán.
Periodo de Planeamiento (Planning period)		Periodo de tiempo considerado durante la programación de la tripulación; generalmente 14 días a un mes.
Fase de Planeamiento (Planning phase)		El Problema de Programación de la Tripulación es solucionado para el periodo de planeamiento varias semanas o días por delante de su ejecución.
Red Punto-a-punto (Point-to-point network)		Topología de red usualmente encontrada en Europa donde teóricamente todas las rutas de vuelo son factibles entre todos los aeropuertos involucrados.
Sistemas de Licitación Preferencial (Preferential bidding systems / PBS)		Una conocida aproximación a la programación de la tripulación en EE.UU., donde las preferencias individuales de los miembros de la tripulación son considerados junto con su escalafón durante la asignación.
Actividades pre-programadas (pre-scheduled activities)	pre- (pre-scheduled activities)	Representan actividades que un miembro de la tripulación a de realizar sin excepción, tales como: vacaciones, permisos solicitados y concedidos, oficina, simuladores, entrenamiento, exámenes médicos, etc.

Conceptos y Términos	Claves	Significado
Supervisor (Purser / PU)	(sobre-cargo)	La más alta posición de la tripulación en una flota de Airbus. Hay un 'degrado' factible para trabajar también como un 'chef-de-cabin', así como también de 'auxiliar de cabina'.
Periodo de Recuperación (Recovery period)		Periodo de tiempo considerado durante el problema de recuperación de la tripulación; generalmente mucho más corto que el periodo de planeamiento, por ejm.: varias horas o días.
Periodos de descanso (Rest periods)		Periodo de tiempo sin asignaciones a ser consumido al menos entre actividades de vuelo consecutivas; la duración del tiempo libre depende, por ejemplo, del inicio de la ruta de vuelo y el número de vuelos servidos.
Rol (Roster)		Lo mismo que pieza-de-trabajo.
Asignación de "líneas de trabajo" (Rostering)		Lo mismo que asignación.
Bucle de programación (Rostering loop)		Describe una ejecución repetida de un procedimiento de programación propuesto para dirigir la Programación orientada al Equipo.
Programa (Schedule)		Lo mismo que programa de la tripulación.
Actividades programadas (Scheduled activities)		Lo mismo que actividades pre-programadas.
Periodo de Programación (Scheduling period)		Lo mismo que periodo de planeamiento.

Conceptos y Términos	Claves	Significado
Escalafón (Seniority)		Un indicador general para el lapso de tiempo que un miembro de la tripulación ha pasado trabajando para la aerolínea; puede además ser influenciado por ejm.: por el idioma o el conocimiento regional.
Problema de Cobertura del Conjunto (Set Covering Problem)		Formulación matemática del programa la cual define que todas las restricciones son al menos cubiertas, en nuestro caso: todas las actividades de vuelo son cubiertas, mientras el traslado aéreo es permitido.
Problema de Particionamiento del Conjunto (Set Partitioning Problem)		Formulación matemática del programa la cual insiste en que todas las restricciones de vuelo son exactamente cubiertas como es requerido, en nuestro caso: todas las actividades de vuelo son divididas entre todos los miembros de la tripulación.
Actividades de Vuelo Compartidas (Shared Flight Activities / SFA)		Una pieza-de-trabajo considerada para el Problema de Programación orientada al Equipo la cual es servida por un equipo de miembros de la tripulación sin ningún cambio de equipo. Puede ser una simple o múltiple ruta de vuelo.
Rol esqueleto (Skeleton roster)		Lo mismo que Programa esqueleto.
Estar parado (Stay-over)		Periodo de descanso que un miembro de la tripulación pasa fuera de la base. Las paradas son necesarias debido al límite superior que existe en el periodo de servicio de un miembro de la tripulación.

Conceptos y Términos	Claves	Significado
Estar en servicio de reserva o imaginaria (Stand-by)		Periodo de tiempo en el que un miembro de la tripulación ha de estar cerca de la base y listo para realizar una asignación, si es necesario, dentro de una hora de notificada.
Duración del vuelo objetivo (Target flight duration)		Periodo de tiempo determinado que debería ser asignado a los miembros de la tripulación para alcanzar una parte justa de carga de trabajo.
Equipo (Team)		Un grupo de dos o más personas, en nuestro caso: miembros de la tripulación.
Cambio de equipo (Team change)		Ocurre si al menos un miembro de la tripulación es programado a servir la próxima actividad de vuelo junto con una composición de equipo diferente (otros colegas).
Penalización de Cambio de Equipo (Team change penalty)		Prueba a evaluar una dedicada combinación de rol analizada, de acuerdo al tipo de cambio de equipo y al grado de cambio de equipo encontrado; puede ser calculado por ejm.: sumando los productos de valores de penalidad fijados y las veces de su ocurrencia.
Tipo de Cambio de Equipo (Team change type)		Un cambio de equipo puede ser tipificado de acuerdo al momento (durante el día, entre servicios de vuelo, etc.) y localización (ejm.: fuera de la base origen) de su ocurrencia.
Grado de Cambio de Equipo (Team change degree)		Para más de dos miembros de la tripulación, un cambio de equipo puede ser tipificado de acuerdo a la separación de su grupo.

Conceptos Claves y Términos	Significado
Composición del Equipo (Team composition)	Está constituida como un conjunto de funciones de la tripulación las cuales (entre otras exigencias) representan un equipo que tiene que servir conjuntamente para la aerolínea.
Aproximación a la Construcción de Equipos (Team construction approach)	Un método de como los equipos son contruidos; hay tres tipos mencionados: equipos pre-definidos, equipos pre-seleccionados, y libre construcción de equipos.
Orientación al Equipo (Team orientation)	Pone énfasis en la consideración de la estabilidad del equipo para el problema de programación de la tripulación; los principales beneficios esperados son la mayor seguridad y satisfacción de la tripulación.
Estabilidad del Equipo (Team stability)	Alcanzable por el mantenimiento de la misma composición de equipo juntos para un determinado periodo de tiempo, generalmente por varios días; puede ser implementada por ejem.: minimizando la cantidad de cambios de equipo encontrados durante el periodo de programación.
Rostering orientado al Equipo (Team-oriented Rostering)	Aplicación del Problema de Asignación de "líneas de trabajo" (rosters) orientada al Equipo.

Conceptos y Términos	Claves	Significado
Problema de Rostering orientado al Equipo (Team-oriented Rostering Problem / ToRP)		Busca un apropiado conjunto de roles individuales "líneas de trabajo" (un rol para cada miembro de la tripulación) tal que todos los vuelos dados sean cubiertos apropiadamente mientras una determinada estabilidad del equipo es alcanzada.
Programación orientada al Equipo (Team-oriented Scheduling)		Aplicación del Problema de Programación orientada al Equipo.
Problema de Programación orientada al Equipo (Team-oriented Scheduling Problem)		Problema de programación de la tripulación de personal de vuelo para el cual un determinado grado de orientación al equipo es demostrado.
Red Espacio-Tiempo (Time-space network)		Técnica de modelamiento de redes que considera el tiempo y la localización del elemento analizado.
Espacio de Tiempo de Llegada (Slot de llegada)		Es el intervalo de tiempo del que dispone una aeronave para tomar tierra y realizar su arribo al aeropuerto.
Transbordo (Transfer)		Lo mismo que tránsito de Tripulación.

