

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA**

**CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA DEL TRANSPORTE AÉREO**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**Por:  
ANDRÉS CORTÉS URREGO**

**M.Sc. ELIANA MIRLEDY TORO OCAMPO  
Directora**

**Tesis presentada como requisito para optar al título de Ingeniero Industrial**

**Pereira, Mayo de 2013**

# **CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA DEL TRANSPORTE AÉREO**

**ANDRÉS CORTÉS URREGO**

**Mayo de 2013**

A Dios por permitirme alcanzar este logro, por darme la fuerza y la perseverancia y salir adelante con el proyecto. A mi Familia, por su apoyo incondicional, por su comprensión y por su amor, a mis amigos por estar siempre allí en los momentos más difíciles alentándome a seguir adelante.

## **AGRADECIMIENTOS**

- A Dios por permitirme culminar este proyecto y esta etapa de la vida.
- A mi familia por brindar todo su apoyo y comprensión durante estos años de estudio.
- A mi directora de tesis M.Sc. Eliana Mirledy Toro, por su orientación, por su paciencia y por su asesoría en este trabajo.
- A la Universidad Tecnológica de Pereira y en especial a la Facultad de Ingeniería Industrial por hacer posible la culminación de nuestra carrera.
- A todos los profesores e Ingenieros cuya vocación nos impulsa antes que ser unos buenos profesionales a ser unos seres con compromiso social.

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

**M.Sc. Eliana Mirledy Toro**

---

**Pereira, Mayo de 2013.**

## TABLA DE CONTENIDO

<b>LISTADO DE FIGURAS .....</b>	<b>9</b>
<b>LISTADO DE TABLAS .....</b>	<b>10</b>
<b>GLOSARIO .....</b>	<b>11</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>14</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>16</b>
1.1 <i>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</i>	<i>18</i>
1.2 <i>DELIMITACIÓN.....</i>	<i>18</i>
1.3 <i>OBJETIVOS .....</i>	<i>19</i>
1.3.1 <i>Objetivo General.....</i>	<i>19</i>
1.3.2 <i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>19</i>
1.4 <i>JUSTIFICACIÓN.....</i>	<i>19</i>
1.4.1 <i>Diseño metodológico.....</i>	<i>20</i>
<b>2. PROBLEMA DEL TRANSPORTE AÉREO .....</b>	<b>21</b>
2.1 <i>DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE TRANSPORTE AÉREO.....</i>	<i>22</i>
2.2 <i>PRINCIPALES INSTANCIAS DEL PROBLEMA DEL TRANSPORTE AÉREO.....</i>	<i>27</i>
2.3 <i>PLANIFICACIÓN DE LA OPTIMIZACIÓN .....</i>	<i>27</i>
2.3.1.1 <i>Flujos de red.....</i>	<i>28</i>
2.3.1.2 <i>Redes .....</i>	<i>28</i>
2.3.1.3 <i>Nodos y arcos.....</i>	<i>28</i>
2.3.1.4 <i>Flujo.....</i>	<i>28</i>
2.3.1.5 <i>Arco directo.....</i>	<i>29</i>
2.3.1.6 <i>Arco no dirigido.....</i>	<i>29</i>
2.3.1.7 <i>Capacidad de un arco y nodos de suministro .....</i>	<i>30</i>
2.3.1.8 <i>Nodos de demanda y nodos transbordo.....</i>	<i>30</i>
2.3.1.9 <i>Caminos, redes y ciclos entre nodos .....</i>	<i>31</i>
2.3.2 <i>Itinerarios de vuelos (flight scheduling) .....</i>	<i>33</i>
2.3.2.1 <i>Modelo de redes (Hub-and-Spoke .....</i>	<i>36</i>
2.3.2.2 <i>Propuestas de itinerarios de vuelos.....</i>	<i>40</i>
2.3.3 <i>Asignación de flotas (fleet assignment) .....</i>	<i>43</i>
2.3.4 <i>Enrutamiento de aeronaves (aircraft routing) .....</i>	<i>46</i>
2.3.5 <i>Asignación de jornadas para tripulaciones (crew scheduling).....</i>	<i>49</i>
2.3.6 <i>Planificación de personal (manpowering planning) .....</i>	<i>55</i>
2.4 <i>OPERACIONES Y OPTIMIZACIÓN DE DESPACHO .....</i>	<i>56</i>
2.4.1 <i>Gestión de ingresos (revenue management) .....</i>	<i>56</i>

2.4.2	Gestión de sistemas de combustibles (fuel management system) .....	61
2.4.3	Operaciones irregulares de aerolíneas (airline irregular operations) .....	64
2.4.4	Asignación de puertas de embarque (gate assignment problem, gap).....	66
2.4.5	Estrategias para el abordaje de una aeronave (aircraft boarding strategy) .....	68
2.5	<b>COMPLEJIDAD COMPUTACIONAL, HEURÍSTICAS Y SOFTWARE</b> .....	74
2.5.1	Planificación de personal de mantenimiento (manpower maintenance planning) .....	75
2.5.2	Remolcadores de aeronaves (aircraft air tow tugs) .....	78
2.5.3	Planificación de capacidad de pistas de aterrizaje (runway capacity planning) .....	81
2.5.4	Sistemas de transporte de pequeñas aeronaves.....	83
2.5.5	Re-enrutamientos de tráfico .....	86
2.6	<b>MEDIO AMBIENTE Y CONTAMINACIÓN</b> .....	87
2.6.1	Emissiones de gases de aeronaves.....	87
2.6.2	Ruido generado por las aeronaves .....	90
2.7	<b>AFLUENCIA DEL TRÁFICO AÉREO</b> .....	91
2.7.1	Afluencia y teoría de colas .....	91
2.8	<b>EL TRANSPORTE AÉREO EN COLOMBIA</b> .....	92
2.9	<b>TABLA DE TAXONOMÍA Y CLASIFICACIÓN DE LOS AUTORES</b> .....	97
<b>3 MÉTODOS DE SOLUCIÓN EN LA CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA DEL TRANSPORTE AÉREO</b> .....		<b>102</b>
3.1	<b>MÉTODOS EXACTOS</b> .....	102
3.2	<b>MÉTODOS HEURÍSTICOS</b> .....	104
3.3	<b>METAHEURÍSTICAS</b> .....	105
3.3.1	Clasificación de las metaheurísticas .....	107
3.3.1.1	Métodos basados en trayectoria.....	108
3.3.1.2	Recocido simulado (s.a.).....	109
3.3.1.3	Búsqueda tabu (t.s.).....	109
3.3.1.1.3	<b>GRASP</b> .....	110
3.3.1.1.4	<b>La búsqueda en vecindario variable (v.n.s)</b> .....	110
3.3.1.1.5	<b>La búsqueda local iterada (I.L.S.)</b> .....	110
3.3.1.4	Métodos basados en población .....	110
3.3.1.4.1	<b>Los algoritmos evolutivos (E.A.)</b> .....	110
3.3.1.2.2	<b>Algoritmos de estimación de distribuciones (EDAS)</b> .....	111
3.3.1.2.3	<b>Cúmulos de partículas (P.S.O.)</b> .....	112
3.3.1.2.4	<b>La búsqueda dispersa (S.S.)</b> .....	112
3.3.1.2.5	<b>Colonias de hormigas (A.C.O.)</b> .....	112
<b>4. FORMULACIONES MATEMÁTICAS</b> .....		<b>113</b>
4.1	<b>PROBLEMA DE LA RUTA MÁS CORTO (SHORTEST PATH PROBLEM)</b> .....	113
4.1.1	Problema del costo mínimo de flujo .....	114

4.1.2	Problema de flujo máximo .....	115
4.1.3	Problema multiservicio.....	117
4.2	<i>MODELOS DE PROGRAMACION ENTERA</i> .....	118
4.2.1	Problemas de particionamiento (set-covering/partitioning problems) .....	118
4.2.2	El problema del agente viajero (traveling salesman problem) .....	120
4.3	<i>FORMULACIÓN PARA EL FLEET ASSIGMENT PROBLEM (FAM)</i> .....	122
4.4	<i>FORMULACIÓN PARA EL AIRCRAFT ROUTING</i> .....	125
4.5	<i>FORMULACIÓN PARA EL CREW SCHEDULING</i> .....	127
4.6	<i>FORMULACIÓN PARA EL MANPOWERING PROBLEM</i> .....	131
4.7	<i>FORMULACIÓN PARA EL FUEL MANAGEMENT SYSTEM</i> .....	133
4.8	<i>FORMULACIÓN GATE ASSIGNMENT</i> .....	134
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>138</b>
<b>6.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>141</b>



## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Etapas en las que se componen los subproblemas del transporte aéreo (Tomado de [4]).....	22
Figura 2. Subproblemas en la Planificación de la Optimización. [Tomado de 5] .....	23
Figura 3. Subproblemas en las Operaciones y la Optimización de Despacho. [Tomado de 5].	23
Figura 4. Subproblemas en Complejidad Computacional y Simulación. [Tomado de 5].....	24
Figura 5. Subproblemas asociados al medio ambiente y la contaminación. ....	25
Figura 6. Subproblemas asociados a la afluencia del tráfico aéreo. ....	25
Figura 7. Transporte Aéreo Colombiano.....	26
Figura 8. Etapas del problema del transporte aéreo. [4].....	27
Figura 9. Elementos Básicos de una red [17] .....	28
Figura 10. Flujo entre dos nodos [18] .....	29
Figura 11. Flujo Dirigido [18] .....	29
Figura 12. Flujo no dirigido. [18] .....	29
Figura 13. Nodo de suministro [18] .....	30
Figura 14. Nodo Demanda [18]	
Figura 15. Nodo Transbordo [18].....	30
Figura 16. Red que muestra tres caminos desde el nodo A hasta G. [18] .....	31
Figura 17. Ciclo entre nodos. [18].....	32
Figura 18. Red Conectada [18] .....	32
Figura 19. Proceso de planificación de líneas aéreas. ....	33
Figura 20. Variables de entrada para itinerarios de vuelos.....	35
Figura 21. Variables de salida para itinerarios de vuelo .....	35
Figura 22. Aspectos importantes para la creación de un HUB.....	36
Figura 23. Variables de entrada y salida en el modelo HUB – SPOKE.....	37
Figura 24. Variables de entrada y salida en el modelo POINT – TO – POINT .....	37
Figura 25. Ejemplo de una red de aerolínea con 2 hubs y diez spokes. [23].....	38
Figura 26. Jerarquía de la planeación de aerolíneas. ....	41
Figura 27. Consideraciones para la asignación de flotas.....	44
Figura 28. Generalidades del enrutamiento de aeronaves .....	47
Figura 29. Fases de la planificación de tripulaciones .....	50
Figura 30. Generalidades en el Air Crew Scheduling .....	53
Figura 31. Aproximaciones de Posibles soluciones para el Crew Scheduling .....	53
Figura 32. Relaciones entre variables en el Revenue Management .....	57
Figura 33. Asientos con asignaciones anidadas y no anidadas[52] .....	59
Figura 34. Esquema del Sistema de Gestión de combustibles .....	62
Figura 35. Factores que componen las Operaciones Irregulares. ....	65
Figura 36. Proceso de servicio de abastecimiento en tierra (turn time). [75].....	69
Figura 37. Back-to-front-method (método de atrás hacia adelante) [74]. ....	70
Figura 38. The random-method (método aleatorio de abordaje) [74].....	71

Figura 39. Window-middle-aisle or outside-inside boarding method (método de abordaje desde la ventana seguida por la silla del medio hasta la silla del pasillo) [74].	72
Figura 40. Tow-Barless-Tug. [86]	79
Figura 41. Tow-Bar-Tug [87]	79
Figura 42. Proceso lógico del uso de remolcadores.	80
Figura 43. Ambiente característico de un aeropuerto.	82
Figura 44. Beneficios del SATS.	84
Figura 45. Progreso de la Aviación en generación de emisiones de gas [97]	89
Figura 46. Procedimientos para evitar el ruido. [95]	91
Figura 47. Nueva ampliación del Aeropuerto Internacional El Dorado [131]	96
Figura 48. Características fundamentales de las metaheurísticas	106
Figura 49. Clasificación de las principales metaheurísticas.	108
Figura 50. Ejemplo de una red espacio-tiempo (time - space network).[119]	123
Figura 51. Diagrama del Crew scheduling[124].	130

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Asientos con asignaciones anidadas y no anidadas [52]	58
Tabla 2. Factor de carga e ingresos esperados. [117]	59
Tabla 3. Métodos exactos para la solución del Problema del Transporte Aéreo.	103
Tabla 4. Tipos de búsqueda de las metaheurísticas.	107

## GLOSARIO

1. **HUB:** Centro de conexiones utilizado por las compañías aéreas, se caracteriza por tener gran capacidad de flujo de tráfico aéreo.
2. **POINT-TO-POINT ROUTES:** Son rutas aéreas las cuales no hacen una parada o escala alguna entre la ciudad de origen y la ciudad de destino; rutas de un punto a otro.
3. **SPOKE:** son las ciudades que sirven a las conexiones y alimentan los Hubs, se proyectan como radios que van desde la ciudad de origen o spoke hacia la ciudad de destino o Hub, y viceversa.
4. **TURN TIME O TURN AROUND:** Tiempo en que permanece una aeronave en tierra desde que se estaciona en su puerta de embarque, le son puestos los tacos en las ruedas, hasta que está lista para su partida cumpliendo con el abordaje de los pasajeros, se cierran sus puertas y los tacos son removidos para su posterior remolque; esta actividad involucra operaciones como son el mantenimiento de línea, el repostaje de combustible, el cargue y descargue de equipajes, el abordajes y desabordaje de pasajeros, abastecimiento de comidas y limpieza de la aeronave.
5. **FAA (Administración Federal de Aviación):** La Administración Federal de Aviación, (FAA) en inglés, es la entidad gubernamental responsable de la regulación de todos los aspectos de la aviación civil en los Estados Unidos.
6. **ATMS:** Gestión del tráfico aéreo es un término que abarca todos los sistemas de aviación que ayudan aeronaves que salgan de un aeropuerto, el tránsito en el espacio aéreo, y aterrizar en el aeropuerto de destino, incluyendo el control del tráfico aéreo (ATC), meteorología aeronáutica, sistemas de navegación aérea (ayudas a la navegación), Servicios de Tránsito Aéreo (ATS), y gestión de afluencia del tránsito aéreo (ATFM), o flujo de tráfico aéreo y gestión de la capacidad (ATFCM).

7. **CLIMA CONVECTIVO:** Predicción que contiene las áreas en las que se espera la formación de tormentas, y su severidad.
8. **SET-PARTITIONING:** Es una formulación de un conjunto de particiones en las que las variables de decisión representan rutas viables para la aeronave.
9. **OVERBOOKING:** Es la sobreventa o exceso de reservas es un término usado por las compañías para referirse al exceso de venta de un servicio sobre la capacidad real de la empresa. La sobreventa es una práctica legal y común en el sector turístico y de la aviación
10. **DISCOUNT ALLOCATION:** Proceso de determinar el número de tarifas de promoción a ofrecer en un vuelo; en donde el costo de oportunidad de la venta de un tiquete con descuento en lugar de una tarifa completa.
11. **TRAFFIC MANAGEMENT:** Hace referencia a la gestión del tráfico y al tipo de ruta que se usa, si es point-to-point-route o si es hub-and-spoke.
12. **QUEROSENO:** Es un líquido transparente (o con ligera coloración amarillenta) obtenido por destilación del petróleo. De densidad intermedia entre la gasolina y el gasóleo o diésel, se utiliza como combustible, el JP (abreviatura de Jet Petrol) en los motores a reacción y de turbina de gas.
13. **FUEL HEDGING:** Es un instrumento contractual algunas grandes empresas que consumen combustible, como las aerolíneas, se utiliza para reducir su exposición a los costos de combustible volátiles y potencialmente en aumento.
14. **MULTI-COMMODITY NETWORK FLOW MODEL:** Es un problema de flujo de varios productos básicos, problema de flujo de red con múltiples productos básicos (demandas de flujo) entre los diferentes nodos de origen y destino.
15. **TOW-BARLESS:** Tractor remolcador especializado para mover aeronaves de un lado a otro, tiene la particularidad de tener un sistema el cual no

utiliza barras conectoras con el tren de aterrizaje de la aeronave; posee un sistema de brazos de bajo nivel para remolcar las aeronaves.

- 16. PUSH BACK:** Término usado en la aviación para referirse al retroceso que se le realice a una aeronave cuando esta estacionada en una puerta de embarque y está lista para partir, este proceso se lleva a cabo con un remolcador.
  
- 17. TOWTUG:** Tractor remolcador que se usa para remolcar las aeronaves.
  
- 18. TOW-BAR:** Tractor remolcador que usa una barra especial para conectar la aeronave con el tren principal de la aeronave.
  
- 19. NASA:** Son las siglas, en inglés, para la National Aeronautics and Space Administration (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio) de los Estados Unidos, que es la agencia gubernamental responsable de los programas espaciales.
  
- 20. SALICORNIA:** Es una variedad de halófitas, una planta que crece de manera natural en áreas afectadas por salinidad en las raíces, como en los desiertos salinos y litorales.
  
- 21. JATROFA:** Es una planta resistente a la sequía, no comestible y que puede crecer en tierras marginales, el contenido de aceite de una semilla de jatrofa puede ser tan alta como hasta del 40%.
  
- 22. CAMELIA:** Es un aceite convencionalmente cultivado en cultivos de semillas que se utiliza como un rotacional en las prácticas agrícolas modernas.

## RESUMEN

En el proyecto se hace énfasis en conocer los problemas del transporte aéreo mediante la caracterización del problema del transporte aéreo, se documentó una amplia selección de autores que estudian los diferentes problemas y subproblemas del transporte aéreo desde métodos simples con redes hasta tocar grandes problemas que implican tratamientos computacionales.

Se inició por conocer la historia de la investigación de operaciones en el sector aéreo como fue su evolución e implementación su desarrollo a través del tiempo hasta hoy en día. Se adoptó la metodología que propone Bazargan para el desarrollo de la temática en donde se inició por la planificación de la optimización, compuesta por definiciones de redes nodos, la asignación y creación de itinerarios, asignación de flotas, asignación de rutas para las aeronaves, asignación de turnos para tripulaciones aéreas y planeación del personal.

En segundo lugar se pasó a las operaciones y despacho en donde se tocaron los temas de gestión de ingresos, gestión de los combustibles, operaciones irregulares de aeronaves, asignación de puertas de embarque, y estrategias para abordaje de aeronaves.

En la tercera parte se maneja las complejidades computacionales y simulación, en donde se hace referencia a la complejidad computacional y heurísticas, planeación de personal de mantenimiento y remolcadores de aeronaves.

Se dio paso a la definición de problemas asociados con el medio ambiente como los son las emisiones de gases y el factor del ruido contaminante.

Se mencionaron los métodos de solución para los problemas del transporte aéreo, tales como métodos exactos heurísticas y metaheurísticas, y se finalizó con la formulación de los problemas del transporte aéreo.

## ABSTRACT

The project emphasizes knowing the problems of air transport by characterizing the problem of air transport, documented a wide range of authors who study some problems and subproblems of air transport networks from simple methods to problems involving large touch computational treatments.

Started to learn the history of operations research in aviation as was the development and implementation evolution over time until today. Adopted the methodology proposed by Bazargan to develop the theme where it began by planning optimization, composed of nodes network definitions, allocation and creation of itineraries, fleet assignment, routing for aircraft allocation shift to aircrews and staff planning.

Second place went to office operations and where the issues touched revenue management, fuel management, irregular operations aircraft gates assignment, and aircraft boarding strategies.

In the third part handles the computational complexity and simulation, where reference is made to computational complexity and heuristics, planning of maintenance personnel and aircraft tugs.

It led to the definition of problems associated with the environment as are gas emissions and noise pollution factor.

Methods were mentioned solution to the problems of air transport, such as heuristics and metaheuristics exact methods, and ended with the formulation of the problems of air transport.

## 1. INTRODUCCIÓN

La dinámica general enmarcada en los mercados globalizados y en especial en los negocios enfocados en el campo aeronáutico han suscitado un sinnúmero de mejoras y condicionamientos para un desempeño óptimo de dichas actividades, no sólo en lo tecnológico con la creación de nuevos equipos e instrumentos que simplifican las operaciones aéreas sino en la investigación de operaciones y la formulación de modelos que ratifiquen una debida optimización de las operaciones aéreas y de igual manera en el campo del desarrollo humano como tal, es así como desde la década de los años 50 las compañías aéreas en especial en los Estados Unidos de Norteamérica iniciaron el uso de investigación de operaciones en sus departamentos de operaciones llevándolos a establecer como departamentos fijos en los años 70 en donde las mejoras tecnológicas y estudios acerca de los problemas propios de operaciones aeronáuticas ayudaron a ahorrar miles de dólares a dichas compañías [1].

Actualmente la demanda de vuelos a nivel mundial se encuentra en aumento y se cree que en un corto plazo dicha demanda será de casi el triple de la demanda actual es por ello que las dinámicas del mercado ofrecen unas oportunidades en estos sectores de economías, en donde entrar a hacer parte del negocio de la aviación tiene su riesgo por los altos costos que implican las operaciones aéreas además de mantener una línea de aviones y a su personal calificado para ejercer dichas labores se debe tener en cuenta el concurrido sistema que compone un aeropuerto con sus actividades propias. A pesar de ello el mercado de la aviación ha tomado un rumbo significativo ya que las grandes compañías se están fijando en las rutas internacionales mayormente y realizan alianzas estratégicas con la fusión de dos o más aerolíneas aumentando en gran proporción el número de aeronaves a operar al igual que sus tripulaciones; por ello están cediendo espacio a las pequeñas empresas hoy conocidas como aerolíneas de bajos costos el sector del mercado regional, entendiéndolo como las ciudades de nivel intermedio y pequeño que se encuentran en los diferentes países.

Al verse incrementadas las operaciones aéreas a nivel mundial las compañías aéreas están viendo la necesidad de aumentar sus estrategias para minimizar costos e incrementar sus utilidades. El fin principal de las compañías aéreas es el de operar y emplear la mayor cantidad de aeronaves posibles que poseen, ya que el hecho de que una aeronave se encuentre en tierra representa costos adicionales para las empresas siendo esto causante de inconvenientes



financieros, en su debido tiempo se debe hacer una planeación acerca del itinerario que abarcaran las tripulaciones de las aeronaves, el tiempo mínimo de tránsito de una aeronave en tierra en un aeropuerto con sus debidos patrones definidos previamente, el proceso de embarque de una aeronave, la planeación de asignación de puertas de embarque para las aeronaves, atención al cliente en los mostradores de las aerolíneas, asignación de flotas, ruteo de aeronaves entre otros de los factores que abarcan el mundo de la aviación.

Es así como se ve inmerso la caracterización del problema de transporte aéreo, teniendo como puntos de partidas los modelos que se establecen en la investigación de operaciones y la implementación de software avanzados.

Dentro de las posibles variables las aerolíneas tienen que contemplar claramente los factores de ley, factores climatológicos, acuerdos laborales anteriormente adquiridos con sus colaboradores, factores operacionales por parte de las autoridades de aviación civil de cada país entre otros; ya que la no confrontación de dichas restricciones con el problema de transporte aéreo producirían trastornos en los compromisos operacionales de las compañías y finalmente trastornos en los sistemas de transportes aéreos del mundo.

Por lo tanto se torna interesante realizar una investigación en la cual se involucran fases fundamentales en el desarrollo de las empresas dedicadas al transporte aéreo, siendo de gran importancia el involucrarse en entender estas variables y sus debidas restricciones por medio de heurísticas, en donde las mismas conducirán por un modelamiento específico hasta encontrar la heurística que sea de mayor satisfacción para efectos de la investigación encontrando un óptimo ideal para el problema descrito.

En el proyecto se hace énfasis en conocer los problemas del transporte aéreo mediante la caracterización del problema del transporte aéreo, se documento una amplia selección de autores que estudian los diferentes problemas y subproblemas del transporte aéreo desde métodos simples con redes hasta tocar grandes problemas que implican tratamientos computacionales.

Se inició por conocer la historia de la investigación de operaciones en el sector aéreo como fue su evolución e implementación su desarrollo a través del tiempo hasta hoy en día. Se adoptó la metodología que propone Bazargan para el desarrollo de la temática en donde se inició por la planificación de la optimización, compuesta por definiciones de redes nodos, la asignación y creación de

itinerarios, asignación de flotas, asignación de rutas para las aeronaves, asignación de turnos para tripulaciones aéreas y planeación del personal.

En segundo lugar se pasó a las operaciones y despacho en donde se tocaron los temas de gestión de ingresos, gestión de los combustibles, operaciones irregulares de aeronaves, asignación de puertas de embarque, y estrategias para abordaje de aeronaves.

En la tercera parte se maneja las complejidades computacionales y simulación, en donde se hace referencia a la complejidad computacional y heurísticas, planeación de personal de mantenimiento y remolcadores de aeronaves.

Se dio paso a la definición de problemas asociados con el medio ambiente como los son las emisiones de gases y el factor del ruido contaminante.

Se mencionaron los métodos de solución para los problemas del transporte aéreo, tales como métodos exactos heurísticas y metaheurísticas, y se finalizó con la formulación de los problemas del transporte aéreo.

## **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En la investigación de operaciones el análisis de regresión múltiple, el problema de selección del mejor subconjunto de variables o selección del mejor modelo es uno de los más importantes. En este trabajo se pretende hacer una recopilación exhaustiva y mostrar las mejoras de los modelos que los autores han desarrollado a través de los años mostrando así cuales han sido los mejores modelos que permitirá explorar y encontrar la solución óptima en problemas de gran escala a través de la utilización de un criterio de información como función objetivo, que evalúa y selecciona el mejor modelo, según complejidad de la información del modelo a través de la interacción de los componentes del mismo.

## **1.2 DELIMITACIÓN**

En este trabajo se pretende realizar un estado del arte completo del Problema del transporte aéreo, y los subproblemas inherentes al mismo, documentando los modelos utilizados por la academia para la solución de los mismos; describir las

heurísticas aplicadas actualmente por las compañías aéreas y plantear que modelos son aptos para aplicar en el transporte aéreo nacional.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 Objetivo General.**

Caracterizar el problema del transporte aéreo desde la óptica de la optimización matemática.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos.**

- Realizar una revisión exhaustiva del estado del arte para conocer los modelos aplicados en el transporte aéreo.
- Identificar qué tipos de modelos del transporte aéreo mundial podrían ser aplicados en el transporte aéreo nacional.
- Identificar los desafíos y obstáculos metodológicos con los cuales se enfrenta el transporte aéreo.
- Establecer los diferentes tipos de infraestructuras y sistemas tecnológicos que son necesarios en el transporte aéreo.
- Conocer los problemas asociados en el transporte aéreo.
- Conocer las Técnicas de solución empleadas.

### **1.4 JUSTIFICACIÓN**

El desarrollo de esta investigación permite al autor, aplicar conocimientos teóricos y prácticos adquiridos durante el proceso de formación en el programa de ingeniería industrial, especialmente aquellos desarrollados en el área de investigación de operaciones, la cual es una rama de las matemáticas consistente en el uso de modelos matemáticos, estadística y algoritmos con objeto de realizar un proceso de toma de decisiones.

Este proyecto busca recopilar y describir detalladamente las técnicas de solución que se emplean mundialmente por las compañías aéreas y por los profesionales en carreras afines que desarrollan e implementan día a día para mejorar el comportamiento del transporte aéreo mundial.

Esta investigación permitirá a su vez servir como apoyo para futuras investigaciones sobre el problema del transporte aéreo, dado que hasta el momento no existen muchas investigaciones que aborden globalmente este tipo de problemas.

#### **1.4.1 Diseño metodológico**

Se inicia el proyecto con la construcción del estado del arte que se realizará a partir de una amplia revisión bibliográfica, de los fundamentos teóricos empleados en el transporte aéreo a través de información suministrada por la directora del proyecto y la búsqueda individual del investigador. Posteriormente se dará paso a la definición de las actividades inherentes a la caracterización de los problemas existentes en el transporte aéreo.

## 2. PROBLEMA DEL TRANSPORTE AÉREO

A pesar que desde los años 50 la aviación tuvo directamente contacto con la investigación de operaciones[2] el problema del transporte aéreo surge en los Estados Unidos debido al acto de desregulación de aerolíneas por parte de la administración federal de aviación (FAA) de los Estados Unidos en el año de 1978, Bazargan [2] y Yu [3] describen como permitían que las aerolíneas escogieran sus rutas aéreas al igual que sus tarifas, esto indicó que las aerolíneas ya no estaban protegidas y permitió la participación de nuevas aerolíneas en el mercado de la industria del transporte aéreo; pero para ello las aerolíneas tenían que ser eficientes y lograr sobrevivir a este nuevo entorno, dadas las circunstancias nacen unos nuevos subproblemas que implican la optimización de la industria de la aviación.



Transporte aéreo

## 2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE TRANSPORTE AÉREO

El problema de transporte aéreo es el nombre genérico dado a un conjunto de problemas de redes y programación entera, en los cuales se tienen un conjunto de variables que cambian susceptiblemente con las diferentes acciones que se generan en el transporte aéreo. La idea es implementar estrategias a través del planteamiento del mayor número de variables posibles que intervengan en el transporte aéreo para optimizar los correspondientes procesos asociados y de esta forma presentar las mejores condiciones operacionales en el flujo del transporte aéreo.

Se establecieron etapas para relacionar los diversos modelos que se han planteado a través del tiempo, donde Bazargan [4] hace una aproximación muy clara a los subproblemas dividiéndolos en 3 etapas:

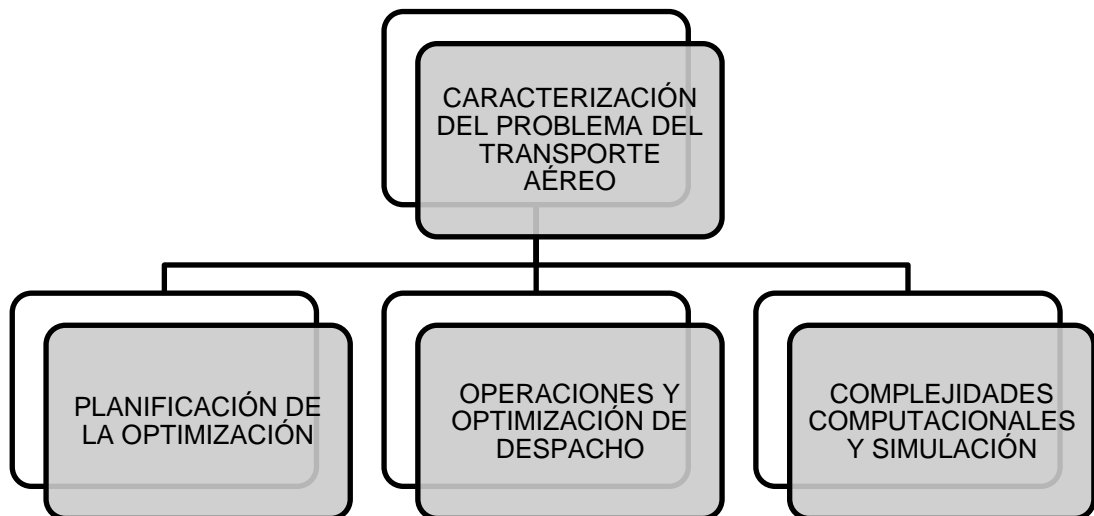


Figura 1. Etapas en las que se componen los subproblemas del transporte aéreo [4]

En donde en la etapa inicial que es la Planificación de la Optimización incluye seis subproblemas [5] los cuales se enuncian a continuación:

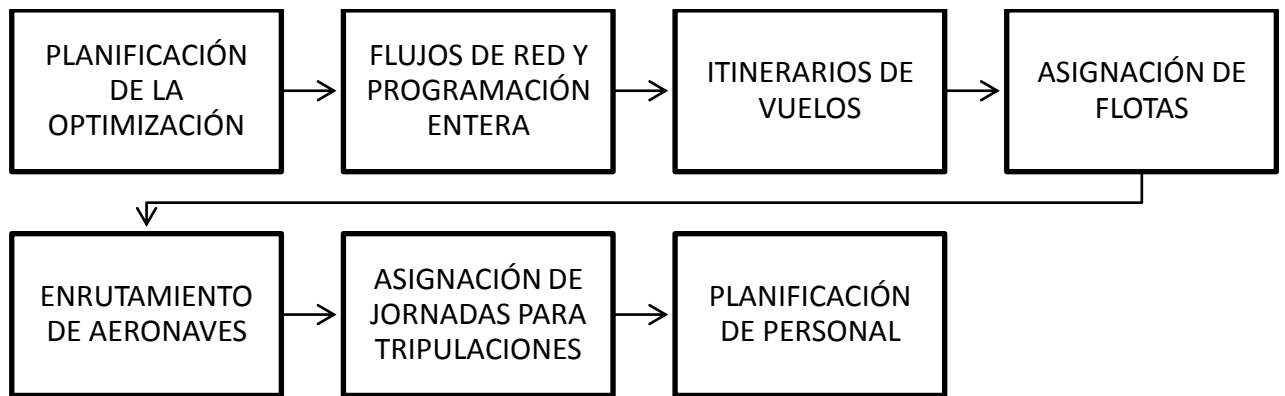


Figura 2. Subproblemas en la Planificación de la Optimización. [5]

La segunda etapa consiste en las Operaciones y la Optimización de despacho se aprecia 5 subproblemas más los cuales son:

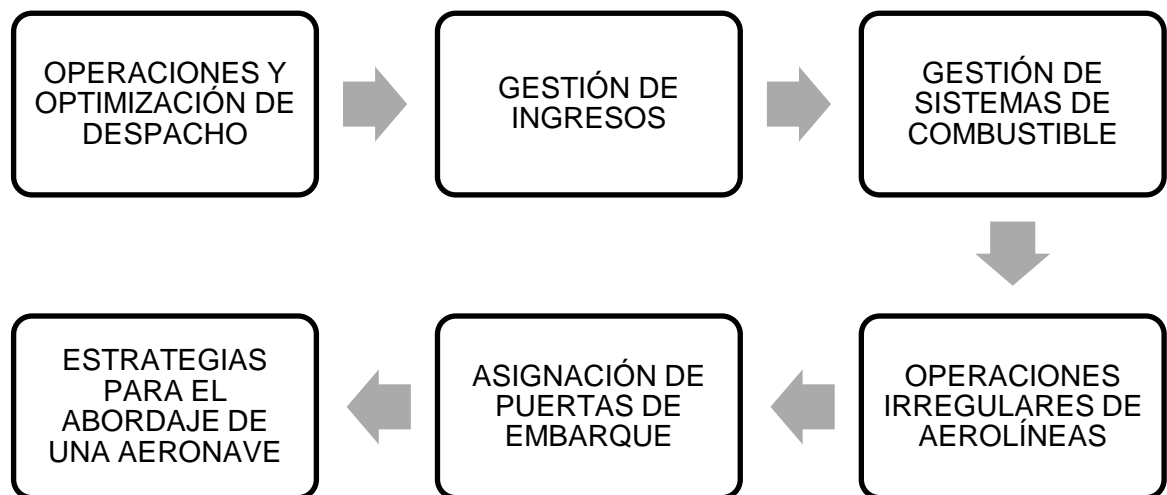


Figura 3. Subproblemas en las Operaciones y la Optimización de Despacho. [5]

En la tercera etapa de Complejidades Computacionales y Simulación se presentan los siguientes 6 subproblemas:

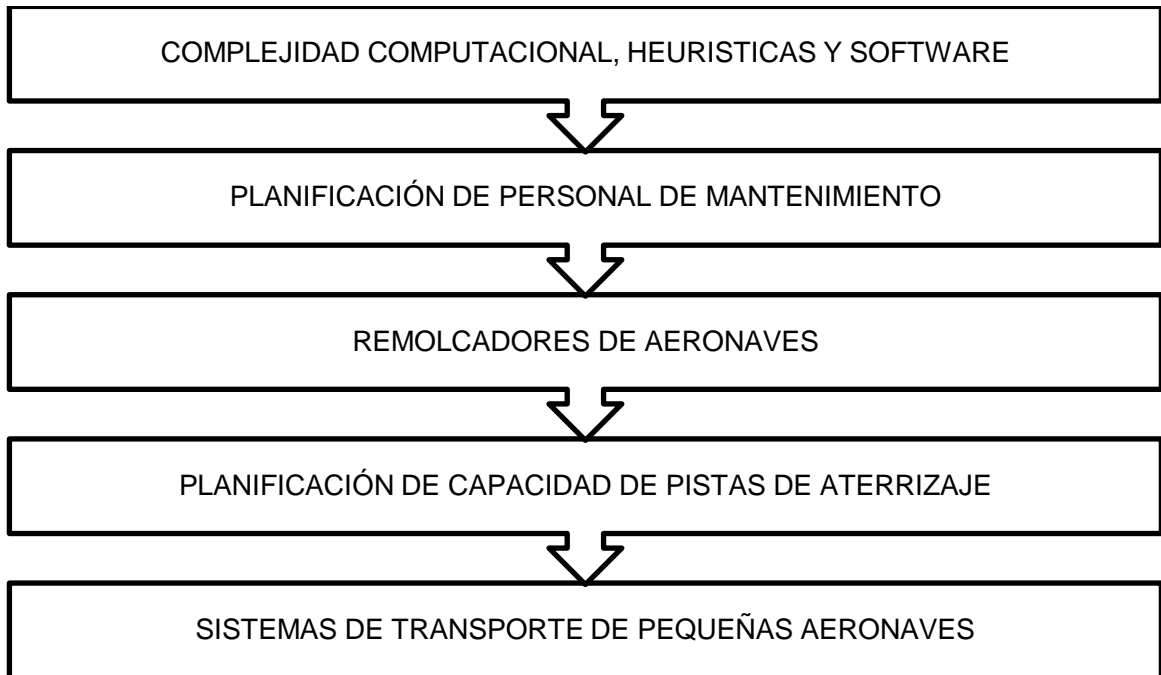


Figura 4. Subproblemas en Complejidad Computacional y Simulación. [4]

El continuo desarrollo que ha presentado el medio aeronáutico no solo abarca los subproblemas enunciados anteriormente y que han sido manejados por diferentes autores a través del desarrollo de la aviación sino que también se aprecian nuevos subproblemas que están directamente relacionados con el aumento poblacional y la preocupación de los países por la conservación del medio ambiente como lo son:





Figura 5. Subproblemas asociados al medio ambiente y la contaminación. [5]

Uno de los mayores subproblemas que aqueja a la comunidad mundial del transporte aéreo es la congestión tanto en el espacio aéreo como en los aeropuertos debido a ello surge:



Figura 6. Subproblemas asociados a la afluencia del tráfico aéreo. [Fuente: Autoría Propia]

Para un mejor entendimiento de los subproblemas que aqueja a la comunidad mundial del transporte aéreo, se planea estudiar el transporte aéreo colombiano para saber que subproblemas son aplicables allí:



Figura 7. Transporte Aéreo Colombiano. [Fuente: Autoría Propia]

Debido a la extensiva revisión bibliográfica de la propuesta desarrollada por Bazargan [5] y su poder para la clasificación por etapas de una forma consistente de los subproblemas tratados en la literatura especializada, se define utilizarla para enmarcar los subproblemas particulares que serán tratados más adelante en éste documento.

## 2.2 PRINCIPALES INSTANCIAS DEL PROBLEMA DEL TRANSPORTE AÉREO

Con base en la tipología desarrollada por Bazargan [4] se distinguen las siguientes etapas del problema del transporte aéreo:

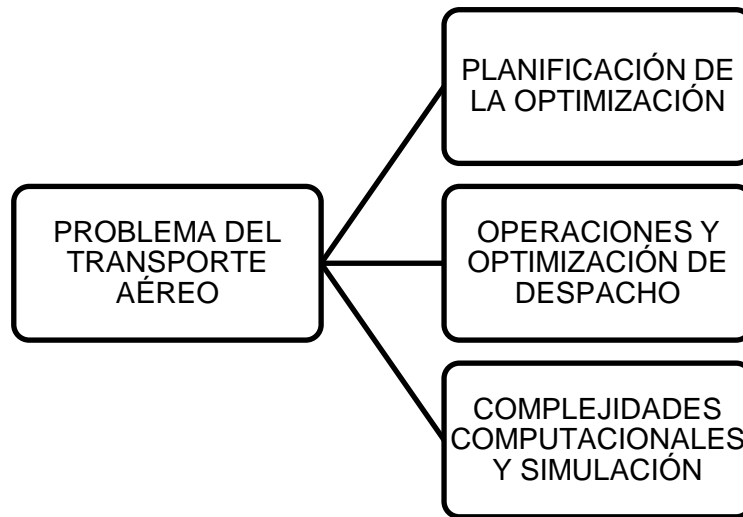


Figura 8. Etapas del problema del transporte aéreo. [4]

Dentro de la descripción de los subproblemas que enmarcan las diferentes etapas del problema del transporte aéreo se le da un orden secuencial y lógico dentro de los procesos más básicos del transporte aéreo hasta llegar a los más complejos es así como se inicia la descripción de los mismos.