Conceptos y Términos	Claves y Significado
Tránsito (Transit)	Ocurre si la ubicación dependiente del tiempo de un miembro de la tripulación no es igual a la próxima ubicación programada, un pre-tránsito es necesario en el caso de que esta re-ubicación es requerida en el momento con antelación a la próxima ruta de vuelo programada, un post-tránsito para su ocurrencia satisfactoria es generalmente realizado vía transporte público (por ejm.: autobús, taxi o tren), o <i>traslado aéreo</i> .
Tiempo de descanso semanal (Weekly rest time)	Tiempo de descanso después de una semana de trabajo, por ejm.: cinco días consecutivos.

BIBLIOGRAFÍA

[ANB 91] Anbil R., Gelman E., Patty B., Tanga R. "Recent Advances in Crew-Pairing Optimization at American Airlines". *Interfaces*, 21(1):62–74, 1991.

[FRE 01] Freling R, Lentink RM, Wagelmans APM, "A Decision Support System for Crew Planning in Passenger Transportation using a Flexible Branch-and-Price Algorithm", 2001.

[GAN 98] Gang Yu, Jian Yang, "Optimization Applications in the Airline Industry", 1998.

[GER 89] Gershkoff, I., "Optimizing Flight Crew Schedules," *Interfaces*, 19:4, 1989, pp. 29-43.

[GRA 93] Graves, G., McBride, R., Gershkoff, I., Anderson, D., and Mahidhara, D., "Flight Crew Scheduling," *Management Science*, 39:6, 1993, pp. 736-745.

[KER 02] Kerati S., El Moudani W, de Coligny M., Mora-Camino F., "A Heuristic Genetic Algorithm Approach for The Airline Crew Scheduling Problem", 2002.

[LAW 82] Lawler, E.L., Lenstra, J.K., and Rinnooy Kan, A.H.G., "Recent
184

Developments in Deterministic Sequencing and Scheduling: A Survey," in M.A.H. Dempster, J.K. Lenstra, and A.H.G. Rinnooy Kan (eds.) *Deterministic and Stochastic Scheduling*, The Netherlands, Reidel/ Kluwer Dordrecht, 1982.

[VAM 91] Vasquez-Marquez, A., "American Airlines Arrival Slot Allocation System (ASAS)," *Interfaces*, 21:1, 1991, pp. 42-61.

[SEP 07] SEPLA, "El Ministro de Inmigración francés minimiza la oposición sindical en Air France a los vuelos de deportados," http://www.sepla.es/news/archives/2007_07_12.php, 2007.

[YUF 05] Yufeng Guo, "Decisión Support Systems for Airline Crew Recovery", 2005.

ANEXOS

ANEXO A: CODIFICACIÓN DEL PROGRAMA

Se incluye el código de las rutinas principales del programa método de redes, que implementa el método desarrollado de asignación de tripulación por redes parciales.

Tabla 9-1. Codificación del Programa Asignación Método de Redes

```
metred_proc_redparcial()
{
    int n_redes=0,an_nod,n_itera,i_band_seguir; //Control de iteraciones y nodos de la red
    .
    .
    struct str_red_kpis saux_red_kpis; //KPIs de c/iteracion de la red parcial en proceso
    (auxiliar)

    log_run(INF_MSG,"metred_proc_redparcial","Programacion de Tripulacion y Reservas -
    Inicio");
    log_run(INF_MSG,"metred_proc_redparcial","Para el Periodo [%ld-%04d]-[%ld-
    %04d]",d_prp->f_ini,d_prp->h_ini,d_prp->f_fin,d_prp->h_fin);
    .
    .
    do {
        if (redparcial_next(s_mgrred) != GOOD) {
            log_run(CRI_MSG,"metred_proc_redparcial","Error al generar red parcial, error
            [%d]",EXIT_ERROR);
            redparcial_done(s_mgrred);
        }
    } while (1);
}
```

```

return(BAD);
}
if (s_mgrred.nvred>0) {
.
.
n_redes++;

////////////////////////////////////
//Proceso Principal de Red Parcial - Inicio //
////////////////////////////////////
//Se salvan estado actual previo al inicio del proceso de la red parcial (valores de
tripulantes, localizacion, estado de la asignacion global)
rp_salvar_estado_act(s_rp_bak_state);

//Inicializa memoria de tripulantes seleccionados, debe descartar los ya utilizados!
//Lista de datos del tipo: (vuelo-de-base, trip_asignado). Solo se exploran las
alternativas en la base
// (los demas destinos no tienen muchas posibilidades -podrian salvarse
adicionalmente los destinos con mas tripulantes-)
rp_ini_trip_selec(s_rp_tri_ctrl,s_mgrred.s_redtree);
.
.
n_itera=0;
do {
n_itera++;

log_run(INF_MSG,"metred_proc_redparcial","Red parcial [%03d-%02d] generada,
nro. de vuelos [%d] (Tripulantes: %03d)",
n_redes,n_itera,s_mgrred.nvred,nd_tri-s_rp_tri_ctrl.nrp_trisel);
redparcial_tree_prnnodes("metred_proc_redparTREE",s_mgrred.s_redtree);
.
.
if (proc_redparcial(s_mgrred.s_redtree,0,0,0,0,f_iresind,h_iresind) != GOOD) {
return(BAD);
}

//Actualizar tripulantes seleccionados (c/iteracion descarta los ya utilizados
reduciendo el universo de tripulantes)
rp_act_trip_selec(s_rp_tri_ctrl,s_rp_bak_state);

```

```

//Evaluar solucion de red parcial - Funcion Objetivo
rp_eval_redparcial(s_mgrred,saux_red_kpis,0);

//Verificar si se ha encontrado una mejor solucion
if          ((n_itera          ==          1)          ||
rp_comp_sol(saux_red_kpis,s_rp_bak_state.s_rp_mejor_sol.s_red_kpis) > 0)) {
    //La 1ra vez siempre se salva la solucion encontrada!
    rp_act_sol_redparcial(s_rp_bak_state.s_rp_mejor_sol,saux_red_kpis);
}

i_band_seguir=0;
if (rp_exist_trip_noselec(s_rp_tri_ctrl)) { //Aun quedan tripulantes sin seleccionar!
    rp_restaura_estado_act(s_rp_bak_state); //Recupera datos iniciales, se continua
la busqueda
    i_band_seguir=1;
}
}
while (i_band_seguir);

//Actualiza Red Parcial con Mejor Solucion encontrada y KPIs
rp_set_sol_redparcial(s_rp_bak_state.s_rp_mejor_sol,saux_red_kpis);
show_destri();
////////////////////////////////////
//Proceso Principal de Red Parcial - Fin //
////////////////////////////////////

}
}
while (s_mgrred.nvred>0); // while ((s_mgrred.nvred>0) && (n_redes<40));
.
.
log_run(INF_MSG,"metred_proc_redparcial","Programacion de Tripulacion y Reservas -
Fin");

metred_eval_red("metred_eval_redglobal",s_mgrred,saux_red_kpis,1);
.
.
return(GOOD);
}

```

```

proc_run()
{
if ((c_dvue.vue_fhsal_ini() != GOOD) || (c_dvue.vue_fhiope_ini() != GOOD)) {
    log_run(CRI_MSG,"proc_run","Error al preparar vuelos, error [%d]",EXIT_ERROR);
    return(BAD);
}
if (c_ddes.des_tri_ini() != GOOD) {
    log_run(CRI_MSG,"proc_run","Error al preparar destinos, error [%d]",EXIT_ERROR);
    return(BAD);
}
show_destri();
if (c_dind.ind_fhini_ini() != GOOD) {
    log_run(CRI_MSG,"proc_run","Error al preparar indisposiciones, error
[%d]",EXIT_ERROR);
    return(BAD);
}

if (c_drsv.rsv_hini_ini() != GOOD) {
    log_run(CRI_MSG,"proc_run","Error al preparar reservas, error [%d]",EXIT_ERROR);
    return(BAD);
}

if (metred_proc_redparcial() != GOOD) {
    log_run(CRI_MSG,"proc_run","Error al generar red parcial, error [%d]",EXIT_ERROR);
    return(BAD);
}

return(GOOD);
}

```

```

// FUNCTION: WndProc(HWND, UINT, WPARAM, LPARAM)
// PURPOSE: Procesa mensajes de la ventana principal.
// WM_PAINT - Pinta la ventana principal
// WM_DESTROY - envia un mensaje de terminacion y retorna
LRESULT CALLBACK WndProc(HWND hWnd, UINT message, WPARAM wParam,
LPARAM lParam)
{
    PAINTSTRUCT ps;
    HDC hdc;
    TCHAR greeting[] = _T("Proceso de Programacion del Rol de la Tripulación y

```

```

Reservas....\n");
.
.
time_ini(tiempo);
.
.
inicializar(GetCommandLine()); //Esta rutina no admite errores!!!
log_ini();
log_run(INF_MSG,"main","Inicio del Programa MetRed.exe");

if (load_data() != GOOD) {
    EXIT_ERROR=3;
    log_run(CRI_MSG,"main","Error al cargar datos");
    .
    .
    break;
}

if (proc_run() != GOOD) {
    EXIT_ERROR=6;
    log_run(CRI_MSG,"main","Error al procesar datos");
    .
    .
    break;
}

if (unload_data() != GOOD) {
    EXIT_ERROR=4;
    log_run(CRI_MSG,"main","Error al descargar datos");
    .
    .
    break;
}

salir();
log_run(INF_MSG,"main","Fin del Programa MetRed.exe");
time_done(tiempo);
PostQuitMessage(0);
.
.

```

```

return 0;
}

#include "stdafx.h"
#include <windows.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <tchar.h>

#include "metred.h"
.
.
HINSTANCE hInst;

// Declaracion de funciones incluidas en este modulo:
LRESULT CALLBACK WndProc(HWND, UINT, WPARAM, LPARAM);

int APIENTRY WinMain(HINSTANCE hInstance,HINSTANCE hPrevInstance,LPSTR
lpCmdLine,int nCmdShow)
{
    WNDCLASSEX wcex;
    .
    .
    wcex.lpfnWndProc = WndProc;
    wcex.hInstance = hInstance;
    .
    .
    if (!RegisterClassEx(&wcex))
    {
        MessageBox(NULL,_T("Call to RegisterClassEx failed!"),_T("Fin del Programa
MetRed.exe"),NULL);
        return 1;
    }

    hInst = hInstance; // Almacena handle de instancia en nuestra variable global
    .
    .
    HWND hWnd =
CreateWindow(szWindowClass,szTitle,WS_OVERLAPPEDWINDOW,CW_USEDEFAULT,
CW_USEDEFAULT,500,100,NULL,NULL,hInstance,NULL);

```

```

.
.
// Los paarametros para ShowWindow son:
// hWnd: el valor retornado de CreateWindow
// nCmdShow: el 4to parametro de WinMain
ShowWindow(hWnd,nCmdShow);
UpdateWindow(hWnd);

// Loop de mensajes principal:
MSG msg;
while (GetMessage(&msg, NULL, 0, 0))
{
    TranslateMessage(&msg);
    DispatchMessage(&msg);
}

return (int) msg.wParam;
}

```

Tabla 9-2. Codificación de Descomposición en Redes Parciales

```

redparcial_ini(struct str_mgrred &vstr_mgrred, long f_ired, int h_ired, long f_fred, int h_fred,
int nvr_min=MIN_VUERED, int nvr_max=MAX_VUERED)
{
.
.
if ((nvr_min > nvr_max) || (nvr_max > MAX_VUERED) || (nvr_min < MIN_VUERED)) {
    EXIT_ERROR=1;
    return(BAD);
}
vstr_mgrred.nvr_min = nvr_min;
vstr_mgrred.nvr_max = nvr_max;
vstr_mgrred.overflow_ctrl = RED_VUE_GEN_OK;
vstr_mgrred.s_redtree.n_nod = 0;
.
.
vstr_mgrred.vi_f_iope = f_ired; vstr_mgrred.vi_h_iope = h_ired; //Inicio de la red. Necesario
para "redparcial_next"...!!!

```

```

.
.
vstr_mgrred.lv_fhiope_tip=(int *)malloc(nd_vue*sizeof(int ));
vstr_mgrred.lv_fhiope_can=(int *)malloc(nd_vue*sizeof(int ));
.
.
//Inicialmente 'lv_fhiope_tip' esta seteado a RED_VUE_TIPO_NUL
memset(vstr_mgrred.lv_fhiope_tip,0,nd_vue*sizeof(int )); //Seteo por defecto!!!

return(GOOD);
}

```

```

redparcial_done(struct str_mgrred &vstr_mgrred)
{
free(vstr_mgrred.lv_fhiope_can);
free(vstr_mgrred.lv_fhiope_tip);
.
.
return(GOOD);
}

```

```

//Obtiene los vuelos que conforman una Red Parcial a partir de la lista ordenada de vuelos
No-Procesados (NUL) y fh_ini
//Se recibe tambien datos de la amplitud de la Red Parcial
redparcial_nextrecursivo(struct str_mgrred &vstr_mgrred, int vprinc, int nivel_recur)
{
.
.
int      l_vred_opt[MAX_VUERED],nvprinc_opt,l_vred_nre[MAX_VUERED],nvprinc_nre;
//Listas temporales de vuelos OPT y NRE

vprinc_tip = vstr_mgrred.lv_fhiope_tip[vprinc]; //Solo puede ser OBJ u OPT...!!!
nvprinc_opt=0; nvprinc_nre=0;

if (vstr_mgrred.nvred > 1) { //El 1er vuelo OBJ no tiene OPT ni NRE
desi_vprinc = vue_des_ini(vue_fhiope[vprinc]);
vue_ini_ope(vue_fhiope[vprinc],f_iope_vprinc,h_iope_vprinc);

for (i=0;i<vstr_mgrred.nvred_can;i++) { //Logica compuesta para OPTs y NREs a la
vez...!!!

```

```

i_desf = vue_des_fin(vue_fhiope[vstr_mgrred.lv_fhiope_can[i]]);
.
.

if (i_desf == desi_vprinc) {
    vue_fin_ope(vue_fhiope[vstr_mgrred.lv_fhiope_can[i]],i_f_fope,i_h_fope);
    if (comp_fh(i_f_fope,i_h_fope,f_iope_vprinc,h_iope_vprinc) <= 0) {
        //OPT: Si llega al destino de salida del vuelo principal y antes de que este
salga
        l_vred_opt[nvprinc_opt++] = vstr_mgrred.lv_fhiope_can[i];
    } //OPT
}
else if (comp_fh(i_f_iope,i_h_iope,vstr_mgrred.vi_f_iope,vstr_mgrred.vi_h_iope) >
0) {
    if ((vstr_mgrred.lv_fhiope_tip[vstr_mgrred.lv_fhiope_can[i]] !=
RED_VUE_TIPO_NRE) &&
        (comp_fh(i_f_iope,i_h_iope,f_iope_vprinc,h_iope_vprinc) <= 0)) {
        //NRE: Si sale del destino de salida del vuelo principal y antes de que este
salga
        l_vred_nre[nvprinc_nre++] = vstr_mgrred.lv_fhiope_can[i];
    } //NRE
}
}
if ((vstr_mgrred.nvred + nvprinc_opt + nvprinc_nre) > vstr_mgrred.nvr_max) { //Se
superaria el Limite
    vstr_mgrred.overflow_ctrl = RED_VUE_GEN_OVERFLOW; //Se establece el control
de salida por OverFlow
    return(GOOD); // Se devuelve OK antes de superar el Limite (aun no se ha
superado!)
}

// Agregar vuelos a la lista y marcarlos como NRE
for (i=0;i<nvprinc_nre;i++) { //Al final se tiene: vstr_mgrred.nvred += nvprinc_nre;
.
.
//Arbol

vstr_mgrred.s_redtree.nodos[vstr_mgrred.s_redtree.n_nod].red_tip=RED_VUE_TIPO_NRE;

vstr_mgrred.s_redtree.nodos[vstr_mgrred.s_redtree.n_nod].ipos_fhiope=l_vred_nre[i];
vstr_mgrred.s_redtree.n_nod++; //No se sobre-escriben los NREs