## 2.3 PLANIFICACIÓN DE LA OPTIMIZACIÓN

En esta etapa se describen todos los subproblemas concernientes a los procesos básicos que se van a optimizar inicialmente antes de iniciar la cadena en el ciclo de operaciones de una compañía aérea.

### 2.3.1.1 *Flujos de red*

Gran parte de los problemas que afrontan las compañías aéreas se pueden traducir en modelos de redes y programación entera. Estos modelos se mencionan y se utilizan en la gran mayoría de subproblemas asociados al problema del transporte aéreo.

### 2.3.1.2 *Redes*

Una red (también referido como un gráfico) se define como una colección de puntos y líneas.

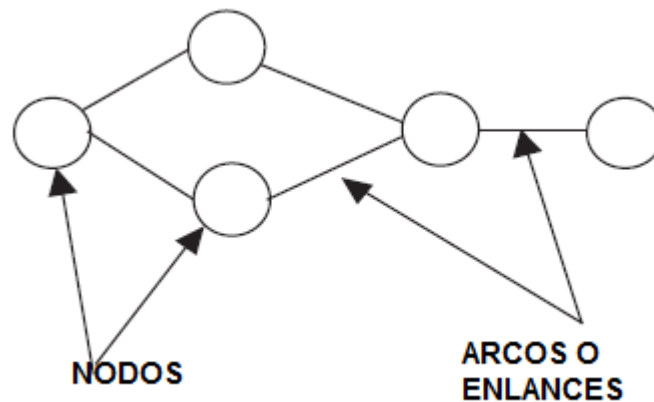


Figura 9. Elementos Básicos de una red [17]

### 2.3.1.3 *Nodos y arcos*

En una red los puntos o (círculos) son llamados nodos, y las líneas se refieren a los arcos, conexiones o flechas.

### 2.3.1.4 *Flujo*

Es la cantidad de bienes, vehículos, vuelos, pasajeros y demás que se mueven de un nodo a otro.

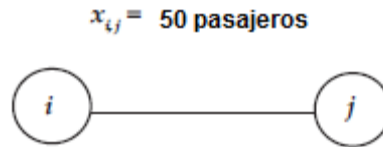


Figura 10. Flujo entre dos nodos [18]

### 2.3.1.5 Arco directo

Si el flujo a través de un arco va en una sola dirección, entonces se dice que el arco será llamado un arco directo. Los arcos directos son representados gráficamente con flechas en el mismo sentido en que se dirige el flujo.



Figura 11. Flujo Dirigido [18]

### 2.3.1.6 Arco no dirigido

Cuando el flujo en un arco entre dos nodos se puede mover en cualquier dirección, es llamado un arco no dirigido. Los arcos no dirigidos son representados gráficamente con una línea sin ninguna flecha en los extremos de las líneas.

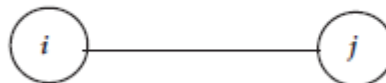


Figura 12. Flujo no dirigido. [18]

### 2.3.1.7 Capacidad de un arco y nodos de suministro

En cuanto a la capacidad de un arco se refiere a la cantidad máxima de flujo que puede ser enviada a través de un arco; en ciertos ejemplos se puede mencionar que se incluyen restricciones en el número de vuelos entre dos ciudades.

Los nodos suministros son nodos en los cuales la cantidad de flujo que entra a ellos es mayor que la cantidad de flujo que sale de los mismos, también son conocidos como nodos con flujo neto positivo.

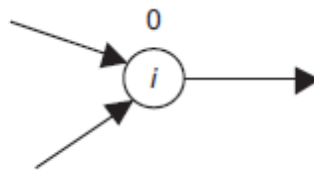


Figura 13. Nodo de suministro [18]

### 2.3.1.8 Nodos de demanda y nodos transbordo

Los nodos de demanda son aquellos que tienen un flujo neto negativo o la cantidad que sale es mayor a la afluencia.

Nodos transbordo son los nodos que tienen la misma cantidad de flujo llegando y saliendo, o también se consideran nodos con un flujo neto igual a cero.

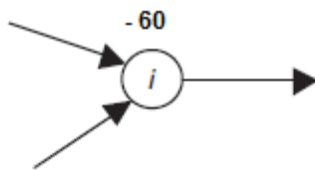


Figura 14. Nodo Demanda [18]

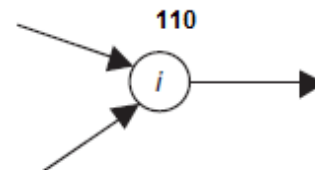


Figura 15. Nodo Transbordo [18]

### 2.3.1.9 Caminos, redes y ciclos entre nodos

Los nodos pueden estar conectados por una secuencia de arcos cuando estos se encuentran de esta manera se dice que se genera un camino, un camino es una secuencia de arcos que conectan dos nodos entre sí. Las aerolíneas utilizan "Hubs" los cuales son un punto de intercambio o centro de distribución de tráfico de personas y mercancías o un centro de conexión de un aeropuerto importante del que salen y al que llegan vuelos de larga distancia y dichos vuelos se realizan en aeronaves de gran capacidad. En ciertos países estos Hubs son alimentados por aeronaves de menor capacidad y brindan conexiones entre ciudades intermedias.

En los caminos de redes se puede distinguir el origen el cual es el nodo en donde inicia el camino, y el destino que es el último nodo en el camino.

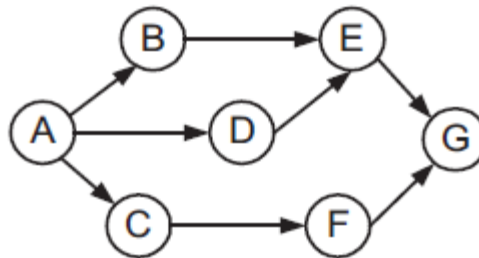


Figura 16. Red que muestra tres caminos desde el nodo A hasta G. [18]

Los ciclos son una secuencia de arcos directos que comienzan y terminan en el mismo nodo. Las aerolíneas usualmente tienen aeronaves las cuales parten de un aeropuerto el cual es catalogado como base de mantenimiento y realizan diversos vuelos en el día, al finalizar la jornada regresan al mismo aeropuerto del cual partieron inicialmente

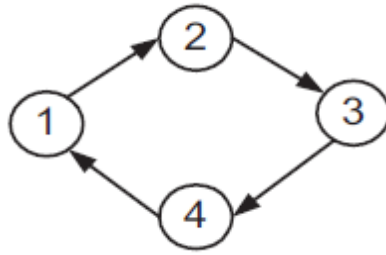


Figura 17. Ciclo entre nodos. [18]

Una red conectada es una red en la cual cada dos nodos están conectados por al menos un camino.

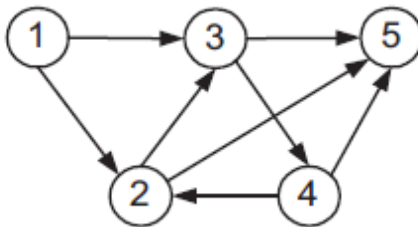


Figura 18. Red Conectada [18]

Para la planificación de sistemas de líneas aéreas estas tienen en cuenta los siguientes aspectos antes de comenzar sus operaciones:



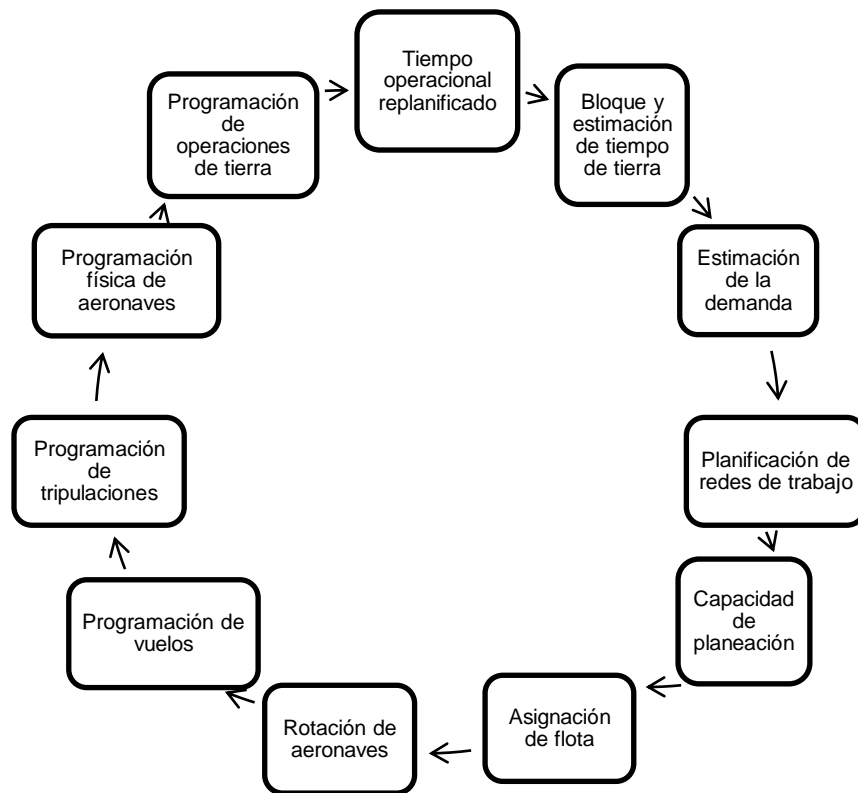


Figura 19. Proceso de planificación de líneas aéreas. [139]

### 2.3.2 Itinerarios de vuelos (flight scheduling)

Los itinerarios de vuelo son el punto de partida de toda la planificación y las operaciones de las aerolíneas; consisten en una tabla de tiempos la cual está comprendida por las ciudades a las cuales se va a volar y a las horas determinadas que se realizan los vuelos. Para que las aerolíneas ofrezcan unos itinerarios determinados deben de tener en cuenta ciertas características tales como las previsiones de la demanda, las características operacionales de las aeronaves con las que cuenta la aerolínea, la mano de obra para cumplir las operaciones en tierra, las regulaciones aéreas estipuladas por los entes de control de cada país y los entes internacionales al igual que el comportamiento de las aerolíneas competencia en el mercado.

Grandeau [19] considera que el nivel de detalle del itinerario varía entre las aerolíneas pero necesariamente deberá ser un itinerario completo para un ciclo

completo, los ciclos son considerados normalmente como un día de vuelos domésticos y una semana para vuelos internacionales. La fase de construcción de un itinerario inicia con el sistema de rutas, las ciudades en las redes de la aerolínea determinan el sistema de rutas. Los aspectos económicos de una compañía aérea están impulsados por su sistema de rutas; todos los costos a corto y largo término son atribuidos a la flota, la aviónica, las obligaciones contractuales y las operaciones están vinculadas al sistema de rutas de la compañía.

Los departamentos de mercadeo de las compañías aéreas juegan un papel muy importante en el rol de la construcción del itinerario, debido que antes de la ley de desregulación de las aerolíneas que se dio en los Estados Unidos en 1978 las aerolíneas tenían que volar rutas que eran asignadas por la junta de aeronáutica civil (CAB) a pesar de que se tenía una gran demanda para prestar el servicio; durante este periodo la mayoría de las aerolíneas se enfocaron en rutas largas de un punto a otro (long point-to-point routes). Desde la ley de desregulación, las aerolíneas obtuvieron la libertad de elegir a cuales mercados prestar sus servicios y con qué frecuencia hacerlo. Este cambio permitió que la mayoría de las aerolíneas cambiaran sus estrategias de rutas, pasando de vuelos de un punto a otro a realizar vuelos desde centros de conexiones a ciudades intermedias también conocido como el modelo de redes (hub-and-spoke oriented networks) Etschamaier y Mathaisel [20].

Para facilitar el entendimiento de la planeación de itinerarios de vuelos a continuación se enuncian los valores de entrada y salida que hacen parte de éste.

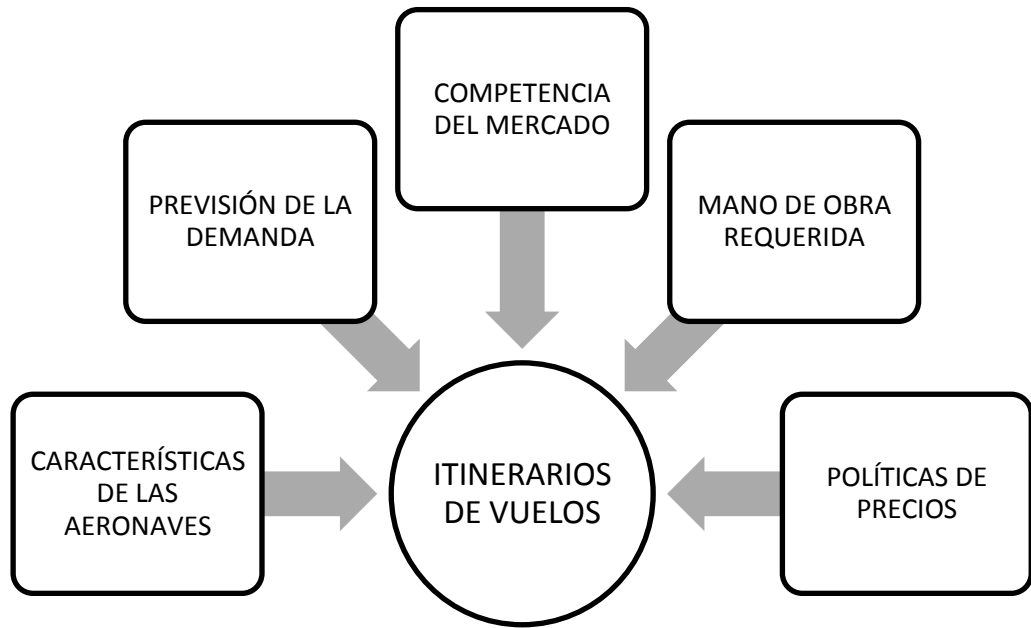


Figura 20. Variables de entrada para itinerarios de vuelos. [Fuente Autoría Propia]



Figura 21. Variables de salida para itinerarios de vuelo. [Fuente: Autoría Propia]

### 2.3.2.1 Modelo de redes (Hub-and-Spoke)

El modelo de redes o paradigma de la distribución (hub-and-spoke) es un sistema de conexiones dispuestas como una rueda de una bicicleta, en la que todo el tráfico se mueve a lo largo de los radios o spoke conectados en el centro o hub [21]. La mayoría de las aerolíneas adoptan variaciones del modelo, las compañías aéreas más grandes operan hasta cinco Hubs, mientras que las compañías más pequeñas usualmente utilizan un hub localizado en el centro de la región en la que prestan sus servicios. Cada hub<sup>1</sup> tiene un número de ciudades a las cuales sirve, normalmente llamadas spokes<sup>2</sup>. Las compañías aéreas usualmente asignan aeronaves de gran capacidad entre sus Hubs ya que no tienen escalas entre los mismos, las aeronaves más pequeñas estas asignadas a vuelos del modelo de redes. Radnoti [22] menciona que las mayores ventajas en el manejo de las operaciones con este modelo incluyen mayores ingresos, una eficiencia más alta y menor cantidad de aeronaves requeridas comparado con el modelo de un punto a otro (point-to-point routes)<sup>3</sup>. Las desventajas de las operaciones incluyen inconformidades por parte de los pasajeros ya que deben de realizar múltiples conexiones en sus vuelos en los diferentes Hubs que operen las compañías, las congestiones originadas por el alto número de tráfico en las terminales aéreas que son Hubs de las compañías; para las aerolíneas la desventajas son un mayor número de manejo de personal y costos de operación más altos. Algunos de los aspectos para la creación de un Hub son los siguientes:

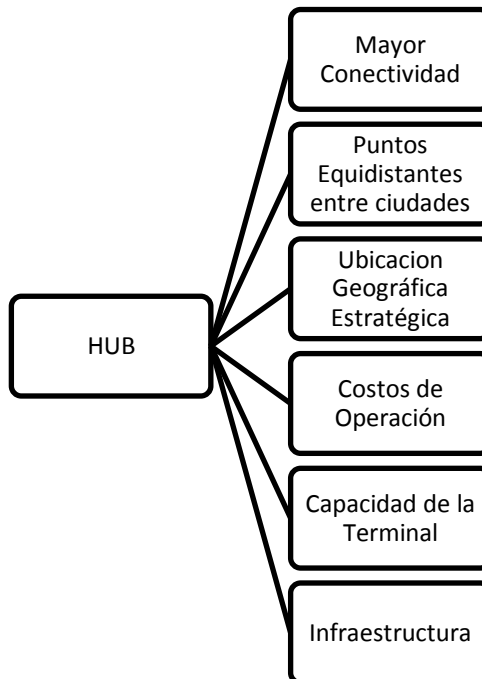


Figura 22. Aspectos importantes para la creación de un HUB. [Fuente: Autoría Propia]

En el modelo de HUB-SPOKE se manejan las siguientes entradas y salidas:

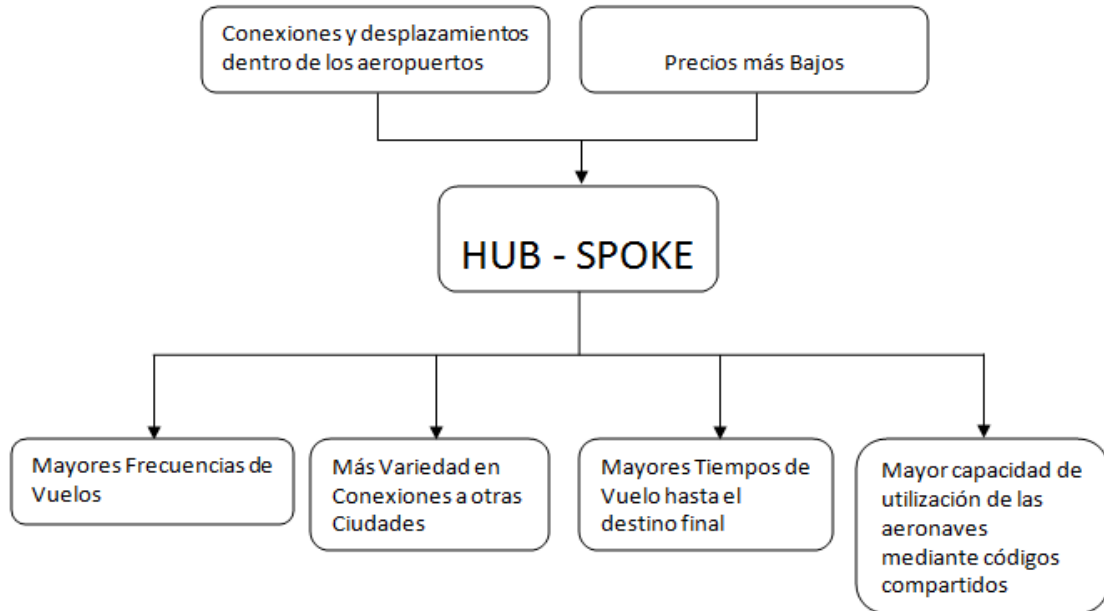


Figura 23. Variables de entrada y salida en el modelo HUB – SPOKE. [Autoría Propia]

En el modelo POINT – TO - POINT se manejan las siguientes entradas y salidas:

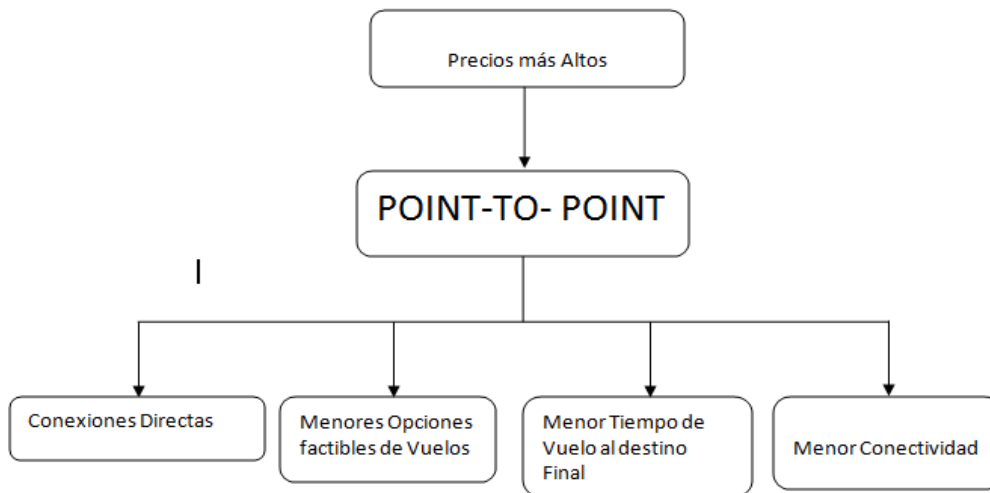


Figura 24. Variables de entrada y salida en el modelo POINT – TO – POINT. [Autoría Propia]

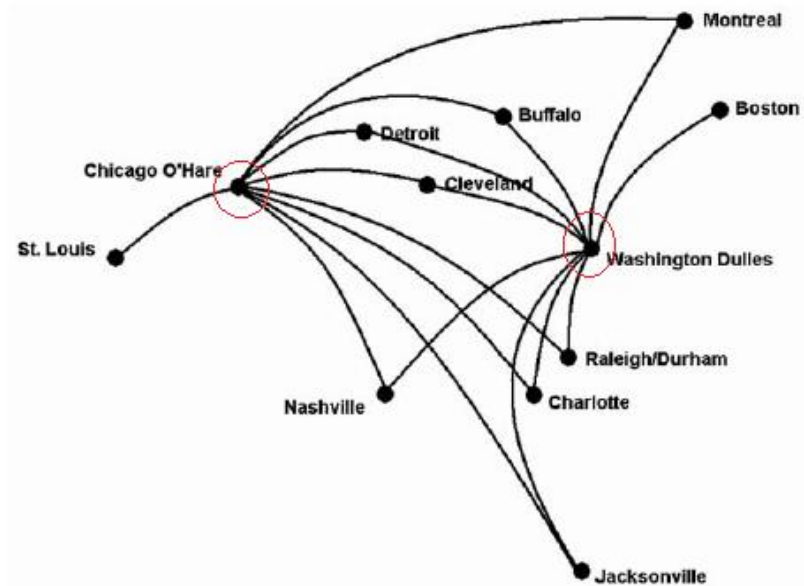


Figura 25. Ejemplo de una red de aerolínea con dos Hubs y diez spokes. [23]

Dentro de las connotaciones que tienen en cuenta las compañías aéreas se tienen el Factor de carga y la frecuencia los cuales son definidos a continuación:

**Factor de carga o (Load Factor):** El factor de carga es el porcentaje medio de los asientos del avión que serán ocupados por los pasajeros. Los parámetros que afectan a los factores de carga incluyen tiempo de vuelos, frecuencia, tipo de servicio y, por supuesto, los niveles de tarifas. Cabe señalar que el factor de ocupación más alto no se traduce necesariamente en mayores ingresos para las compañías aéreas. Este factor juega un papel importante en la determinación de la frecuencia de vuelos entre ciudades.

**Frecuencia:** Son los vuelos que realiza la compañía aérea semanal o diariamente entre las ciudades que se pretenden servir. Estas se pueden ver afectadas ya que cada compañía aérea implementa su propia política en el factor de carga.

Para determinar la frecuencia se acude a la siguiente ecuación en donde

FREQ = Frecuencia.

LF = Factor de Carga.

PAX = Pasajeros pronosticados entre las ciudades.

CAP = Capacidad de silla de la aeronave.

$$FREQ = \frac{PAX}{(CAP)(LF)}$$

Como se observa en la ecuación la frecuencia y el factor de carga tienen una relación inversa, es por eso que las áreas comerciales, de mercadeo y operaciones deben de estimar conjuntamente la cantidad de frecuencias a servir entre ciudades para que estas sean rentables.

## **ANÁLISIS**

En el ámbito tanto internacional como nacional los itinerarios de vuelo juegan papeles importantes y fundamentales en los procesos operacionales de las compañías aéreas y del sector aéreo como tal, ya que como se va a indicar más adelante las asignaciones de itinerarios permiten a los entes de control como el control de tráfico aéreo, programar con antelación como se distribuirá el espacio aéreo a determinadas horas. Las variantes de modelos como lo son el hub-spoke o el point to point route son importantes ya que estas definen el modelo de negocio de la compañía y el segmento del mercado al cual están dirigidos. Los Hubs son representativos por los altos niveles de tráfico y congestión que presentan un volumen considerado de pasajeros, pero que al mismo tiempo permite que las aerolíneas ofrezcan más destinos a los usuarios hacia los spokes haciendo su portafolio de producto mucho más amplio y sus ingresos sean mayores. La determinación del factor de carga es relevante y crucial ya que esta es uno de los principales indicadores en la toma de decisiones para que las compañías opten realizar los vuelos. A nivel nacional se concentran 3 Hubs de gran importancia para las compañías aéreas como los son la ciudad de Bogotá para la gran mayoría de aerolíneas de gran tamaño y la ciudad de Medellín y Rionegro para las aerolíneas catalogadas de carácter regional o de bajo costo.

### **2.2.2.2 Propuestas de itinerarios de vuelos**

Bazargan [23] propone un desarrollo de rutas y un proceso de itinerarios de vuelos en los cuales menciona dos tipos de actividades las cuales son el desarrollo estratégico y el desarrollo táctico; en el desarrollo estratégico se enfocan en los itinerarios futuros que dependen del alcance que consideren las compañías es así como en el desarrollo estratégico pueden catalogar tiempos en pocos meses hasta periodos de diez años dependiendo de las políticas de la compañías. Por otro lado las estrategias tácticas se concentran en términos de corto tiempo que se basa en periodos diarios.

El desarrollo estratégico comprende las fases de planeación las cuales son:

- Itinerarios de Vuelos
- Asignación de Flota y enrutamiento de la Flota
- Mantenimiento de Aeronaves
- Asignación de Tripulaciones

El desarrollo táctico comprende las fases operacionales las cuales son:

- Gestión de los ingresos
- Asignación de puertas de embarque
- Operaciones Irregulares



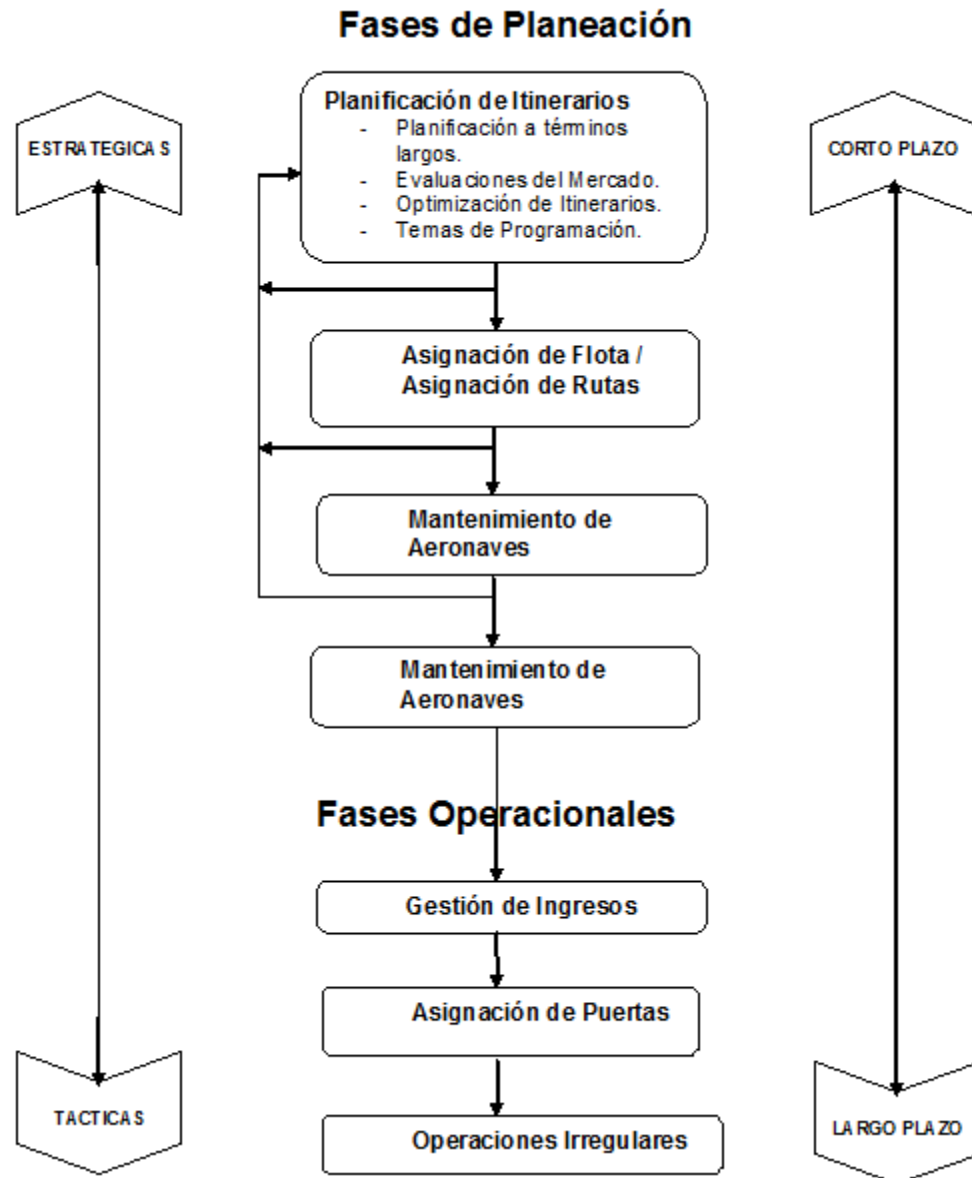


Figura 26. Jerarquía de la planeación de aerolíneas. [24]

STOJKOVI, SOUMIS, DESROSIERS y SOLOMON [25] proponen un modelo que determina nuevos itinerarios de vuelo basados en las transferencias previstas de tripulaciones, los periodos de descanso, las conexiones de los pasajeros y el mantenimiento. La contribución principal es modelar y resolver de manera óptima y en tiempo real cuando en los días de operación ocurren perturbaciones menores. El dual se muestra como un modelo de red por lo tanto resoluble en un entorno de tiempos reales además, puede ser utilizado en funcionamientos de planeaciones más sofisticados. DOBSON y LEDERER [26] estudian la competencia de precios que existe en las opciones de itinerarios de vuelos que ofrecen las compañías aéreas que operan el modelo hub-and-spoke. Se plantea algoritmo heurístico en donde el objetivo del algoritmo es encontrar la maximización de los beneficios en los itinerarios de vuelos para las aerolíneas, rutas y precios en un sistema hub-and-spoke utilizando sólo un hub en la operación. El algoritmo encuentra los mejores vuelos, rutas y precios en un proceso de tres niveles jerárquicos.

[27] LUNG WU y CAVES presentan un enfoque estocástico para modelar la operación del Turn Time o Turn Around<sup>4</sup>, el modelo indica que la puntualidad en la salida de un vuelo está influenciada por la puntualidad de la llegada de una aeronave, la longitud del tiempo estipulado en tierra y la eficiencia operativa de los servicios en tierra. El modelo matemático desarrollado se basa en la formulación estocástica de la puntualidad en la salida de una aeronave cuando cumple el turn time en términos de su itinerario y la eficiencia de los servicios en tierra, el objetivo final del modelo es minimizar los costos del sistema, que incluyen los costos de demora de los pasajeros, costos de demora de las aeronaves y los costos de itinerario de la aerolínea; todo esto teniendo en cuenta que aumentar el tiempo de turn time no es una opción ya que reduciría la productividad de la aeronave.

Higle y Johnson [28] proponen un modelo que integra un sustituto de los reglamentos de la FAA<sup>5</sup> sobre el mantenimiento de aeronaves y la planificación de itinerarios, el modelo involucra la determinación de vuelos los cuales son considerados como flujo en una red dinámica, afirman que los itinerarios de las compañías aéreas son cíclicas en la naturaleza y están diseñadas para repetirse cada 'c' unidades de tiempo.

## **ANÁLISIS**

Se evidencia como los diferentes autores hacen un énfasis fundamental en la maximización de las utilidades a través de diferentes técnicas, las cuales implican modelos matemáticos como heurísticas y variables adicionales que son difíciles de predecir en un entorno aún más complicado ya que estas se presentan en un tiempo real. La interacción entre los diferentes modelos es atractiva ya que se enfoca en aspectos operacionales globales que pueden aportar mayor información a un modelo superior el cual optimice de forma ideal los itinerarios planteados por la aerolínea inicialmente. Los desarrollos estratégico y tácticos son trascendentales para el buen funcionamiento de las compañías, en estos están constituidos todo los elementos que van a estar ligados en las operaciones aéreas. Los itinerarios pueden llegar a ser muy estrictos en el cumplimiento del tiempo en que el avión permanece en tierra ya que para las aerolíneas regionales en el país por lo general este no excede los quince minutos en tierra mientras se cumple el turn around esto debido a que en ocasiones se centralizan los procesos que se ejecutan en esta etapa del itinerario haciéndose solamente el desabordaje y abordaje de pasajeros al igual que el cargue y descargue de los equipajes y en ciertas ocasiones el repostaje de combustible, esta centralización se hace en los hubs. Mientras que las grandes aerolíneas tienen tiempos más largos de turn around y ejecutan procesos más complejos y estrictos, en algunos casos estas restricciones por carácter de seguridad entorpecen la operación de manera incontrolada, de esta forma y como se menciona más adelante en la investigación da origen a las operaciones irregulares que es uno de los principales variables que las aerolíneas deben de estar preparadas para corregir en la marcha de la operación.

### **2.3.3 Asignación de flotas (fleet assignment)**

Una vez finalizada la asignación y planificación de itinerarios se da paso a la adecuada asignación de flotas a cada vuelo en el itinerario establecido. La principal tarea de la asignación de flota es seleccionar cada tipo de aeronave de la flota en un vuelo en particular descrito en el itinerario. Abara [29] considera que el objetivo de la asignación de flotas es asignar tantos segmentos de vuelos como sean posibles en el itinerario establecido a una o más tipos de flotas disponibles, mientras se optimiza alguna función objetivo y se conocen varias restricciones operacionales del proceso. Las aerolíneas normalmente operan números diferentes de tipos de flotas, cada flota posee diferentes características y costos

asociados, tales como capacidad en el número de sillas, las diferentes configuraciones de peso de aterrizajes, tripulaciones, personal de mantenimiento y combustibles [30].

Los costos de mantenimiento son uno de los mayores factores que tienen en cuenta las aerolíneas para que estas sean menos diversas en la asignación de flotas; cuando una compañía aérea tiene una gran diversidad de flotas requiere tripulaciones capacitadas al igual que personal capacitado para cada tipo de flota, diferentes planes de mantenimiento y menor flexibilidad en los casos en los que deban suplir una aeronave por otra cuando una falla ocurra, por esto es muy común que los modelos en la asignación de flotas estén integrados con la planeación de mantenimiento y la asignación de tripulaciones.

A continuación se describen las principales consideraciones para la asignación de flotas en el transporte aéreo.

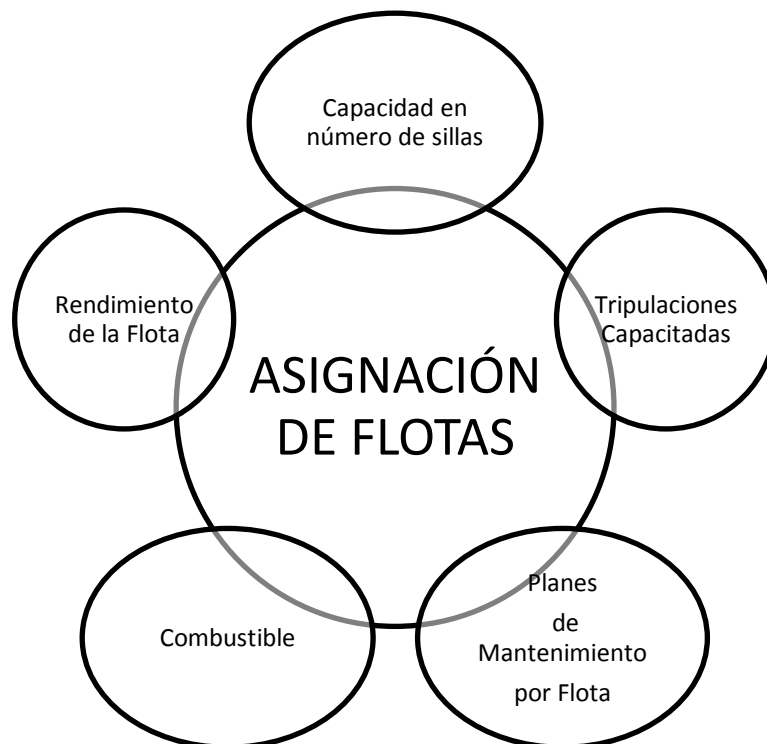


Figura 27. Consideraciones para la asignación de flotas. [Fuente: Autoría Propia]

Bazargan [31] describe que la mayor preocupación en la formulación de modelos de asignación de flota es mantener el seguimiento constante de las flotas en diferentes aeropuertos en cualquier punto dado en el tiempo, por lo tanto describe un método de una red de espacio temporal (time-space network) para formular el problema; en donde el problema es formulado finalmente como un problema de red de múltiples servicios (multi-commodity network problem).

Sherali, Bish y Zhu [32] presentan un tutorial en el cual exponen modelos de asignación de flotas con la combinación de otros procesos de decisión como los son el de la asignación de rutas, la asignación de tripulaciones y planificación de mantenimiento; se refieren también a procedimientos de búsqueda aleatorias y finalmente mencionan que el problema de asignación de flotas es formulado con un modelo de programa mixto entero (mixed-integer program) y estrategias de ramificación (branching strategies) basados en los itinerarios de las aerolíneas.

SURAMANIAN, SCHEFF, QUILLINAN, WIPER, MARSTEN [33] estudian el caso de la aerolínea Americana Delta Airlines, llamado Coldstar en el cual plantean un modelo de programación lineal entera mixta de gran escala (large scale mixed-integer linear programming) y también emplean el método de una red de espacio temporal (time-space network) que asigna tipos de flotas a las secuencias de vuelos a fin de minimizar la combinación de operaciones. AHUJA, GOODSTEIN JO, MUKHERJEE, ORLIN y SHARMA [34] se enfocan en el modelo de la asignación de flotas FAM (fleet assignment model) y en el TAM (The through assignment model) el cual consiste en un vuelo en el cual los pasajeros tienen un destino final pero la aeronave realiza una parada en una aeropuerto en el cual los pasajeros que tienen como destino final otra ciudad no deben desabordar la aeronave y cambiar de aeronave para continuar con su viaje, los modelos que consideran son el algoritmo de búsqueda por vecindad (Neighborhood Search Algorithm) y el método de búsqueda Tabú.

ANTOINE, BIENIASWSKI, KROO, WOLPERT [35] usan la inteligencia colectiva (COIN) como un marco para el diseño colectivo, que se define como un grupo de agentes con una determinada utilidad u objetivo a nivel del sistema. En el caso de planificar la asignación de flota, los agentes coinciden con dos tipos de variables las cuales son el número de aviones asignado a cada ruta para cada segmento de tiempo, y el tamaño de la flota residente en cada aeropuerto.