```

```

}

// Agregar vuelos a la lista y marcarlos como OPT
.
.

for (i=0;i<nvprinc_opt;i++) { //Proceso de OPTs
    //Arbol

    vstr_mgrred.s_redtree.nodes[vstr_mgrred.s_redtree.n_nod].red_tip=RED_VUE_TIP
O_OPT;

    vstr_mgrred.s_redtree.nodes[vstr_mgrred.s_redtree.n_nod].ipos_fhiope=l_vred_opt[i
];

    vstr_mgrred.s_redtree.n_nod++;

    if (redparcial_nextrecursivo(vstr_mgrred,l_vred_opt[i],nivel_recur+1) != GOOD) { //Se
superaría el Limite
        return(BAD); // Se devuelve error antes de superar el Limite (aun no se ha
superado!)
    }
    .
    .
}
}

if (vprinc_tip == RED_VUE_TIPO_OBJ) { // Sino sería OPT y no se hace nada!
    // Seleccionar vuelo siguiente (OBJ)
    idv_sig = iti_vue_sgt(vue_fhiope[vprinc]); // vuelo siguiente del itinerario de 'vprinc'.
Necesitamos su id en 'vue_fhiope'
    .
    .
    if (idv_sig > 0) { // Siguiendo vuelo del itinerario de 'vprinc'. Nunca sería '0' un vuelo
siguiente!
        .
        .
        cambio_iti = 0; //Se continúa en el mismo itinerario!
    }
    else { // 1er vuelo en destino final con salida inmediata-posterior a 'vprinc'
        .
        .
    }
}

```

```

        idv_sig = vstr_mgrred.lv_fhiope_can[i];
        cambio_iti = 1; //Se continua con otro itinerario (cambio de
itinerario)!
        break;
    .
    .
    }
    if (idv_sig > 0) { //Si se ha seleccionado vuelo siguiente...!!!. Nunca seria '0' un vuelo
siguiente!
        if (cambio_iti == 1) {
            //Backup, punto de retorno para revertir si OverFlow.
            //La red parcial solo contiene itinerarios completos en caso de OverFlow se
elimina el ultimo itnerario
            //Hasta aqui Res Actual OK y se empieza la siguiente (se sobre-escibe
'alv_fhiope_tip')
            //Arbol
            an_nod = vstr_mgrred.s_redtree.n_nod; //con el numero de nodos es
suficiente pues se ha linealizado
        }
        //Arbol actualizar
        ai_pos = redparcial_tree_pos(vstr_mgrred.s_redtree,vprinc);
        .
        .
        vstr_mgrred.s_redtree.nodes[ai_pos].red_tip=RED_VUE_TIPO_BBN;

        vstr_mgrred.s_redtree.nodes[vstr_mgrred.s_redtree.n_nod].red_tip=RED_VUE_TIP
O_OBJ;
        .
        .

        vstr_mgrred.s_redtree.nodes[vstr_mgrred.s_redtree.n_nod].ipos_fhiope=idv_sig;
        vstr_mgrred.s_redtree.n_nod++;

        if (redparcial_nextrecursivo(vstr_mgrred,idv_sig,1) != GOOD) {
            return(BAD);
        }
        else { //Debe devolverse GOOD pues la Red Actual esta Ok y ha fallado la
siguiente...!!!
            if (vstr_mgrred.overflow_ctrl == RED_VUE_GEN_OK) {
                return(GOOD);
            }
        }
    }
}

```

```

}
else if (vstr_mgrred.overflow_ctrl == RED_VUE_GEN_OVERFLOW) {
    // La ultima ampliación de la red desborda el limite soportado
    .
    .
    if (cambio_iti == 1) {
        //Se supera el limite de tamaño de red parcial se eliminan vuelos incorporados del
        último itinerario.
        //La red parcial solo contiene itinerarios completos!
        .
        .
        //Arbol
        vstr_mgrred.s_redtree.n_nod = an_nod; //No se sobre-escriben los NREs, basta
        con actualizar el numero de nodos!
        vstr_mgrred.overflow_ctrl = RED_VUE_GEN_OK; //Se devuelve OK
    }
    return(GOOD); //Se propaga RED_VUE_GEN_OVERFLOW hasta (cambio_iti ==
1)...!!!
}
else {
    EXIT_ERROR=9;
    return(BAD);
}
}
}
return(GOOD);
}

```

*//Obtiene la siguiente Red Parcial. Vuelos Objetivo (**OBJ**), Backbone (**BBN**), a Optimizar (**OPT**) y No-relevantes (**NRE**) -que se alejan-*

//Inicializa la creacion de la Red Parcial con el 1er Vuelo Objetivo y llama a un 'recursivo' pasandolo como parametro

redparcial_next(struct str_mgrred &vstr_mgrred)

```
{
```

```
.
```

```
.
```

vstr_mgrred.overflow_ctrl = RED_VUE_GEN_OK; //Inicialmente: Todo Ok!. No relevante a este nivel pero si para el "nextrecursivo"....!!!

vstr_mgrred.s_redtree.n_nod=0; //Inicialmente no hay elementos en el Arbol de la Red

```

//Lista ordenada de vuelos por 'fh_iope' (no por 'fh_sal'), con: (fh_iope >= fh_ired)
vstr_mgrred.nvred_can=0;
for (i=0;i<nd_vue;i++) {
    vue_ini_ope(vue_fhiope[i],af_iope,ah_iope); //Los vuelos estan ordenados en
'vue_fhiope'
    if (comp_fh(vstr_mgrred.vi_f_iope,vstr_mgrred.vi_h_iope,af_iope,ah_iope) <= 0) {
//La 1ra vez (vi_fh_iope == fh_ini)...!!!
        .
        .
        vstr_mgrred.lv_fhiope_can[vstr_mgrred.nvred_can++]=j; //Se almacena la
posicion del vuelo en 'vue_fhiope'. Nuestra Lista de Trabajo...!!!
        //Blanquear tipo de vuelo, deben empezar en '0'...!!!
        vstr_mgrred.lv_fhiope_tip[j]=RED_VUE_TIPO_NUL; //Seteamos
'lv_fhiope_can'/'lv_fhiope_tip' a RED_VUE_TIPO_NUL
        .
        .
    }
    if (vstr_mgrred.nvred_can == 0) { //Si no hay vuelos candidatos (por su 'fh_iope' o porque
ya son optimizados en otra red)
        return(GOOD); //Hasta aqui: nvred=0;
    }

//Seleccionamos el 1er vuelo de la red. El primero en salir
// El 1ro es OBJ...!!!
//Arbol
vstr_mgrred.s_redtree.nodes[0].ipos_fhiope=vstr_mgrred.l_vred[0];
vstr_mgrred.s_redtree.nodes[0].red_tip=RED_VUE_TIPO_OBJ;
vstr_mgrred.s_redtree.nodes[0].nivel=1; //Si es OBJ/BBN el nivel siempre es 1
vstr_mgrred.s_redtree.n_nod=1;
.
.
    if (redparcial_nextrecursivo(vstr_mgrred,vstr_mgrred.l_vred[0],1) != GOOD) {
//RED_VUE_TIPO_OBJ
        return(BAD);
    }
    else {
        .
        .

//Formateo final del Arbol (invertir el orden y quitar NREs que han pasado