## **ANÁLISIS**

Las técnicas usadas por los autores tienen un enfoque especial en el manejo de redes, se hace más representativo el uso de la búsqueda por vecindad de puntos

y el método tabú ya que se van acercando a un óptimo desechando las posibles malas respuestas y guardándolas en un tipo de memoria para no volver a ese punto en especial, por supuesto todas estas redes tienen connotaciones importantes ya que implican que las frecuencias de las flotas sean equilibradas según los itinerarios previamente asignados debido a que no es factible realizar vuelos con flotas de la misma característica en todas las rutas, esto se origina porque la demanda de sillas se ve incrementada en unas horas en especial del día las cuales son adoptadas por las aerolíneas como horas pico, y por ende las flotas a asignar son de mayor capacidad; otros aspectos a considerar son las condiciones de desempeño de la aeronave y el tipo de aeropuerto al que van a realizar su vuelo ya que algunos presentan restricciones en longitud de la pista de aterrizaje y de condiciones meteorológicas adversas las cuales no todas las flotas están en capacidad de operar. La modernización de flotas de las compañías aéreas ha significado que las mismas inviertan dineros considerables en la compra de nuevos aviones, pero al mismo tiempo ahorran un dinero considerable ya que al adquirir flotas que tienen las mismas configuraciones pero solo cambian el rendimiento no deben de enviar a las tripulaciones a cursos adicionales para recibir capacitación de una aeronave nueva sino que pueden rotar las tripulaciones por la flota completa, este fenómeno se ve en la tecnología que maneja la fabricante de aviones Airbus y sus modelos de aviones A-318, A-319, A-320 y A-321 que como se mencionaba anteriormente sólo cambia el rendimiento de la aeronave y la capacidad de sillas en cada referencia de modelo.

#### **2.3.4 Enrutamiento de aeronaves (aircraft routing)**

Como se ha constatado el proceso para llegar al enrutamiento de aeronaves se parte previamente desde la construcción de itinerarios y la asignación de flotas donde los resultados de estas labores identifican el flujo de flotas a través de las redes, pero aún no se identifica específicamente que aeronave de la flota está asignada para cada trayecto. En esta actividad se maneja la rotación que tiene la aeronave por su matrícula o los números de registros que identifican una aeronave y regularmente están ubicados en la cola de las aeronaves o en los costados de la parte trasera del fuselaje de la aeronave (tail number), las consideraciones en este problema son maximizar la cobertura de los vuelos en donde cada trayecto de vuelo debe ser cubierto solamente por una aeronave, los requerimientos de mantenimiento ya que no todos los aeropuertos a los que vuela una aerolínea poseen bases de mantenimiento, por lo regular estas bases están ubicadas en los hubs [36].

## Principales generalidades del Enrutamiento de Aeronaves:

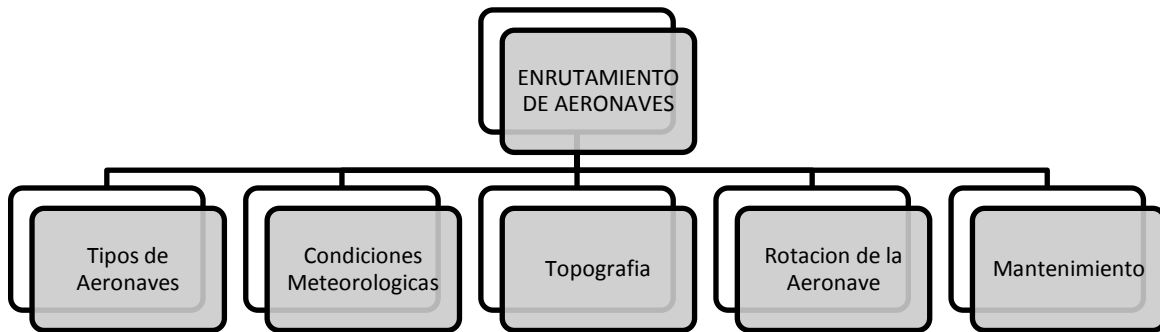


Figura 28. Generalidades enrutamiento de aeronaves. [Fuente Autoría Propia]

Este tipo de problemas también se caracterizan por encontrar rutas de vuelo óptimas entre varios obstáculos de un origen dado a un destino dado. Estos obstáculos podrían ser rasgos geográficos, pero también podrían ser "zonas en las que está prohibido volar", zonas generales que separan el tráfico entrante y saliente cerca de un aeropuerto. En términos militares, se podría desear evitar regiones alrededor de alguna amenaza, como un radar enemigo o el sitio de un misil. En la práctica, el problema de enrutamiento por lo general también incluirá límites de maniobrabilidad junto con coacciones durante el tiempo de llegada en el destino. Los remotos refinamientos del problema son posibles, por ejemplo, en el contexto militar, una ruta óptima podría tomar en cuenta "la visibilidad", explotando el terreno para ocultar el avión.

BARTHOLOMEW, PARKHURST Y WILSON [16] enuncian un algoritmo de encaminamiento heurístico en donde este algoritmo procura reducir al mínimo un coste de ruta que está compuesto de elementos como la distancia, el uso de combustible y las medidas de exposición a amenazas y proximidad a obstáculos. El acercamiento puede ampliamente ser descrito como un algoritmo genético que construye rutas de una manera paso a paso. Nuevas ramas de prueba son formadas en el fan-out (despliegue en forma de abanico) de la posición actual y las que parecen más prometedoras se mantienen en una lista de posibles rutas candidatas. Estos candidatos también son sujetos a modificaciones escogidas al azar como la adición o la eliminación de puntos decisivos suplementarios. Si tales

modificaciones conducen a una ruta mejorada estas son conservadas; de otra manera estas son desechadas. NILIM, EL GHAOUI Y DUONG [17] aducen que el aircraft routing es una de las partes principales del retraso en la dirección del tráfico aéreo (ATMS)<sup>6</sup> en EE.UU y Europa, lo proviene del clima convectivo<sup>7</sup>. En la práctica actual de la gestión del tráfico aéreo, las zonas tormentosas predichas son consideradas como obstáculos deterministas y por esto son evitados completamente. Por consiguiente, la estrategia actual es demasiado conservadora e incurre en un alto retraso. En realidad, la dinámica del tiempo convectivo es estocástica en la naturaleza. De ahí, la capacidad del espacio aéreo es probabilística, la cual se reduce drásticamente con el tiempo convectivo. El objetivo [17] es tratar con la naturaleza dinámica y estocástica de las tormentas y añadir el recurso en el encaminamiento de mejoras en el enrutamiento de las aeronaves orientando el problema de dirección de flujo de aeronaves usando un algoritmo de programa estocástico dinámico.

MARLA LVANYA, BARNHART CYNTHIA [37] se refieren a procesos de optimización robusta en donde se estudian dos tipos generales de modelos sólidos y un enfoque a medida que utiliza el conocimiento del dominio para guiar el proceso de solución. Las clases generales de los modelos son valores extremos, y la probabilidad limitada. El modelo se caracteriza por ser de naturaleza determinista dinámico.

SUAIBATUL, SITI, TAN KIM, NOVIN, EDI L.HARAHAP, MALEM [38] se enfocan en un ruteo de aeronaves basados en el ámbito del mantenimiento de las mismas proponiendo un algoritmo de búsqueda directa para la solución de un modelo de programación entera usando (set-partitioning)<sup>8</sup> el cual es una formulación de un conjunto de particiones en las que las variables de decisión representan rutas viables para la aeronave.

## **ANÁLISIS**

En Colombia por lo general las rutas que se ven comprometidas por longitud reducida de sus pista de aterrizaje y el clima adverso, son cubiertas por aeronaves turbohélices con capacidad de hasta 68 pasajeros, además se debe considerar que para las aerolíneas en especial las que tienen operaciones con Hub es importante que la flota regrese a su hub principal que por lo general tiene su centro de mantenimiento más grande en esta ciudad, al igual que cuenta con tripulaciones de reserva las cuales pueden cubrir más fácilmente las posibles variaciones en la asignación de las rutas.



La naturaleza dinámica del problema hace interesante los desarrollos de los algoritmos que proponen los autores en especial los algoritmos para evitar las situaciones adversas asociadas a las condiciones climatológicas en donde estas pueden ser también estocásticas, las predicciones que se hacen con antelación en los modelos deterministas ayudan al ahorro de costos en la medida de que si las condiciones no son las adecuadas para el desarrollo de las operaciones aéreas, las aeronaves no tendrán que gastar combustible en la ruta planificada, de modo a que esperarían un tiempo adecuado para la realización del vuelo o de lo contrario dispondrían de la aeronave para la reestructuración de las operaciones del día.

El algoritmo genético es interesante y eficiente ya que integra variables que arrojan posibles soluciones prácticas de enrutamientos, al presentar varias rutas el sistema evoluciona y se pueden agregar restricciones más significativas que rechazan los puntos menos atractivos y dejan los más representativos para la toma de decisiones. El algoritmo genético por su naturaleza de búsqueda estocástica le da cierta ventaja al explorar más regiones del espacio de soluciones del problema y obtener rendimientos más prometedores.

### **2.3.5 Asignación de jornadas para tripulaciones (crew scheduling)**

En este tipo de problema la construcción de horarios para la tripulación de aerolíneas es un complicado e importante problema. Es complejo debido a que da lugar a problemas de gran escala además de hacer frente a la dificultad de acuerdos colectivos. Su importancia radica en la cifra que representa el gasto salarial destinado a los miembros de la tripulación, que para grandes aerolíneas puede ascender hasta cientos de millones de dólares anuales y es el segundo costo más grande que asumen después del costo de combustibles[39].

Las fases de la planificación para jornadas de tripulaciones es la siguiente:

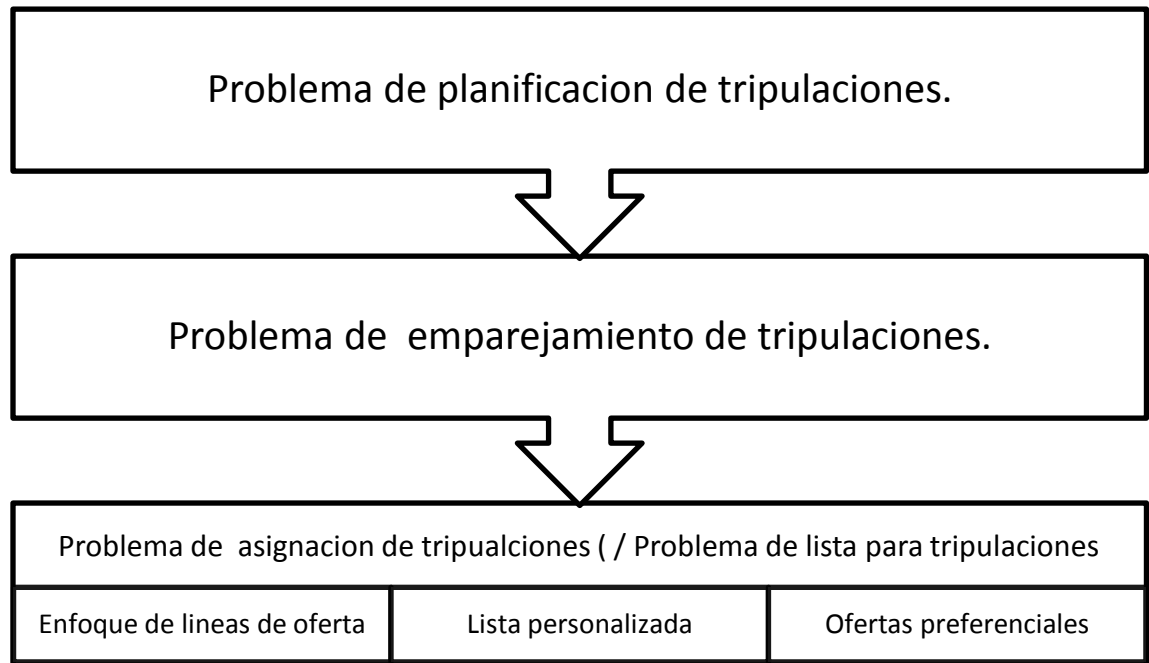


Figura 29. Fases de la planificación de tripulaciones. [139]

La mayoría de las compañías aéreas construyen los horarios en dos fases. Que corresponden a los dos subproblemas [11] que se derivan del Aircrew Rostering Problem (Crew Scheduling). En la primera fase se establece una serie de emparejamientos a partir de un conjunto dado de viajes. Cada asociación es una secuencia de segmentos de vuelo en días consecutivos que comienzan y terminan en el lugar base de la tripulación, de acuerdo al arreglo colectivo. El problema del emparejamiento de la tripulación [12] (Airline Crew Pairing Problem) al igual que Bazargan [13] enuncian que consiste en encontrar el conjunto de parejas que presente el mínimo costo, cubriendo todos los vuelos programados para un periodo determinado.

Özdemir [14] plantea la fase de emparejamientos como un problema de programación entera, pero para reducir su complejidad es llevado a un problema de programación lineal además menciona que el método más conocido para resolver problemas de programación lineal de gran escala es el método Sprint, también en estudios anteriores, otro método que llaman la generación de apareamiento dinámica. Comúnmente para encontrar valores de número entero después de la solución de un problema de programación lineal, se usa el branch

and bound o el branch and follow method. También, el algoritmo de Carmen es otro método para conseguir valores de número entero después de encontrar la solución de un problema lineal.

En la segunda fase el problema de asignación de turnos para tripulaciones (Airline Crew Rostering Problem) Balaji y Ellis[15] describen como se construye planillas mensuales personalizadas para los miembros de la tripulación mediante la asignación de los emparejamientos y de periodos de descanso(Fase 1) mientras se incorporan tareas pre-asignadas, una ocupación pre-asignada es una actividad que generalmente representa una cita médica o un proceso de capacitación que necesariamente debe ser incluida en la planilla mensual de un empleado específico.

La construcción del calendario o planilla debe tener en cuenta la cualificación de los miembros de cada equipo, así como las actividades pre-asignadas. Además varias disposiciones del acuerdo colectivo afectan la forma en que las parejas y los descansos pueden ser asignados a los empleados.

Ambos subproblemas son NP-duros (no existe un algoritmo que pueda encontrar el óptimo global en un tiempo polinomial). Debido a que el problema es complejo, la mayoría de los métodos propuestos en la literatura se basan en el análisis heurístico.

En el Rostering Problem, [11] la mayoría de aerolíneas resuelven el Rostering Problem en dos etapas. La primera etapa consiste en pre-asignar ciertas actividades específicas o periodos de descanso a miembros individuales de la tripulación. Estas actividades pre-asignadas podrían incluir vacaciones anuales, citas médicas, procesos de capacitación, (emparejamientos deseados, o periodos de descanso concedidos en momentos específicos durante el mes), actividades de transición (actividades que se iniciaron en el mes anterior y se finalizan al inicio del mes en curso) y bloques de reserva (periodos de tiempo donde el empleado debe estar disponible para sustituir a otro miembro de la tripulación que no puede trabajar su asignado). La segunda etapa consiste en la construcción de horarios mensuales por grupos y tiempo libre para miembros individuales de la tripulación

El objetivo es maximizar la duración total de emparejamientos para ser cubiertos por los miembros de la tripulación regular durante el mes; las combinaciones no cubiertas son entonces asignadas a las tripulaciones complementarias o miembros de la tripulación trabajando bajo bloques de reserva. El objetivo del problema de turnos puede variar de una compañía a otra. A veces la función objetivo incluye

elementos que toman en cuenta la calidad de las listas construidas a partir del punto de vista de los miembros de la tripulación.

BUTCHERS, DAY, GOLDIE, MILLER, MEYER, RYAN, SCOTT [40] realizaron un estudio en el cual desarrollaron ocho aplicaciones computacionales para resolver el problema de asignación de jornadas para tripulaciones nacionales e internacionales, enfocándose en el set partitioning problem buscando el mínimo costo de asignación y la maximización de la productividad de las tripulaciones.

RASMUSSEN MATIAS, LUSBY RICHARD, RYANZ DAVID, LARSEN JESPER, [41] describen como utilizan el set partitioning, problema para solucionar el emparejamiento de tripulaciones (air crew pairing) y mencionan que resuelven normalmente el modelo con una generación de columnas, pero estas al tener una generación tan extensa de columnas tiene un impacto en el tiempo de solución, por eso limitan el número de vuelos subsecuentes y al hacer esto limitan el número de columnas permitiendo solucionar el problema más fácilmente y reduciendo el tiempo de solución. [42] THIEL aduce nuevas características al problema teniendo en cuenta los procesos de factores humanos en las tripulaciones, los periodos de fatigas laborales y las extensas jornadas que afrontan las tripulaciones, el modelo base es el set partitioning problema enfocándose en la disminución de costos de asignación de tripulaciones.

En la siguiente figura se indican las generalidades del Air Crew Rostering:

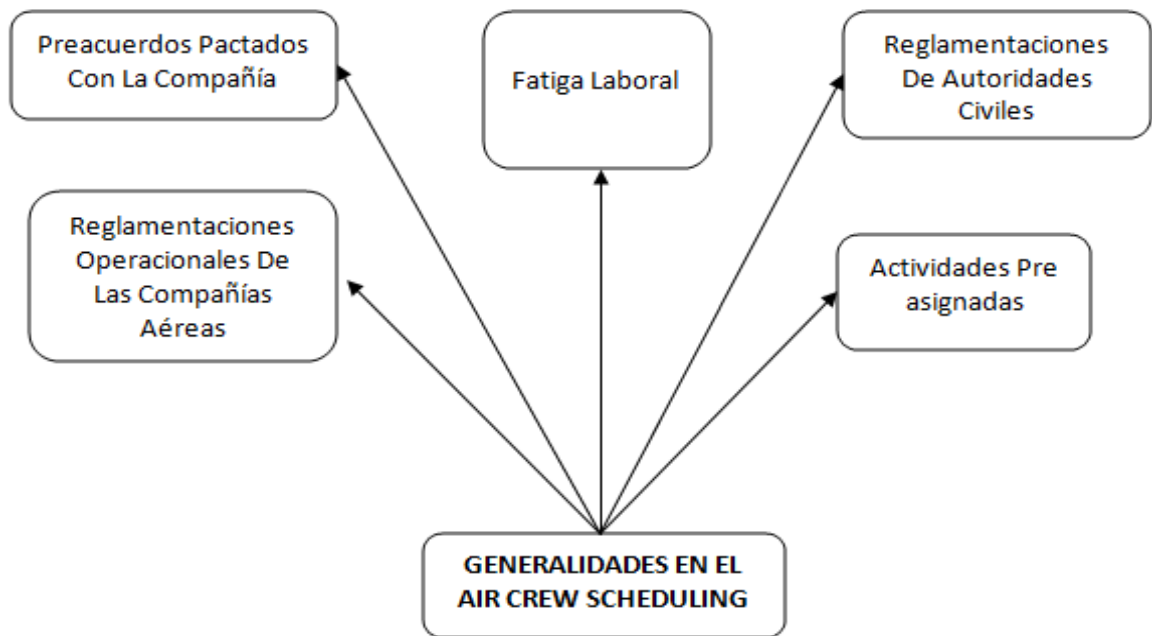


Figura 30. Generalidades en el Air Crew Scheduling. [Fuente: Autoría Propia]

A continuación se muestran las aproximaciones posibles para el Aircraft Scheduling:

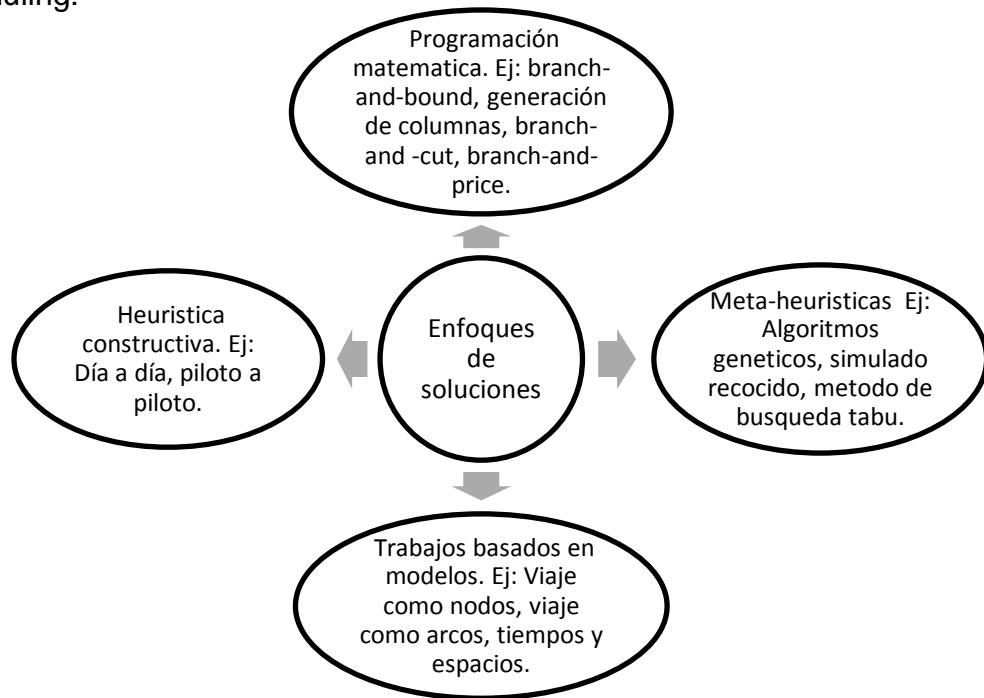


Figura 31. Aproximaciones de Posibles soluciones para el Crew Scheduling. [139]

## ANÁLISIS

Algunas compañías poseen preacuerdos realizados con las tripulaciones, más específicamente con los pilotos que son sindicalizados y tienen un tiempo significativo de servicio los cuales tienen preferencia en la asignación de turnos sobre los pilotos con menos tiempo laborado; los cuales deben de volar más horas al mes y tienen cargas laborales más pesadas, el anterior caso hace que la asignación de emparejamientos y posterior creación de planillas sean aún más complejas. En el mercado laboral colombiano esta situación es muy clara en donde los pilotos con menor experiencia están condicionados por contratos laborales con menores preferencias y los cuales traen consigo cláusulas de renuncia a beneficios anteriormente concedidos, esto se debe en primer lugar al requerimiento de horas de vuelo para ganar más experiencia y sumado a esto el mercado laboral es muy competitivo y las compañías aéreas tienen restricciones determinadas para la vinculación de tripulaciones.