```

a ser OPTs)

```
        return(redparcial_tree_sortxproc(vstr_mgrred));
        .
        .
    }
}
return(GOOD);
}
```

Tabla 9-3. Codificación de Solución de una Red Parcial

```
//Rutina de Carga de Tripulantes candidatos!!!
asig_crew_load_candidatos (int idv, int It[][MAX_TD], int ln[])
{
    .
    .
    //Aqui se cargan los Trip. que estan en el Destino!!!
    if (ides == ides_bas) { //Si parte de la Base
        for (i=0;i<nd_tri;i++) {
            if (d_tv[i].id_des_act == ides) {

                inlist=puede_ser(i,idv,hvr,hjr);

                if (inlist) { //Implica que esta en el rango o mas alla!!!
                    tt=d_tri[i].id_tt; //tt es (MAX_TT-1) como maximo (hasta MAX_TT tipos)!!!
                    It[tt][ln[tt]]=i; //En este caso es i, porque (i == id_tri)
                    ln[tt]++;
                }
            }
        }
    }
    else { //Si parte de otro Destino
        ndt=des_tri[ides].nd_trip;
        for (i=0;i<ndt;i++) {
            it=des_tri[ides].d_trip[i].id_tri; //Aqui se usa it!!!

            inlist=puede_ser(it,idv,hvr,hjr);
        }
    }
}
```

```

if (inlist) { //Implica que esta en el rango o mas alla!!
    tt=d_tri[it].id_tt; //tt es (MAX_TT-1) como maximo (hasta MAX_TT tipos)!!!
    lt[tt][ln[tt]]=it; //En este caso ya no es i, es it (pues it == id_tri)
    ln[tt]++;
}
}
}
return(GOOD);
}

/* Esta Rutina realiza la Eleccion de los Tripulantes, Actualiza */
/* los datos de los elegidos y los registra en 'd_prt' */
asig_crew_sel_act(int idv, int lt[][MAX_TD], int ln[], struct dat_tca *d_tca_, int flt[])
{
.
.
ntmr=d_tca_>nd_tmr;

for (j=0;j<ntmr;j++) {
    tt=d_tca_>d_tmr[j].id_tt;
    nt=d_tca_>d_tmr[j].nro_tmr;
    pos=0; //Donde comienza a buscar!!!
    iband_fact=0; //Inicialmente no ocurre rechazo por factibilidad
    for (k=0;k<nt;k++) {
        do {
            //Se envia lista de tripulantes del tipo 'tt' y cantidad de ellos 'ln[tt]'
            //Si 'pos' supera el rango se devuelve '-1'
            pos=next_tcrew(idv,lt[tt],ln[tt],pos);
            if (pos >= 0) {
                // Evaluar aqui la factibilidad de conformar crew con tripulante 'lt[tt][pos]'...!!!
                ifact=asig_crew_factibilidad(idv,lt[tt][pos],tt,d_prt,nd_prt);
                if (ifact != 1) {
                    log_run(LOW_MSG,"asig_crew_sel_act","Vuelo [%ld], No es factible conformar
crew con Tripulante %d, Tipo [%d]",
                        d_vue[idv].cod_vue,d_tri[lt[tt][pos]].cod_tri,d_tt[tt].cod_tt);
                    iband_fact=1;
                }
            }
            iseguir_buscando=0;
            if ((pos >= 0) && (ifact != 1)) {

```

```

    iseguir_buscando=1;
    pos++;
}
}
while (iseguir_buscando);
.
.
d_prt[nd_prt].id_vue=idv;
d_prt[nd_prt].id_tri=idt;
d_prt[nd_prt].id_tt=tt;
nd_prt++;

pos++; //Para empezar a buscar desde el siguiente en la lista
}
}
return(GOOD);
}
}

asig_crew_seleccion (int idv, int lt[][MAX_TD], int ln[], struct dat_tca *d_tca_, int flt[])
{
    ord_ltripdes(idv,lt,ln,1); //ordena para obtener el mas prometedor, p.ej. el miembro del
Vuelo inicial del itinerario
        //El parametro '1' indica que ordene Tripulacion normal
    if (asig_crew_sel_act(idv,lt,ln,d_tca_,flt) != GOOD) {
        //log_run(CRI_MSG,"asig_crew_seleccion","Error al Elegir Tripulantes");
        EXIT_ERROR=2; //Generalmente es por exceder algun tamaño definido, problema de
memoria!!!
        return(BAD);
    }
    return(GOOD);
}

asig_crew (int idv, int &i, long &f_act, int &h_act, int lt[][MAX_TD], int ln[], int flt[])
{
    int idi,nvue,nva,idvf;
    .
    .

    idi=d_vue[idv].id_iti;
    log_run(INF_MSG,"asig_crew","Programacion de Vuelo [%ld] %s-%s [%ld-%04d]
Itinerario [%ld]",

```

```

d_vue[idv].cod_vue,d_des[vue_des_ini(idv)].cod_des,d_des[vue_des_fin(idv)].cod_des,
    d_vue[idv].f_sal,d_vue[idv].h_sal,d_iti[idi].cod_iti);

    if (asig_crew_load_candidatos(idv,lt,ln) != GOOD) { //Debe ser una carga inteligente y
no cargar refuerzos!!!
        log_run(CRI_MSG,"asig_crew","Error al Cargar Tripulantes candidatos");
        return(BAD);
    }

    if (asig_crew_seleccion (idv,lt,ln,&d_tca[d_avi[d_iti[idi]].id_avi].id_tca,flt) != GOOD) {
        log_run(CRI_MSG,"asig_crew","Error al Elegir Tripulantes"); //No selecciona
refuerzos!!!
        return(BAD);
    }
    //if (asig_crew_essolucion()) { //Aunque no se complete el crew requerido debe
aceptarse el nivel conseguido de solucion.
    //}

    //Aqui se asignan los Refuerzos!!!
    nvue=iti_nvue(d_vue[idv].id_iti);
    nva=((nvue%2)==0)?(nvue/2):((nvue/2)+1); //Para: 2->1, 3->2, 4->2, 5->3, etc.!
    idvf=d_iti[d_vue[idv].id_iti].id_vue+nva;

    if ((d_rp_prp.prg_ref == YES) &&
        (d_iti[d_vue[idv].id_iti].int_nac == YES) && //Itinerario Internacional
        (iti_large(d_vue[idv].id_iti) == 1) && //Itinerario Largo
        (idv < idvf)) { //Hasta la mitad del Itinerario
        if (asig_ref (idv,idi,idvf,lt,ln,flt) != GOOD) {
            return(BAD);
        }
    }
}
return(GOOD);
}

```

```

/* Esta Rutina tiene control completo de Vuelos, Indisposiciones y Reservas*/
//Parametros: Arbol de Red Parcial, fh_ini/fin_programacion,
fh_ini_reservas_indisposiciones
// Generalmente fh_ini/fin_programacion sera la de la Red (solo al Inicio / Final no

```

seria la de la Red)

```
proc_redparcial(struct str_redtree &vstr_redtree, long f_iprg, int h_iprg, long f_fprg, int
h_fprg, long f_iresind, int h_iresind)
{
    static int lt[MAX_TT][MAX_TD],ln[MAX_TT],flt[MAX_TT]; //Para saber cuantos
    Tripulantes y de que tipo, faltan asignar!!!
    int i,l,m,idv,ind,rsv,h_iop,h_act;
    long f_iop,f_act,f_rsv;
    .
    .
    if (vstr_redtree.n_nod > 0) { //Ignoramos las fechas de ini/fin pasadas, nos basamos en
    el Arbol de Red!
        .
        .
        load_vue_redtree(vue_redparcial,vstr_redtree,nd_rp_vue); //No se optimizaran los
        Vuelos NRE!!!, se optimizan en Red Posterior
    }

    f_act=d_rp_prp.f_ini; h_act=d_rp_prp.h_ini;
    vueindrsv_idx_ini(f_act,h_act,i,l,m,f_rsv,f_iresind,h_iresind); //Define los inicios de
    Vuelos, Indisposiciones y Reservas

    log_run(INF_MSG,"proc_redparcial","Periodo                [%ld-%04d]-[%ld-%04d],
    Reservas/Indisposiciones posteriores a [%ld-%04d]",
            d_rp_prp.f_ini,d_rp_prp.h_ini,d_rp_prp.f_fin,d_rp_prp.h_fin,f_iresind,h_iresind);
    if (nd_rp_vue == 0) {
        log_run(INF_MSG,"proc_redparcial","Red                Parcial                vacia                (solo
        Reservas/Indisposiciones)");
    }
    while ((comp_fh(f_act,h_act,d_rp_prp.f_fin,d_rp_prp.h_fin) <= 0) && ((i<nd_rp_vue) ||
    (l<nd_ind) || (m<nd_rsv))) {
        //Los cambios de Mes, Trimestre o Anno, son analizados al ocurrir un evento,
        // es decir en las rutinas: 'asig_reserva', 'proc_ind' y 'asig_crew'.
        if ((i<nd_rp_vue) && ((l<nd_ind) || (m<nd_rsv))) {
            idv=vue_redparcial[i];
            vue_ini_ope(idv,f_iop,h_iop);
            .
            .

            else { //Existen Indisposiciones
                if (proc_ind(ind,l,f_act,h_act) != GOOD) {
```

```
        return(BAD);
    }
    continue;
}

.
.

if (m<nd_rsv) { //Existen Reservas
    rsv=rsv_hini[m];
    if (asig_reserva (rsv,m,f_rsv,f_act,h_act,lt,ln,flt) != GOOD) {
        return(BAD);
    }
    continue;
}

.
.

idv=vue_redparcial[i];
if (asig_crew(idv,i,f_act,h_act,lt,ln,flt) != GOOD) {
    return(BAD);
}
}
show_destri();

return(GOOD);
}
```

ANEXO B: PSEUDOCODIGO DEL MÉTODO DE REDES PARCIALES

Previamente se muestran las estructuras principales de registros necesarios para la implementación del método desarrollado, posteriormente se dan a conocer los algoritmos implementados.

Registro Reg_Backup_Estado

Registro_dat_tvI d_tvI_bs[0..MAX_TRI] //Tripulantes Valores (usar nd_tri)
Registro_dat_tva d_tva_bs[0..MAX_TRI] //Tripulantes Valores Adicionales (usar nd_tri)
Registro_dat_eqd d_eqd_bs[0..MAX_TRI] //Equidad
Registro_dat_prt d_prt_bs[0..MAX_PRT] //Asignacion de Crew
Registro_dat_prs d_prs_bs[0..MAX_PRS] //Asignacion de Reservas
Registro_dat_destri des_tri_bs[0..MAX_TRIDES] //Distribucion de Tripulantes en los Destinos
Entero nd_prt_bs; //Programacion de Tripulacion (marca de almacenamiento de d_prt, número de asignaciones de tripulación)
Entero nd_prs_bs; //Programacion de Reservas (marca de almacenamiento de d_prs, número de asignaciones de reservas)

Fin_Registro

Registro Reg_Backup_MejorSolucion

Reg_Backup_Estado reg_bk_state //Almacena todos los datos del proceso de asignación (propiedades de los tripulantes y asignaciones realizadas) si se añadiera la mejor solución a la Red Global
Reg_Red_KPIS s_red_kpis //KPIs de la mejor solución de la red Parcial actualmente en proceso

Fin_Registro

Registro Reg_str_rp_bak_state

Reg_Backup_Estado reg_bk_state //Almacena todos los datos del proceso de

asignación (propiedades de los tripulantes y asignaciones realizadas) previos al proceso de la Red Parcial en Análisi

Reg_Backup_MejorSolucion s_rp_mejor_sol //Almacena todos los datos del proceso de asignación si se añadiera a la Red Global la mejor solución encontrada de la Red Parcial

Fin_Registro

ALGORITMO MetodoRedesParciales

//Algoritmo General del Método de Redes Parciales

VARIABLES:

n_redes: Entero

n_itera: Entero

Reg_str_rp_bak_state s_rp_bak_state //Contenedor de Estado y Datos de la programación (se actualiza con c/Red Parcial solucionada)

Reg_rp_tri_ctrl s_rp_tri_ctrl //Estructura de control del universo de candidatos

Reg_mgrred s_mgrred //Estructura de Red Parcial (para la Red Parcial actualmente en análisis)

INICIO

OrdenarVuelos

Mem_EstAct_MejSol_Ini(s_rp_bak_state) //Inicializa almacenamiento de programación actual y mejor solución encontrada

//La mejor solución se obtiene al procesar una Red Parcial, posteriormente actualizará el Estado Actual de la programación

RedParcial_Ini(s_mgrred) //Inicializa contador de vuelos de la red parcial, mínimo y máximo de elementos de la red parcial

Hacer

RedParcial_Next(s_mgrred)

Si (s_mgrred.nvred > 0) Entonces

```
n_redes <- n_redes + 1
RedParcial_Salvar_EstAct(s_rp_bak_state) //Se hace backup del estado
actual de la programación previo al proceso de la Red Parcial
```

```
RedParcial_TripSelec_Ini(s_rp_tri_ctrl,s_mgrred.s_redtree) //Inicializa
tripulantes como no seleccionados, Obtiene Destino y Vuelo de Trabajo para
//Destino de Trabajo es aquel nodo de
la Red Parcial con mayor numero de tripulantes
```

```
//Vuelo de Trabajo es aquel que sale
del Destino de Trabajo y no es No-Relevante, sobre él se prueban diferentes
tripulantes seleccionados
```

```
n_itera <- 0
```

Hacer

```
n_itera <- n_itera + 1
```

```
RedParcial_Procesar(s_mgrred.s_redtree) //Solucionar Red Parcial
```

```
RedParcial_TripSelec_Act(s_rp_tri_ctrl,s_rp_bak_state) //Marca como
seleccionados los tripulantes asignados al Vuelo de Trabajo
```

```
RedParcial_Eval(s_mgrred,saux_red_kpis) //Obtiene los indicadores de
optimalidad de la solución de la Red Parcial
```

```
Si (n_itera = 1) O
(RedParcial_CompSol(saux_red_kpis,s_rp_bak_state.s_rp_mejor_sol.s_red_kp
is) > 0) Entonces
```

```
//Si es 1ra iteración o los indicadores de la solución actual son mejores
que los de la mejor solución
```

```
RedParcial_Act_Sol(s_rp_bak_state.s_rp_mejor_sol,saux_red_kpis)
//Actualiza la mejor solución y sus KPIs (indicadores de optimalidad)
```

```
Fin_Si
```

```
i_band_seguir <- 0
```

```
Si (RedParcial_Exist_Trip_NoSelec(s_rp_tri_ctrl)) Entonces
  //Aun quedan tripulantes sin seleccionar!
  RedParcial_Restaura_EstAct(s_rp_bak_state) //Recupera el contexto
inicial para continuar la busqueda
  i_band_seguir <- 1
  Fin_Si
```