Las temáticas que abordan los autores en investigaciones anteriores son muy precisas en mencionar como utilizan una variación de aproximaciones para llegar a soluciones que puedan servir para la toma de decisiones, si bien este problema se modela dentro de la programación matemática inicialmente como un problema de programación entera este se torna de alta complejidad viendo la necesidad de ajustarse a un problema de programación lineal para que su solución sea más fácil. El objetivo no es sólo simplificar las variables del problema sino también optimizar y maximizar la duración de emparejamientos propuestos, debido a esto el branch and bound es abordado para encontrar un valor entero después de la solución de un problema de programación lineal, la ventaja de esta técnica sobre otras es que en el caso del emparejamiento el algoritmo se encarga de detectar cuales no están siendo óptimos para desecharlos y evitar malgastar recursos y procesos. También se presenta la generación de columnas pero esta se torna dispendiosa debido al alto número de variables que entran a formar parte del problema a solucionar por esto se debe tener una estructura relativamente simple para generar un número pequeño de columnas para poder obtener una solución factible.

## 2.2.6 Planificación de personal (manpowering planning)

El recurso humano con que cuentan las organizaciones es de gran valor e importancia para el desarrollo de las mismas, las aerolíneas no son ajenas a estas premisas y por lo tanto deben de cumplir estándares más elevados ya que estas son medidas por su puntualidad, exactitud, funcionalidad, calidad y precio [43]. Se debe tener en cuenta que las aerolíneas cuentan con una gran variedad de personal como lo son sus pilotos, auxiliares de vuelo, mecánicos, servicios de tierra, servicios de manejo de equipajes, servicio de atención al cliente en los mostradores, personal administrativo entre otros y todos ellos deben de ajustarse a unos turnos que deben establecer previamente, días libres, locaciones específicas de trabajo y demás características que estén en los planes organizacionales de las compañías aéreas. El propósito principal de la programación de personal es derivar periodos cíclicos normalmente semanales, planes para cada empleado para que los costos totales de personal se reduzcan al mínimo y la eficiencia y la utilización estén maximizadas siempre que se cumplan los requisitos y regulaciones legales [44].

[45] RONG y GRUNOW abordan el tema con un modelo integrado de programación lineal entera mixto para disminuir los costos del personal, expresando como las tasas de llegada de mercancía entrante y saliente varía significativamente a lo largo de los días, por ende para utilizar los recursos de mano de obra eficiente se dispuso desglosar las actividades distribuyendo en un intervalo de tiempo entre la llegada del vuelo y el tiempo de carga de disponibilidad prometida a los clientes. [46] BAZARGAN menciona como las operaciones diarias son divididas en cuatro bloques de tiempos con una duración de 4 horas por cada bloque con la intención de minimizar el tamaño del personal disponible y hacerlo más eficiente esto con un modelo de programación lineal entera. [47] BRUSCO propone un modelo matemático el cual se refiere tanto a tiempo parcial y al tiempo completo empleado, sus límites y numerosas combinaciones de días de turnos de trabajo y las rotaciones semanales; enmarcados en un modelo de programación lineal entera.

## ANÁLISIS

La planificación de personal es de gran importancia, como lo mencionan los autores es la fuerza laboral con que se cuenta para cubrir todos los ámbitos de las compañías aéreas, la secuencia de turnos en las aéreas de operaciones y procesos y los horarios de oficina en las labores administrativas son un problema a resolver para optimizar los recursos y la funcionalidad de cada colaborador. En

cuanto la programación lineal y programación lineal entera que se usa para la elaboración de las secuencias de turnos en las áreas de operaciones y procesos, se puede decir que son métodos analíticos de solución capaz de resolver problemas de modelos con números de variables considerables, ambos métodos tienen en común que desarrollan un proceso de enumeración que permite comprobar todas las soluciones del problema hasta encontrar la óptima.

En cuanto al aspecto humano en muchas empresas aéreas no solo a nivel local sino que también a nivel internacional la planificación de personal especialmente en las operaciones y procesos están siendo delegadas a terceros en donde empresas especializadas en labores de aviación como atención de aeronaves en tierra, atención de pasajeros en los módulos y despachos, están encargadas de contratar este personal y asignarlo a las necesidades de las compañías aéreas. Estas formas de contratación como cooperativas han traído consigo algunos problemas en las aerolíneas ya que las condiciones de los trabajadores no son las mismas de las del personal que está vinculado directamente con las empresas aéreas, dichos problemas han sido protestas e inconformidades que en ocasiones han retrasado las operaciones de las aerolíneas y por ende sus itinerarios ya que el personal de tierra no prestaba el servicio correspondiente. Estos temas son de gran importancia ya que las eficiencias de las compañías se ven mermadas y los costos de operación se elevan considerablemente

## **2.4 OPERACIONES Y OPTIMIZACIÓN DE DESPACHO**

### **2.4.1 Gestión de ingresos (revenue management)**

Los ingresos en la industria aeronáutica están ligados al servicio que prestan, el cual es el asiento que disponen en cada aeronave para los clientes, ya que cada vez que una aeronave inicia su fase de vuelos y dispone de asientos libres está dejando de generar ingresos que no se obtienen debido a la no ocupación de los mismos. El principal reto que tienen las compañías aéreas es fijar el precio según las condiciones actuales del mercado, es por ello que las aerolíneas se concentran en el problema de planificación de control de inventario de asientos; el cual consiste en decidir si el asiento debe ser vendido a una solicitud de reserva actual, o si se debe guardar para un cliente más rentable. Los modelos matemáticos que se generan a partir de este problema hacen alusión a intentar determinar las asignaciones de asientos de acuerdo al patrón de demanda que se genera al inicio de los periodos de reserva y se conocen como problemas de control de inventarios estáticos. [48]



[49] VONECHE muestra el problema de la gestión de ingresos describiéndolo como un modelo matemático entero mixto, no-lineal y estocástico; como se plantea originalmente se tendrían muchas variables de decisión, pero para hacerlo más sencillo dividen el problema en tres más pequeños, overbooking<sup>9</sup> el cual es la práctica de vender intencionalmente más sillas de las que se disponen con el fin de compensar el efecto de las cancelaciones de pasajeros y los pasajeros que nunca se presentan, de no hacer esto se estima que al partir la aeronave un 15 % de las sillas estarían vacías. Discount allocation<sup>10</sup> es el proceso de determinar el número de tarifas de promoción a ofrecer en un vuelo; en donde el costo de oportunidad de la venta de un ticket con descuento en lugar de una tarifa completa tiene que ser medido con el fin de tomar la mejor decisión posible y Traffic Management<sup>11</sup> el cual hace referencia al tipo de ruta que se usa, si es point-to-point-route o si es hub-and-spoke, en donde la decisión de vender un ticket de tarifa plena y un ticket con descuento es de gran importancia para manejar adecuadamente los ingresos.

MINHO, MING y YONG [50] atribuyen dos técnicas características a la gestión de ingresos las cuales son el inventario de fijación de precios que se refiere a la apertura y al cierre de las clases de reserva predefinidos; y la asignación dinámica se refiere a los precios que cambian en el tiempo para cada clase de tarifa. En la siguiente figura se muestra una relación entre las variables involucradas como lo son la estructura del mercado, la demanda, los factores de operación el factor de carga, los precios y finalmente los ingresos.

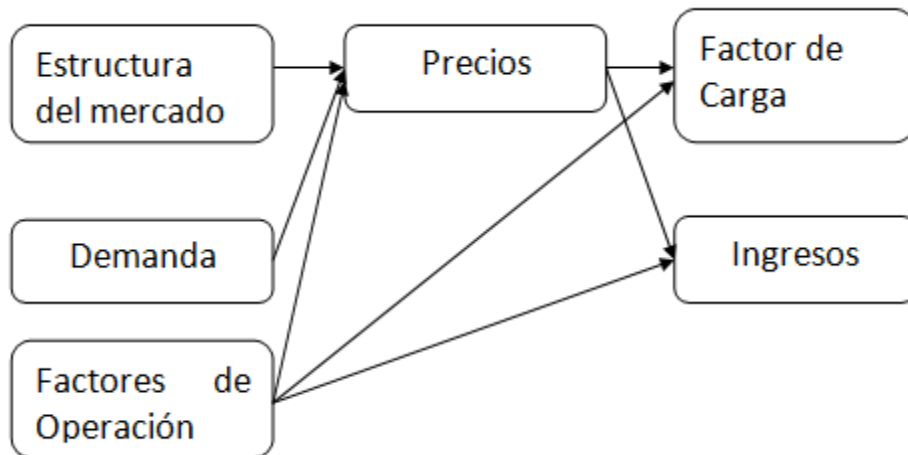


Figura 32. Relaciones entre variables en el Revenue Management. [50]

PAK y PIERSMA [51] exponen la naturaleza estocástica del problema al igual que soluciones estáticas y dinámicas, representadas en un modelo de programación lineal determinista.

CÔT, MARCOTTE y SAVARD [52] presentan un nuevo enfoque de modelado que permite la solución conjunta de la asignación de capacidad y la fijación de precios, usando límites de reserva predefinidos; el enfoque se basa en el paradigma de la programación de dos niveles, un caso especial de la optimización matemática jerárquica. BAZARGAN [53] se refiere a las asignaciones anidadas (nested allocations) y no anidadas (non-nested allocations), que son dos enfoques del problema de asignación de asientos en las aerolíneas; en los enfoques no anidados, los números distintos de asientos llamados cubos se asignan exclusivamente a cada clase de tarifa. La suma de estos cubos se suma a la capacidad total de asientos del avión. En las asignaciones anidadas cada clase de tarifa es asignada a un límite de reserva, que es el número total de asientos asignados a esa clase de tarifa más la suma de todas las asignaciones de asiento a sus clases de tarifas más bajas.

La siguiente tabla muestra los asientos asignados a cada clase de tarifa bajo asignaciones anidadas y no anidadas en un avión Airbus A-320 con capacidad para 150 pasajeros:

CLASE DE TARIFA	ASIGNACIÓN NO ANIDADA	ASIGNACIÓN ANIDADA
Y	30	150
B	50	120
M	20	70
H	20	50
Q	20	30

Tabla 1. Asientos con asignaciones anidadas y no anidadas [52]

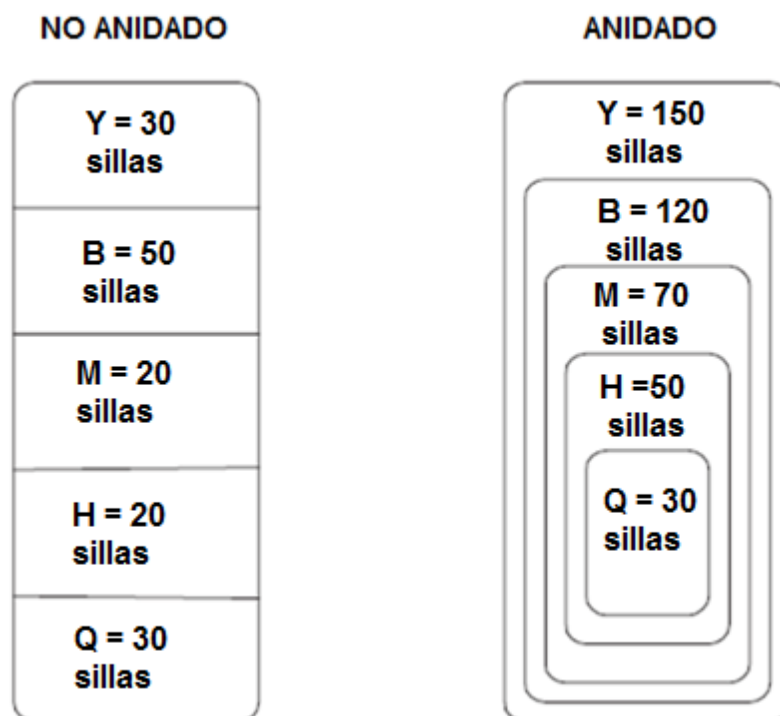


Figura 33. Asientos con asignaciones anidadas y no anidadas. [52]

En la siguiente tabla se muestra un ejemplo de cómo se maneja el factor de carga según la capacidad de la aeronave y las tarifas promedio dando como resultado un ingreso determinado

TARIFA PROMEDIO	NÚMERO ESPERADO DE PASAJEROS	FACTOR DE CARGA	INGRESOS ESPERADOS
\$ 240	100	0,67	\$ 24000
\$ 220	105	0,77	\$ 25300
\$ 200	128	0,85	\$ 25600
\$ 180	140	0,93	\$25200
\$160	150	1,0	\$24000

Tabla 2. Factor de carga e ingresos esperados. [117]

Como se puede observar la tabla anterior muestra los valores del número de pasajeros esperados para diferentes vuelos, todos estos tienen como referencia un avión Airbus A-320 con capacidad para 150 pasajeros, retomando la idea del factor de carga descrito en capítulos anteriores, se puede considerar que el factor de ocupación más alto no se traduce necesariamente en mayores ingresos para las compañías aéreas, de acuerdo a esta tabla, un factor de carga del 85% genera mayores ingresos que el factor de 100% para la línea aérea.

## **ANÁLISIS**

Los modelos que presentan en la gestión de los ingresos están ligados con el tipo de operación que desarrolla la aerolínea, esto se debe a que los enfoques de tipo hub – spoke que usan las grandes aerolíneas relacionan estos tres modelos anteriormente descritos y las autoridades permiten estos ya que la no implementación de los mismos no dejaría utilidad alguna para este negocio. En el modelo de las aerolíneas regionales básicamente ni implementan dichos modelos ya que no tienen distinción en las asignaciones de sillas de las aeronaves y las tarifas varían según la proximidad del día en que se va a efectuar el vuelo esto se presenta ya que entre más lejano este el vuelo el precio de la silla que ofrece la compañía es más barato que el precio de la silla el mismo día en que se va a realizar el vuelo, el objetivo de ambos enfoques es vender sillas en las aeronaves ya que como se indicaba anteriormente el no tener una silla ocupada representan menores ingresos y costos más elevados en la operación.

Los precios son una base importante en la gestión de los ingresos principalmente en saber que las condiciones del mercado hacen que estos tengan una variabilidad en un determinado número de sillas a ofrecer en los vuelos. La planificación de determinar asignaciones de asientos de acuerdo a la demanda es importante esta acción está asociada con el factor de carga que cada aerolínea emplea para realizar sus proyecciones, la naturaleza estocástica del problema lo hace impredecible ya que este está sujeto a muchas variables de decisión como es el mercado, la oferta, la demanda, la competencia, los recursos que las empresas necesitan para realizar la operación entre otros. Para controlar estas variables las aerolíneas desarrollan modelos deterministas en un ambiente dinámico para así tener unas cifras estimadas que le proporcionen datos para establecer cuáles son las mejores tarifas a ofrecer en cada trayecto en que época del año y en qué hora del día, todo esto con el fin de maximizar los ingresos de la compañía y mantener la más alta ocupación de sillas posible en cada vuelo.

#### **2.4.2 Gestión de sistemas de combustibles (fuel management system)**

La introducción de los motores jet en los años 50 implicó que las compañías fueran cambiando gradualmente sus aeronaves de motor a pistón por las nuevas tecnologías de los motores jet. En el mercado mundial los principales combustibles usados en los motores jet son el combustible Jet A en el mercado de los Estados Unidos y el Jet A-1 en los mercados internacionales ambos son básicamente queroseno<sup>12</sup> [54].

Las oleadas en los precios de los combustibles que se han experimentado desde hace una década han afectado drásticamente a las compañías aéreas, es así como se han originado quiebras, reducción de vuelos y disminución de las operaciones aéreas en todo el mundo. Las altas fluctuaciones que tienen los combustibles debido a las condiciones políticas y económicas del mundo en general y el Medio Oriente en particular afectan drásticamente a las compañías aéreas y al sector aeronáutico en general, de esta forma los precios de los combustibles tipo jet que son procesados del petróleo crudo, y los precios de los barriles de petróleo están fuertemente correlacionados [54]. Como se ha mencionado los costos de los combustibles y las tripulaciones son los más representativos en las operaciones de las compañías aéreas, es por esto que las compañías buscan optimizar al máximo el uso del combustible en función del costo de sus operaciones.

La Estrategia que se emplea habitualmente por la mayoría de las grandes compañías aéreas es la cobertura de combustibles (Fuel Hedging)<sup>13</sup> la cual es una estrategia que por lo general los vendedores y compradores de productos adoptan para protegerse contra el riesgo causado por las fluctuaciones del precio, en el caso de los combustibles en el sector aéreo las compañías buscan anticiparse a las posibles fluctuaciones tranzando precios por un valor mayor para el mes siguiente del valor actual del combustible y de esta forma asegurar que la compañía encargada de los combustibles le garantice el precio acordado haya o no fluctuaciones en el precio del mismo. Las estrategias de cobertura adoptadas por las compañías aéreas se pueden agrupar en dos grandes categorías: En los contratos de venta libre y en los que cotiza en bolsa; en la primera categoría los contratos se caracterizan por ser acuerdos entre una línea aérea y un proveedor de combustible y no están regulados, este tipo de contratos están sujetos al riesgo de falta de pago de cualquiera de las partes si alguna de estas entran en quiebra. En la segunda categoría son tipos de contratos negociados formalmente establecido y se negocian a través de intercambios internacionales y están protegidos contra el riesgo de la contraparte [55].