Mientras (i_band_seguir = True)

```
RedGlobal_Agregar_Sol_RedParcial(s_rp_bak_state.s_rp_mejor_sol,saux_red
_kpis) //Añade a Solución de Red Global la Mejor Solución de Red Parcial
encontrada
```

Fin_Si

Mientras (s_mgrred.nvred > 0)

```
RedGlobal_Eval(s_mgrred,saux_red_kpis) //Obtiene los indicadores de
optimalidad de la solucion de la Red Global
```

FIN

ALGORITMO RedParcial_Next

ENTRADAS:

Reg_mgrred vstr_mgrred //Estructura de Red Parcial (para la Red Parcial
actualmente en análisis)

Entero vue_fhiope[0..MAXVUE] //Lista de indices de Vuelos ordenados por
fh_inicio_operativo (fecha-hora de inicio de preparación del vuelo previa a su
salida)!

SALIDAS:

VARIABLES:

vstr_mgrred.nvred <- 0 //Inicialmente no hay elementos en la Red

vstr_mgrred.s_redtree.n_nod <- 0 //Inicialmente no hay elementos en el Arbol

de la Red (de igual valor que 'vstr_mgrred.nvred')

INICIO

//Se parte de que los vuelos están ordenados en la lista 'vue_fhiope'

//Obtenemos la lista de vuelos candidatos para la Red Parcial (vuelos no procesados por otras redes, tienen fecha-hora de inicio posterior al inicio de la Red Parcial)

//El inicio de la Red Parcial siempre es igual al inicio de la Red Parcial anterior (por lo general las redes se traslapan en el tiempo)

vstr_mgrred.nvred_can <- 0

Para i=0 Hasta (nd_vue-1) Incrementado en 1 Hacer

vue_ini_ope(vue_fhiope[i],af_iope,ah_iope) //Obtenemos la fecha-hora de inicio operativo del vuelo candidato

//Comparamos el inicio operativo del vuelo con el inicio de la Red Parcial

Si (comp_fh(vstr_mgrred.vi_f_iope,vstr_mgrred.vi_h_iope,af_iope,ah_iope) <= 0) Entonces

vstr_mgrred.lv_fhiope_can[vstr_mgrred.nvred_can] <- j //Se almacena la posición del vuelo en 'vue_fhiope'. Nuestra Lista de Trabajo...!!!

vstr_mgrred.nvred_can <- vstr_mgrred.nvred_can + 1

//Blanquear tipo de vuelo, deben empezar en 'RED_VUE_TIPO_NUL'...!!!

vstr_mgrred.lv_fhiope_tip[j] <- RED_VUE_TIPO_NUL //Seteamos 'lv_fhiope_can'/'lv_fhiope_tip' a RED_VUE_TIPO_NUL

Fin_Si

Fin_Para

//Seleccionamos el 1er vuelo de la red. El 1er candidato siempre forma parte de la Red Parcial (es el 1ro en salir)

// El 1ro es OBJ...!!!

vstr_mgrred.s_redtree.nodes[0].ipos_fhiope <- vstr_mgrred.lv_fhiope_can[0]

```
vstr_mgrred.s_redtree.nodes[0].red_tip <- RED_VUE_TIPO_OBJ
vstr_mgrred.s_redtree.n_nod <- 1
vstr_mgrred.nvred <- 1
```

//Llamamos a la función recursiva de generación de la Red Parcial, con la lista de vuelos candidatos (vstr_mgrred.lv_fhiope_can) y el 1er vuelo OBJ

```
RedParcial_NextRecursivo(vstr_mgrred,vstr_mgrred.lv_fhiope_can[0],1)
```

FIN

ALGORITMO RedParcial_NextRecursivo

ENTRADAS:

Reg_mgrred vstr_mgrred //Estructura de Red Parcial (para la Red Parcial actualmente en análisis)

Entero vprinc //Identificador del vuelo principal de la Red (Vuelo Objetivo o Vuelo a Optimizar)

//Si es Vuelo Objetivo se tiene recursividad hacia atrás (por sus OPTs y NREs que pudieran afectarle), y hacia adelante para seguir amplificando la Red Parcial

//Si es Vuelo a Optimizar sólo existe recursividad hacia atrás (por sus OPTs y NREs que pudieran afectarle)

SALIDAS:

VARIABLES:

Entero l_vred_opt[0..MAX_VUERED], l_vred_nre[0..MAX_VUERED] //Listas temporales de vuelos OPT y NRE

Entero nvprinc_opt, nvprinc_nre //contadores de vuelos OPT y NRE

INICIO

//Se parte de que los vuelos están ordenados en la lista 'vue_fhiope'

vprinc_tip <- vstr_mgrred.lv_fhiope_tip[vprinc] //Obtenemos el Tipo de Vuelo correspondiente a 'vprinc' (solo puede ser OBJ u OPT)

nvprinc_opt <- 0

```
nvprinc_nre <- 0
```

Si (vstr_mgrred.nvred > 1) Entonces //El 1er vuelo OBJ no tiene antecesores OPT ni NRE, es el 1ro en salir!

```
desi_vprinc <- vue_des_ini(vue_fhiope[vprinc]) //Obtenemos el destino inicial del vuelo principal (OBJ u OPT)
```

```
vue_ini_ope(vue_fhiope[vprinc],f_iope_vprinc,h_iope_vprinc) //Obtenemos el inicio operativo del Vuelo principal (inicio de la preparación del vuelo, previo a su salida)
```

//Analizamos todos los vuelos candidatos para encontrar aquellos que afecten al vuelo principal (OPTs o NREs)

Para i=0 Hasta (vstr_mgrred.nvred_can-1) Incrementado en 1 Hacer
//Logica compuesta para OPTs y NREs a la vez...!!!

```
i_desf <- vue_des_fin(vue_fhiope[vstr_mgrred.lv_fhiope_can[i]])  
//Obtenemos el destino final del vuelo principal
```

Si (i_desf = des_i_vprinc) Entonces //Puede ser OPTs pues termina en el destino inicial del vuelo principal!

```
vue_fin_ope(vue_fhiope[vstr_mgrred.lv_fhiope_can[i]],i_f_fope,i_h_fope)
```

Si (comp_fh(i_f_fope,i_h_fope,f_iope_vprinc,h_iope_vprinc) <= 0)
Entonces

//OPT: Si llega al destino de salida del vuelo principal y antes de que este salga

```
l_vred_opt[nvprinc_opt] <- vstr_mgrred.lv_fhiope_can[i]
```

```
nvprinc_opt <- nvprinc_opt + 1
```

Fin_Si //OPT

Fin_Si

Si (vue_des_ini(vue_fhiope[vstr_mgrred.lv_fhiope_can[i]]) == des_i_vprinc)
Entonces //Puede ser NREs pues sale del mismo destino que vuelo principal

Si (comp_fh(i_f_iope,i_h_iope,f_iope_vprinc,h_iope_vprinc) <= 0)
Entonces

//NRE: Si sale del destino de salida del vuelo principal y antes de que este salga

```
l_vred_nre[nvprinc_nre++] = vstr_mgrred.lv_fhiope_can[i];
```

```
} //NRE
```

```
Fin_Si
```

```
Fin_Para
```