La gestión de sistemas de combustible se sintetiza en el siguiente esquema:

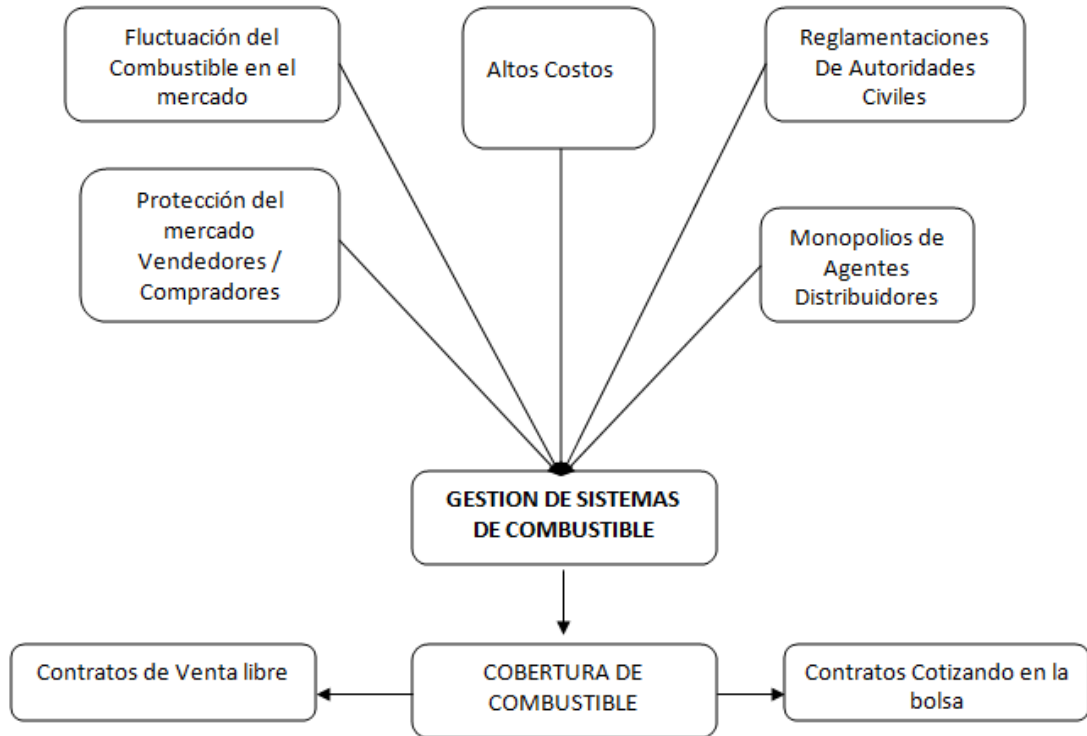


Figura 34. Esquema del Sistema de Gestión de combustibles. [Fuente: Autoría Propia]

VEDANT, SOMESH y VAIBHAV [56] presentan un modelo para la optimización del consumo de combustible durante las operaciones de aeronaves civiles. Varios parámetros se identifican como el efecto del consumo de combustible de los aviones durante sus operaciones. [57] Exploran la naturaleza del concepto del Fuel Hedging, aduciendo una política de cobertura permanente de los costos de combustible deben dejar beneficios a largo plazo sin cambios.

ZOUEIN, ABILLAMA y TOHME E [58] se refieren a un modelo de programación lineal en el cual la función objetivo en intenta minimizar el total del costo de combustible para un conjunto de vuelos predeterminados, para todas las aeronaves de la flota.

## ANÁLISIS

Los combustibles se representan como el principal insumo para la operación de las aeronaves y como el primero y más alto costo asociado a las operaciones de las compañías aéreas. Los precios de los combustibles tiene una alta variabilidad en el mercado y estos pueden variar dependiendo de la ciudad o el país que tenga como destino el vuelo correspondiente, una de las tácticas que emplean las aerolíneas para ahorrar dichos costos es que cuando la aeronave llega a una ciudad en la que los combustibles tienen precios más bajos intentan hacer un repostaje de combustible que no afecte el peso y balance de la aeronave y pueda cumplir la operación al retornar a la ciudad de origen o a las ciudades que tiene que cubrir más adelante en su itinerario, esta estrategia le puede representar desventajas ya que el mismo peso del combustible lo obligaría a consumir el mismo para tener un desempeño óptimo, por eso se debe de tener un cálculo exacto de las cantidades de combustible a repostar. Las técnicas de pago que se emplean mundialmente con los distribuidores de combustibles son adecuadas siempre y cuando las operaciones de ambos sectores estén estables, ya que al ser el negocio de la aviación tan dinámico en su naturaleza las compañías pueden tener desaciertos financieros muy fácilmente y tener deudas de miles de millones en donde uno de los principales acreedores serían los distribuidores de combustibles. La optimización de rutas es otro parámetro que las aerolíneas miden regularmente para determinar los consumos óptimos de combustibles, intentando determinar las rutas más cortas a los destinos programados y procurando que las aeronaves vuelen en las configuraciones que les permitan ahorrar la mayor cantidad de combustible posible.

El manejo que se le da a la gestión de combustibles a nivel nacional es interesante ya que las aerolíneas nacionales intentan como se mencionaba anteriormente repostar combustible la menor cantidad de veces posible siendo lo más eficientes en su consumo, sin embargo el fenómeno de variación de precios entre ciudades de los distribuidores monopolizados de combustibles ha logrado tener efecto en las operaciones de las aerolíneas principalmente en las aerolíneas de bajo costos, las cuales al tener unas tarifas tan atractivas en cuanto a bajos precios para los pasajeros no veían rentables las rutas en las cuales se encontraban estos distribuidores con precios tan altos; el problema llegó a ser tan grave que las aerolíneas optaron por no cubrir estas ciudades ya que los costos de operación eran superiores al margen de utilidad que les dejaban las mismas, las autoridades locales de cada ciudad tanto como las oficinas de fomento al turismo debieron de intervenir y mediar con los distribuidores para garantizar que se mantuvieran unos precios moderados ya que las rutas que cubren estas aerolíneas son

representativas para las economías de cada ciudad, ya que no manejan el modelo hub-spoke sino que manejan el modelos point- to point permitiendo al usuario llegar a su destino a costos bajos y sin escalas.

### **2.4.3 Operaciones irregulares de aerolíneas (airline irregular operations)**

Las operaciones irregulares son todas aquellas interrupciones que se originan debido a acciones no planeadas en el normal desarrollo de las actividades tales como problemas mecánicos de las aeronaves, condiciones climatológicas adversas a la operación, incapacidades por parte de alguno de los miembros de la tripulación, cierre inesperados de aeropuertos entre otros; dichas interrupciones originan que las aerolíneas se vean forzadas a reprogramar sus itinerarios o inclusive hasta cancelar algunos de sus vuelos, es por esto que las aerolíneas se preparan con planes de contingencia para solucionar estas irregularidades en el menor tiempo posible [59].

BALL, BARNHART, NEMHAUSER y ODONI [60] hacen un acercamiento a varios operaciones irregulares las cuales involucran remodelamientos de asignación de tripulaciones, enrutamiento de aeronaves y re asignación de itinerarios todo esto con el fin de minimizar los costos de estas operaciones irregulares, se apoyan en modelos deterministas y estocásticos. ARGUELLO, BARD y YU [61] presentan un modelo de programación lineal entera adaptado para el estudio del caso, este enfoque se basa en el modelo de aproximación de tiempos de banda (Time Band Approximation Model).

DELANO [62] resume el estado de la práctica en los centros de operaciones aéreas después de las secuelas de las operaciones irregulares de las aerolíneas.



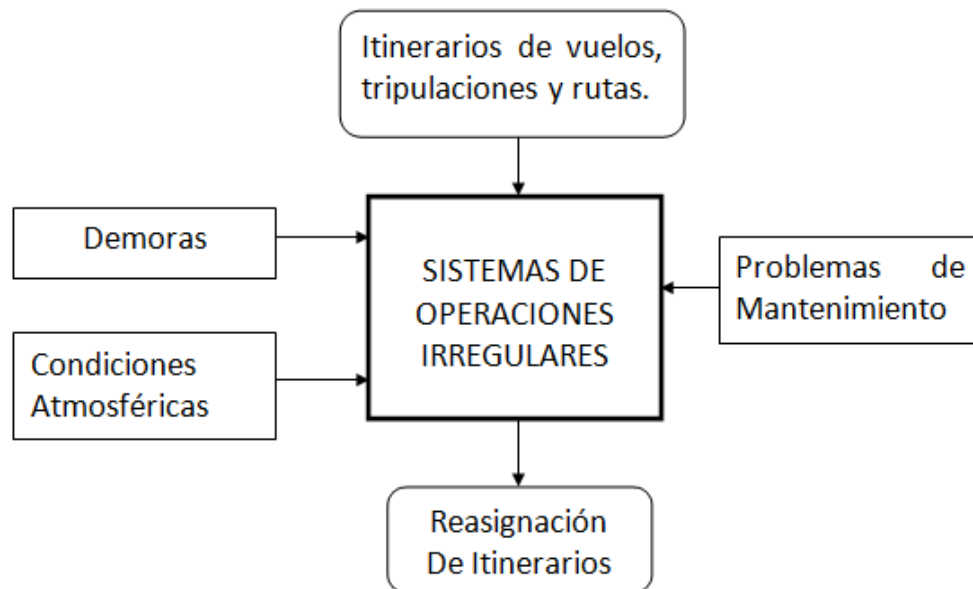


Figura 35. Factores que componen las Operaciones Irregulares. [50]

## ANÁLISIS

Las operaciones aéreas irregulares son de naturaleza estocástica estas involucran un número de variables considerables que como eslabones en una cadena al romperse uno de estos genera que la operación completa se retrase o se vea afectada de una u otra forma. Las operaciones irregulares pueden tener varios niveles de complejidad ya que pueden originarse de carácter individual o en general; cuando se habla de individual se refiere a un problema de tipo técnico de la aeronave, una incapacidad de un miembro de la tripulación, problemas asociados a despacho y problemas debido a mantenimiento de la aeronave. En cuanto al carácter general el principal tropiezo son las condiciones atmosféricas, al ser este un fenómeno que no puede ser controlado por las aerolíneas estas condiciones retrasan la actividad en su totalidad haciendo más compleja las reasignaciones de itinerarios y generando múltiples cancelaciones e incumplimientos en la operación, otro aspecto general es el control de tráfico aéreo ya que alta ocupación del espacio aéreo origina que se tengan horas específicas para que las aeronaves cumplan su itinerario o de lo contrario tendrían que esperar una nueva asignación de turno de llegada, en este aspecto se manejan modelos deterministas para que las operaciones irregulares afecten en lo menor posible y los costos de operación sean los menores posibles.

#### **2.4.4 Asignación de puertas de embarque (gate assignment problem, gap)**

El alto desarrollo y crecimiento de la industria aeronáutica y la demanda en aumento de vuelos alrededor del mundo han originado que los aeropuertos estén cada vez más congestionados y sus operaciones sean más complicadas que en épocas anteriores; asignar las puertas de embarque para las aeronaves acomodándose a los itinerarios de las diferentes compañías que operan en un aeropuerto es un tema trascendental el cual ha motivado a los investigadores a definir las mejores técnicas de optimización para enfrentar dicho problema [63]. Algunos de los mayores factores que inciden en este problema son el tamaño de las aeronaves, las distancias que deben recorrer los pasajeros para llegar a dichas puertas, la transferencia de equipajes de un vuelo a otro, la congestión de la rampa o plataformas de los aeropuertos, la rotación de aeronaves y los servicios de tierra requeridos por las aeronaves. [64]

El problema de asignación de puertas de embarque adecuadas suele ser manejado en tres niveles. En el primer nivel, los controladores de tierra utilizan el horario de vuelo para examinar la capacidad de las puertas para dar cabida a estos vuelos. El segundo nivel consiste en el desarrollo de planes diarios antes de la fecha real de la operación. El tercer nivel, debido a las condiciones irregulares, tales como demoras de operación, malas condiciones meteorológicas, fallas mecánicas y de mantenimiento obligan que estos planes sean actualizados y revisados en la misma hora y día de la operación para que puedan ser consistentes.[65]

CHENDONG [66] propone estudiar el problema con un modelo matemático híbrido basado en el método de programación de restricciones, combinaciones binarias y programación entera mixta, con el objetivo de minimizar el número de conflictos de las puertas de embarque en donde dos aeronaves no sean asignadas a la misma puerta y también reducir al mínimo el número de puertas que las compañías aéreas deben de subarrendar para manejar eficientemente la operación. BABIC, TEODOROVIC y TOSIC [67] usan un modelo de programación lineal binaria para este caso, BIHR, R [68] aborda el tema con la programación lineal, GU y CHUNG [69] proponen estudiar el tema por medio del algoritmo genético, XU y BAILEY [70] lo enuncian con un modelo mixto cuadrático de programación entera y la búsqueda tabú (Tabu search).

DING, LIM, RODRIGUES y ZHU [71] consideran los aeropuertos limitados en donde el número de vuelos supera el número de puertas disponibles, y donde los objetivos son reducir al mínimo el número vuelos y el total de las distancias que

recorren los pasajeros, usando el método de búsqueda tabú (Tabu search) y meta heurísticas.

HOI LAM, MENG, CAO y FAN [72] lo enfocan como un problema no determinista de un tiempo polinomial, en donde la asignación de puertas de embarque es combinatorial en la naturaleza.

V. PREM KUMAR, M. B. PRADEEP KUMAR, MICHEL BIERLAIRE [73] Formulan estos problemas como un modelo mixto de programación entero con una función objetivo lineal. Debido a la complejidad en el tamaño y la formulación del problema, recurren a la relajación de ciertos casos en los que una solución razonable no se obtiene dentro del límite de tiempo.

## **ANÁLISIS**

En la asignación de puertas de embarque se tienen como principales objetivos buscar la asignación óptima de puerta para cada aeronave y asignar las puertas a los vuelos correspondientes en donde los pasajeros deban de recorrer las menores distancias. Los modelos que utilizan los autores se ajustan a las metaheurísticas y la programación matemática. El algoritmo genético es usado para seleccionar la mejor combinación de variables con sus respectivos estados que más se relacionan con la variable dependiente, es decir, la ubicación de la puerta de embarque a asignar, que en algunas ocasiones la relación deseada en problemas de regresión no siempre es del tipo lineal en el estado inicial de las variables independientes, proporcionando así mejores modelos que se ajustan mejor y pueden explicar más la variabilidad de la variable. En la búsqueda tabú se genera una memoria de corto plazo, asociada a los itinerarios propuestos por las aerolíneas esto se hace para escapar de los óptimos locales como para implementar su estrategia de exploración y evitar buscar varias veces en la misma región en donde se va a asignar la puerta determinada para un vuelo determinado. En cada iteración se elige la mejor solución entre las permitidas y la solución es añadida a la lista tabú.

La asignación de puertas de embarque a nivel nacional es menos compleja ya que solo se manejan cuatro grandes aeródromos en los cuales se ve la problemática descrita, el aeropuerto con mayor problemática es el aeropuerto el Dorado de la ciudad de Bogotá este acoge a la gran mayoría de vuelos nacionales e internacionales ya que estos tienen como destino final la capital de la república y con la remodelación del nuevo aeropuerto EL Dorado ya se están presentando congestiones en las cuales se prevé las puertas de embarque no van a ser suficientes y se tendrán que tomar correctivas importantes en la adecuación de las

mismas esto asociado a las nuevas tecnologías en las aeronaves las cuales son de mayor tamaño en donde se deben de adecuar las puertas y reasignar el número de la mismas.

#### **2.4.5 Estrategias para el abordaje de una aeronave (aircraft boarding strategy)**

Este tipo de problema tiene como objetivo disminuir el llamado Turn Time o Turn around [6] (Tiempo en que permanece una aeronave en tierra desde que se estaciona en su puerta de embarque hasta que esta lista para su partida cumpliendo con el abordaje de los pasajeros y se cierran sus puertas), esto debido que para las aerolíneas no es rentable que una aeronave permanezca en tierra más del tiempo estipulado por su despacho de operaciones; las aeronaves generan ingresos a las aerolíneas permaneciendo el mayor tiempo en el aire y con sillas ocupadas. Un adecuado manejo del Turn Time permite a las aerolíneas contar con mayor utilización de sus aeronaves. A estos problemas los afectan principalmente el desabordaje de los pasajeros del vuelo que llega en ese momento, el descargue de los equipajes, el reabastecimiento de combustible, el servicio del personal de mantenimiento, el cargue de las maletas del vuelo que continua, el servicio de catering (abastecimiento de alimentos) y finalmente el abordaje de los pasajeros del vuelo [7].

En la figura siguiente se muestran los diferentes agentes que intervienen en el turn time de la aeronave:

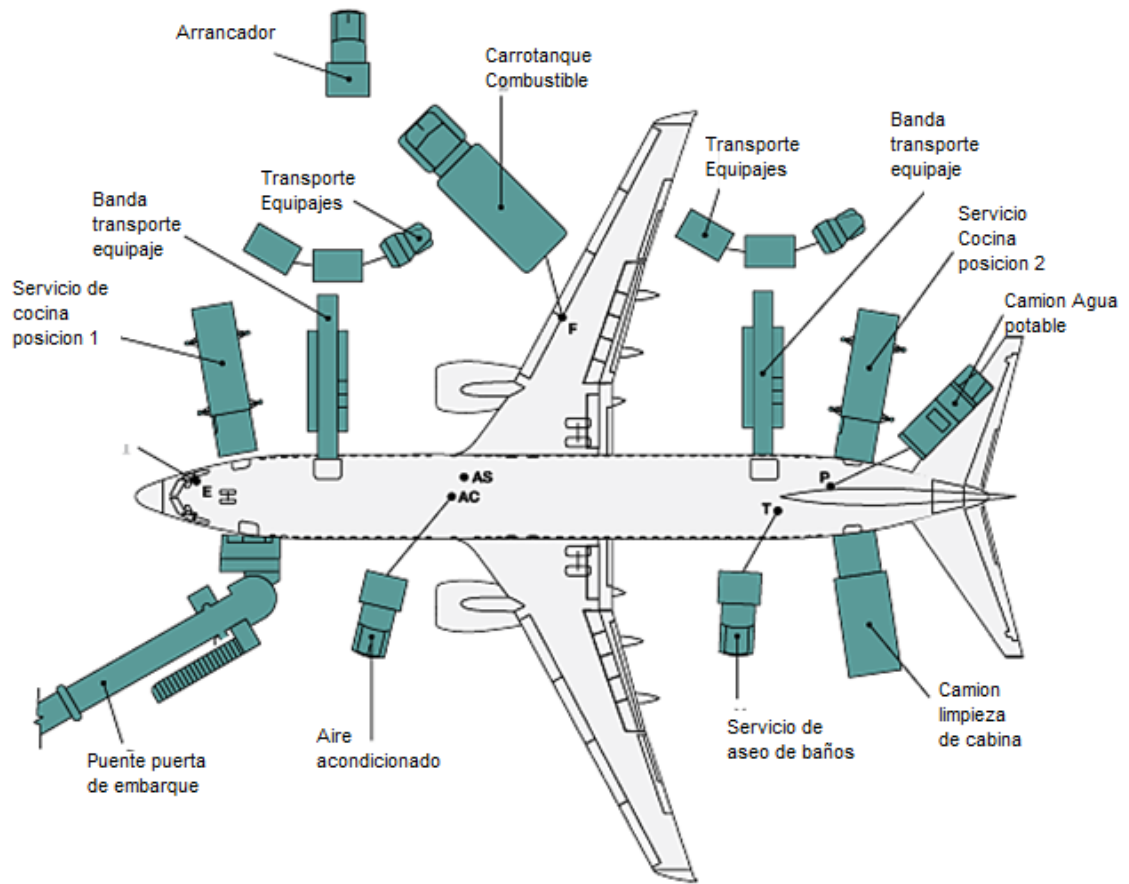


Figura 36. Proceso de servicio de abastecimiento en tierra (turn time). [75]

El proceso más conocido para el abordaje de una aeronave es el [10] back-tofront-method (método de atrás hacia adelante) en donde los pasajeros son organizados en grupos los cuales van pasando estratégicamente según la ubicación que les indique su pasabordo, en donde ingresan inicialmente los pasajeros ubicados en sillas desde las filas más lejanas a la puerta delantera de la aeronave. También se utiliza the random-method (método aleatorio de abordaje) y el window-middle-aisle o outside-inside boarding (método de abordaje desde la ventana seguida por la silla del medio hasta la silla del pasillo) [9]; los procesos se muestran en las siguientes figuras:

# ATRAS HACIA ADELANTE

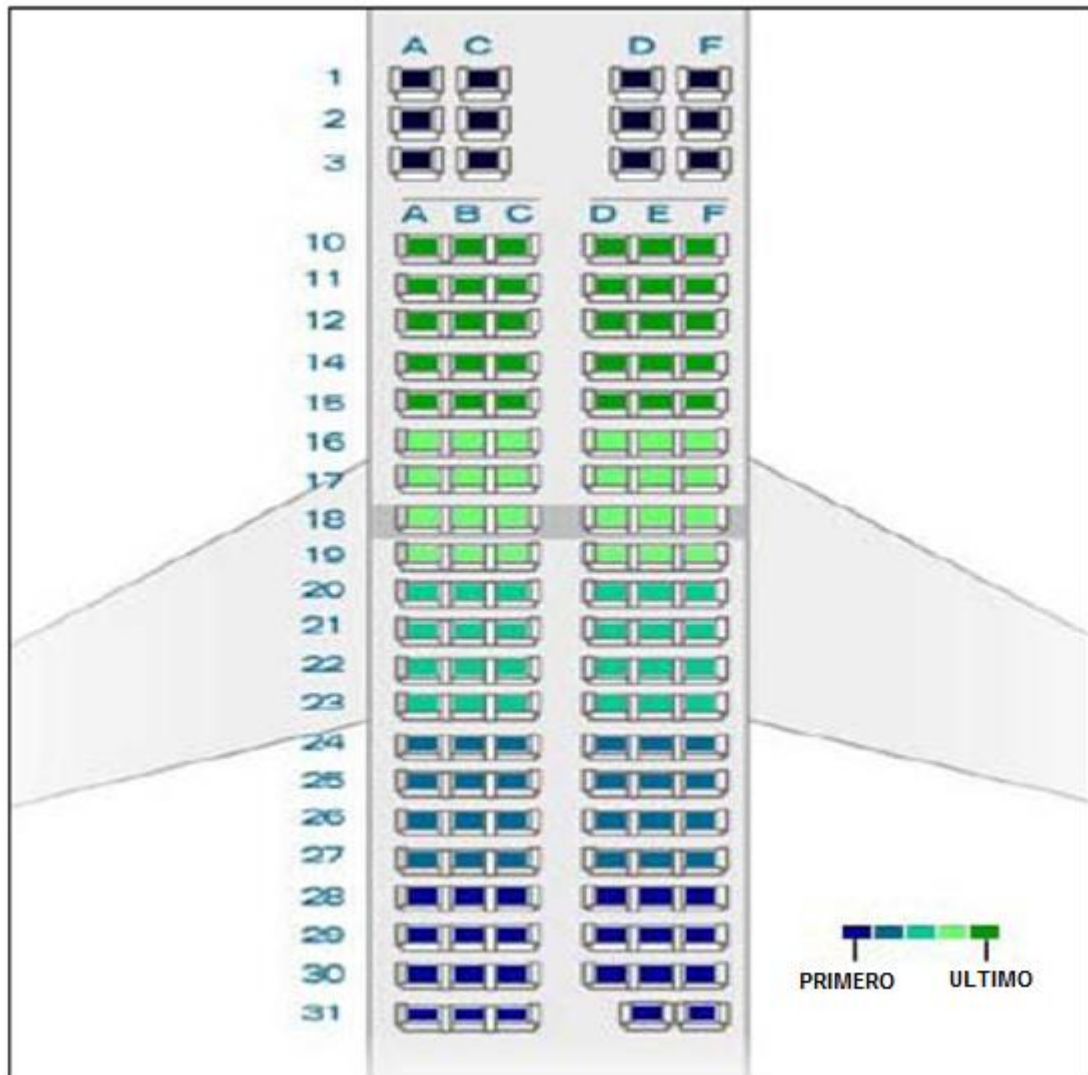


Figura 37. Back-to-front-method (método de atrás hacia adelante) [74].