Si ((vstr_mgrred.nvred + nvprinc_opt + nvprinc_nre) > vstr_mgrred.nvr_max)
Entonces //Se superaria el Limite de la red

```
vstr_mgrred.overflow_ctrl <- RED_VUE_GEN_OVERFLOW //Se  
establece el control de salida por OverFlow
```

```
RedParcial_NextRecursivo <- GOOD // Se devuelve OK antes de  
superar el Limite (aun no se ha superado!)
```

```
Fin_Si
```

```
// Agregar vuelos a la lista y marcarlos como NRE
```

```
Para i=0 Hasta (nvprinc_nre-1) Incrementado en 1 Hacer //Al final se tiene:  
vstr_mgrred.nvred incrementado en nvprinc_nre;
```

```
//Arbol
```

```
vstr_mgrred.s_redtree.nodes[vstr_mgrred.s_redtree.n_nod].red_tip <-  
RED_VUE_TIPO_NRE
```

```
vstr_mgrred.s_redtree.nodes[vstr_mgrred.s_redtree.n_nod].ipos_fhiope <-  
l_vred_nre[i]
```

```
vstr_mgrred.s_redtree.n_nod <- vstr_mgrred.s_redtree.n_nod + 1 //No se  
sobre-escriben los NREs
```

```
Fin_Para
```

```
// Agregar vuelos a la lista y marcarlos como OPT
```

```
Para i=0 Hasta (nvprinc_opt-1) Incrementado en 1 Hacer //Proceso de OPTs
```

```
//Arbol
```

```
vstr_mgrred.s_redtree.nodes[vstr_mgrred.s_redtree.n_nod].red_tip <-  
RED_VUE_TIPO_OPT
```

```
vstr_mgrred.s_redtree.nodes[vstr_mgrred.s_redtree.n_nod].ipos_fhiope <-
```

```

l_vred_opt[i]
    vstr_mgrred.s_redtree.n_nod <- vstr_mgrred.s_redtree.n_nod + 1

    //Para cada OPT debe analizarse si tiene vuelos que le afecten
    (recursividad hacia atrás), igual que para el OBJ
    Si (RedParcial_NextRecursivo(vstr_mgrred,l_vred_opt[i],nivel_recur+1) <>
GOOD) Entonces
        RedParcial_NextRecursivo <- BAD //Ocurrió error
    Fin_Si
Fin_Para
Fin_Si

Si (vprinc_tip = RED_VUE_TIPO_OBJ) Entonces // Sino seria OPT y no se
hace nada!
    // Seleccionar vuelo siguiente (OBJ)
    idv_sig <- iti_vue_sgt(vue_fhiope[vprinc]) // vuelo siguiente del itinerario de
'vprinc'. Necesitamos su id en 'vue_fhiope'

    Si (idv_sig > 0) Entonces // Siguiete vuelo del itinerario de 'vprinc'. Nunca
seria '0' un vuelo siguiente!
        cambio_iti <- 0 //Se continua en el MISMO ITINERARIO!, no hay cambio
de itinerario aún
        Sino // 1er vuelo en destino final con salida inmediata-posterior a 'vprinc' -
NUEVO ITINERARIO a incorporar en la Red Parcial
            desf_vprinc <- vue_des_fin(vue_fhiope[vprinc]) //Obtenemos
destino final del vuelo principal
            vue_fin_ope(vue_fhiope[vprinc],f_fope_vprinc,h_fope_vprinc)
//Final operativo del vuelo principal
            Para i=0 Hasta (vstr_mgrred.nvred_can-1) Incrementado en 1
Hacer //Buscamos vuelo siguiente en destino final del vuelo principal
                Si (vue_des_ini(vue_fhiope[vstr_mgrred.lv_fhiope_can[i]]) = desf_vprinc)
//Si su destino inicial es el destino final del vuelo principal

```

```

vue_ini_ope(vue_fhiope[vstr_mgrred.lv_fhiope_can[i]],i_f_iope,i_h_iope)
//Obtenemos el inicio operativo
    Si (comp_fh(i_f_iope,i_h_iope,f_fope_vprinc,h_fope_vprinc) >= 0)
Entonces
    idv_sig <- vstr_mgrred.lv_fhiope_can[i] //Vuelo siguiente encontrado
    cambio_iti <- 1 //Se continua con OTRO ITINERARIO (cambio de
itinerario)!
    BREAK //Salimos del bucle 'Para'
    Fin_Si
    Fin_Si
Fin_Para
    Fin_Si

    Si (idv_sig > 0) Entonces //Si se ha seleccionado vuelo siguiente...!!!.
Nunca seria '0' un vuelo siguiente!
        Si (cambio_iti = 1) Entonces
//Backup, punto de retorno para revertir si OverFlow.
//La red parcial solo contiene itinerarios completos en caso de OverFlow
se elimina el ultimo itnerario
//Hasta aqui Red Actual OK y se empieza la siguiente (se sobre-escribe
el auxiliar 'alv_fhiope_tip')
//Arbol
    an_nod <- vstr_mgrred.s_redtree.n_nod //con el numero de nodos es
suficiente pues se ha linealizado
        Fin_Si

//Arbol actualizar - El siguiente es el nuevo OBJ (vuelo objetivo)
    ai_pos <- redparcial_tree_pos(vstr_mgrred.s_redtree,vprinc)
//Ubicamos la posición del nodo asociado al vuelo principal
    vstr_mgrred.s_redtree.nodos[ai_pos].red_tip <-
RED_VUE_TIPO_BBN

    vstr_mgrred.s_redtree.nodos[vstr_mgrred.s_redtree.n_nod].red_tip <-

```

RED_VUE_TIPO_OBJ

```
vstr_mgrred.s_redtree.nodes[vstr_mgrred.s_redtree.n_nod].ipos_fhiop  
<- idv_sig  
    vstr_mgrred.s_redtree.n_nod <- vstr_mgrred.s_redtree.n_nod + 1  
  
    Si (RedParcial_NextRecursivo(vstr_mgrred,idv_sig,1) <> GOOD)  
Entonces  
    RedParcial_NextRecursivo <- BAD //Ha habido un error grave  
    Sino { //Debe devolverse GOOD pues la Red Actual esta Ok y ha fallado la  
siguiente...!!!  
    Si (vstr_mgrred.overflow_ctrl = RED_VUE_GEN_OK) Entonces //No hay  
error  
        RedParcial_NextRecursivo <- GOOD  
    Sino Si (vstr_mgrred.overflow_ctrl = RED_VUE_GEN_OVERFLOW)  
Entonces  
        // La ultima ampliación de la red desborda el limite soportado  
        Si (cambio_iti = 1) Entonces  
            //Se supera el limite de tamaño de red parcial se eliminan vuelos  
incorporados del último itinerario.  
            //La red parcial solo contiene itinerarios completos!  
            //Arbol  
            vstr_mgrred.s_redtree.n_nod <- an_nod //No se sobre-escriben los  
NREs, basta con actualizar el numero de nodos!  
            vstr_mgrred.overflow_ctrl <- RED_VUE_GEN_OK //Se devuelve OK  
            Fin_Si  
  
        RedParcial_NextRecursivo <- GOOD //Se propaga  
RED_VUE_GEN_OVERFLOW hasta (cambio_iti == 1)...!!!  
        Sino  
            RedParcial_NextRecursivo <- BAD //Error desconocido  
        Fin_Si  
    Fin_Si
```

Fin_Si
Fin_Si

RedParcial_NextRecursivo <- GOOD

FIN