# ALEATORIO

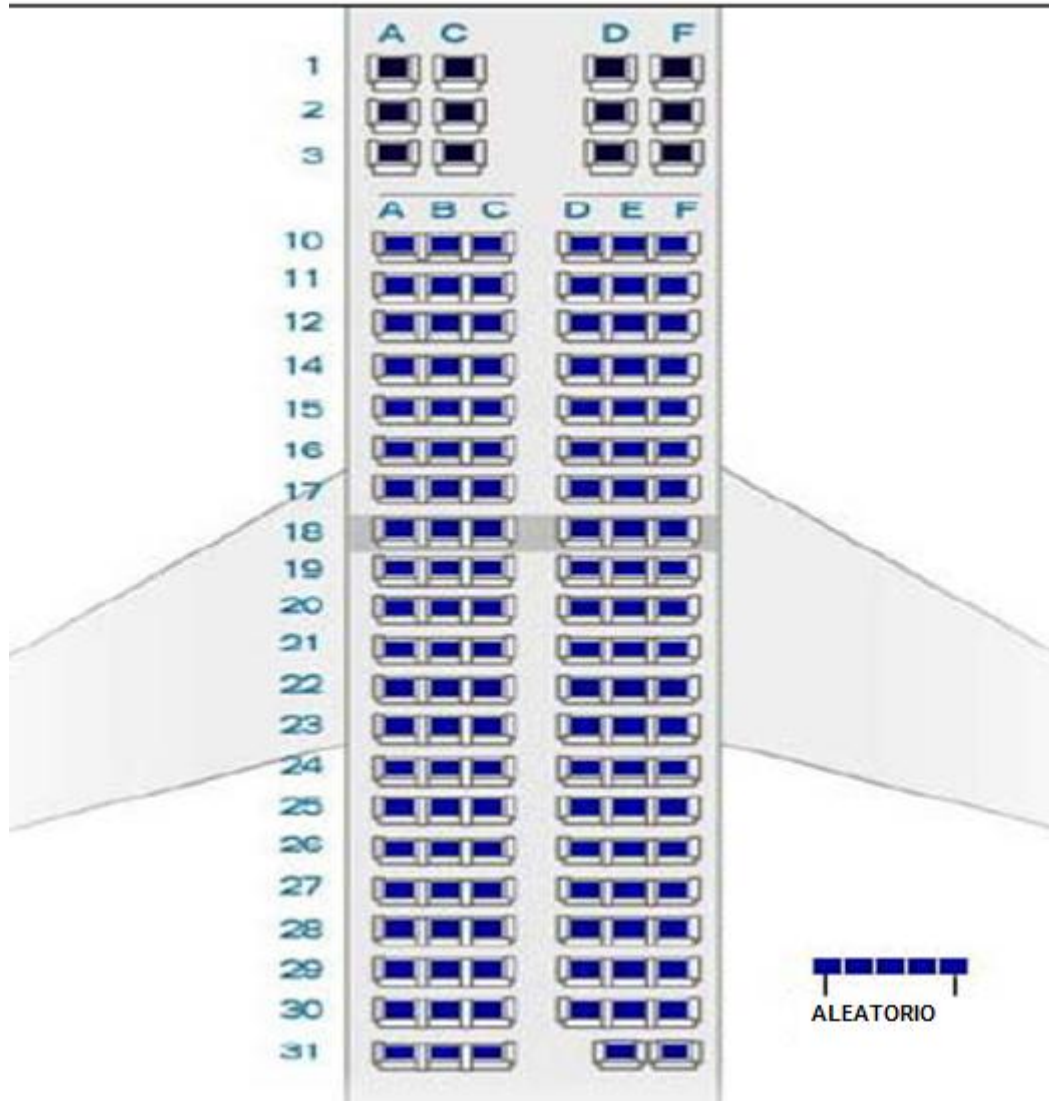


Figura 38. The random-method (método aleatorio de abordaje) [74].

DESDE LA VENTANA SEGUIDA POR LA SILLA  
DEL MEDIO HASTA LA SILLA DEL PASILLO

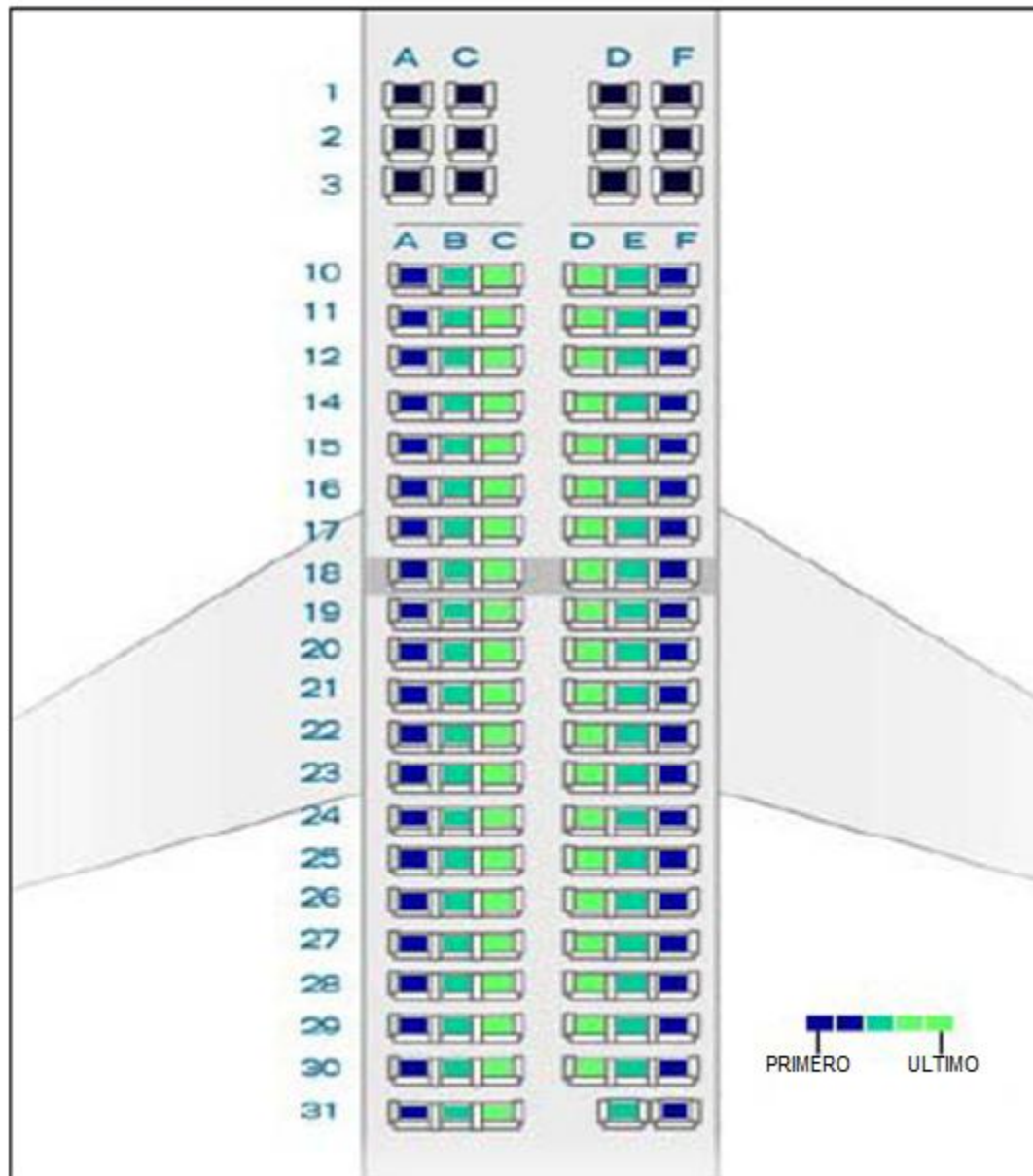


Figura 39. Window-middle-aisle or outside-inside boarding method (método de abordaje desde la ventana seguida por la silla del medio hasta la silla del pasillo) [74].



El aircraft boarding strategy es abordado por STEINER y PHILIPP [8] con modelos de simulación, para la solución del problema se basó en un enfoque de simulación (de eventos discretos) apoyados en un simulador previamente programado en matlab llamado ABS (Airplane Boarding Simulation) en español 'Simulador de Abordaje de una Aeronave' el cual se le proporcionaron datos gracias a cámaras instaladas en las áreas de preabordaje en donde se tuvieron en cuenta 8 vuelos de una de las secciones de la terminal del Aeropuerto de Zurich en Suiza.

De otro modo America West Airlines implemento una mejora en su sistema de abordaje llevando a cabo un estudio con un equipo de la universidad de Arizona [7] en donde crearon una estrategia para disminuir el tiempo de abordaje en 2 minutos la cual consistía en montar un híbrido entre el back-to-front-method y el outside-inside boarding. Observaciones de campo, resultados numéricos de modelos analíticos, y estudios de simulación proporcionaron la información que causó una estrategia mejorada que permite un abordaje del avión llamada la pirámide inversa. Con la nueva estrategia de abordaje, los pasajeros todavía tienen asignaciones de asiento personales, pero en vez de abordar por filas de atrás hacia al frente de la aeronave, abordan en grupos que reducen al mínimo la interferencia esperada de pasajeros en la aeronave.

## **ANÁLISIS**

El objetivo final de estos modelos es minimizar los tiempos de abordaje con el mejor método con que cuente la aerolínea, es de suma importancia notar que no todos los métodos se pueden emplear en todas las terminales aéreas ya que la infraestructura de las mismas cambian considerablemente, en donde algunos aeropuertos no poseen puertas de embarque sino que el pasajero camina desde la sala de espera a través de la plataforma hasta llegar a la aeronave, en aeropuertos de gran capacidad algunas aeronaves son estacionadas en posiciones remotas o posiciones satélites en donde se debe de trasladar a los pasajeros en autobuses especiales para que puedan abordar su vuelo, este tipo de embarques son de mayor complejidad ya que involucran un tiempo mayor ya que el traslado involucra variables adicionales como lo son el tráfico terrestre del aeropuerto y la velocidad con que aborden y desaborden los autobuses de traslado.

Cabe anotar que en los procesos de abordaje que se enunciaron anteriormente los grupos de pasajeros son divididos regularmente en seis grupos los cuales abordan la aeronave según el método que la compañía considere más conveniente para su

operación estos grupos se generan para evitar interrupciones en el flujo dentro de la cabina de la aeronave mientras los pasajeros acomodan sus equipajes de mano en los portamaletas y se ubican en su respectivas sillas.

## **2.5 COMPLEJIDAD COMPUTACIONAL, HEURISTICAS Y SOFTWARE**

Se supone que una vez que se formula el problema, se podría usar un software para obtener la solución óptima del mismo. Desafortunadamente, los problemas que enfrentan muchas compañías aéreas involucrar a millones o incluso miles de millones de variables de decisión. Estos enormes modelos no pueden resolverse utilizando paquetes de software estándar.

A medida que comenzaron a aparecer los problemas del mundo real y las metodologías para resolverlos fueron necesarios recurrir a adoptar una clasificación de constantes y variables, específicamente para conocer los tiempos computacionales en los que se incurren, ya que estos tiempos incrementan a medida que los problemas crecen. Esto se hace por ejemplo para saber la diferencia del tiempo en resolver en un software computacional un problema con 100 variables y 50 restricciones a resolver un problema de 1000 variables y 500 restricciones.

Los investigadores en el pasado se han fijado en un número de pasos. Esto es que para resolver un problema este aumenta a medida que el tamaño de los problemas aumenta. [76]

DASKIN [77] menciona como durante la década de 1970, muchos investigadores en ciencias computacionales e investigación de operaciones estudiaron diferentes algoritmos en términos de su complejidad computacional. Se clasifican los algoritmos basados en su trazabilidad computacional en dos grupos, polinómicas (P) y los polinomios no deterministas (NP) en algoritmos de tiempo. Para algoritmos de tiempo polinomial, los tiempos de solución están acotados por un polinomio de orden. Los algoritmos de tiempo polinómico son típicamente considerados "buenos". Esto es debido a que estos algoritmos pueden resolver grandes casos del problema en pasos y tiempos razonables. Para polinomios no determinista (NP) en algoritmos de tiempo, por otra parte, como su nombre lo indica, el número de pasos para resolver el problema crece exponencialmente con el tamaño del problema. Estos algoritmos son considerados "malos" en el sentido de que, como aumenta el tamaño de los problemas, los tiempos de cálculo crecen y se hacen muy grandes. Muchos algoritmos que son adoptados para resolver los

problemas de tipo combinatorial, tales como el agente viajero tienen un orden de complejidad.

## **ANÁLISIS**

Estos problemas representan los más difíciles en términos de complejidad computacional. Por este motivo, es casi imposible para las compañías aéreas obtener las soluciones óptimas para su programación de la tripulación o del enrutamiento de aeronaves en un tiempo de cálculo razonable.

Los procedimientos que involucran heurísticas emergen ya que al no obtener las soluciones óptimas en el momento oportuno para el algoritmo polinomial no determinista (NP) llevaron a los investigadores a desarrollar otras alternativas, estos métodos son los métodos heurísticos.

Los métodos heurísticos son técnicas que no garantizan o prometen las soluciones óptimas pero intentan proporcionar una buena y a veces "casi óptima" solución en una cantidad mínima de tiempo.

### **2.5.1 Planificación de personal de mantenimiento (manpower maintenance planning)**

Las actividades de mantenimiento son la columna vertebral de una exitosa y rentable compañía aérea. En la industria de las aerolíneas, el papel de mantenimiento es proporcionar seguridad a las aeronaves, aeronavegabilidad, a tiempo todos los días; el mantenimiento adecuado y eficiente de la creciente flota de aviones de las compañías aéreas presenta un desafío único, ya que requiere la capacidad necesaria y la competencia técnica. El mantenimiento de aviones debe ser planeado y realizado de acuerdo a los procedimientos y normas establecidas por las compañías aéreas, por los fabricantes de las aeronaves que operen y por los entes reguladores de aviación civil tanto nacional como a nivel internacional según donde se encuentre matriculada la aeronave.

Una aerolínea generalmente tiene una diversa flota de aviones, cada tipo de flota tiene un programa de mantenimiento predeterminado establecido por el fabricante. Sobre la base de la experiencia de la aerolínea y el modo de funcionamiento, el programa original de mantenimiento se adapta bajo la aprobación de la FAA o la aeronáutica civil de aviación. Las normas de tareas de mantenimiento intentan

especificar en qué intervalo de tiempo debe ser programado cada tarea y cuánto tiempo debe ser dedicado a cada tarea. En el mantenimiento de línea se refiere a una rutina corta el cual se realiza en el turn time de la aeronave, en él se incluyen las inspecciones de corta distancia regulares realizadas a las aeronaves entre su llegada y salida consecutiva del aeropuerto [78]. El mantenimiento de línea tiene el mayor efecto sobre horarios de los vuelos y las tasas de retardo de mantenimiento. Por lo tanto, se requiere planificación y previsión meticulosa. Aunque el mantenimiento de línea no requiere una gran inversión en tiempo o mano de obra, pero debido a que este mantenimiento posee una alta frecuencia de ocurrencia, estas tareas representan una fracción significativa de los costos de mantenimiento de aeronaves. El noventa por ciento del coste de mantenimiento de línea se debe al trabajo de línea. [79]

Los problemas de planificación de personal de mantenimiento están ligados a los problemas de asignación de flotas y la planificación de itinerarios ya que después de elaborados cada uno de estos se pasa a determinar la cantidad efectiva de personas en las ciudades correspondientes en donde vuela la aerolínea o en ciertos casos asignación de personal de mantenimiento a bordo de la aeronave cubriendo cada ruta en donde no se disponga del personal de mantenimiento de la ciudad de destino.

Debido a la naturaleza estocástica de las fallas técnicas que se puedan presentar en las aeronaves y el tiempo en que se toman en reparar dichas fallas, convierten en un reto importante para las estaciones de mantenimiento la disponibilidad mecánica en diferentes momentos del día. [80]

MASON [81] formuló el problema como la entrada a un modelo de programación entera para la búsqueda de una solución óptima del tiempo completo y el tiempo parcial del personal para cada período de la jornada laboral.

SRIRAM y HAGHANI [83] plantean que el objetivo es reducir al mínimo el costo de mantenimiento y los costos incurridos durante la re-asignación de aeronaves a los segmentos de vuelo. Proporcionan una formulación completa para la programación de mantenimiento y un enfoque heurístico para resolver el problema; el procedimiento heurístico ofrece buenas soluciones en tiempo de cálculo razonable. El problema es formulado como un modelo de flujo de red (multi-commodity network flow model) <sup>14</sup>.

De igual manera JOHNSON, NEMHAUSER, ZHU [84] definen cuatro tipos principales de control dispuestos por la FAA a los cuales cada aeronave tiene que someterse. Estos varían en el alcance, duración y la frecuencia, los cuales son:

- Control tipo A  
El primer control principal (indicado como Tipo A) actualmente es un control mandatorio de la FAA se produce en cada 65 horas de vuelo, o una vez a la semana. Este tipo de control implica la inspección de todos los sistemas, como tren de aterrizaje, los motores y las superficies de control.
  
- Control tipo B  
El segundo control (designado como tipo B) se lleva a cabo cada 300-600 horas de vuelo, e implica una inspección visual completa, más lubricación de las partes móviles, tales como estabilizadores horizontales y los alerones.
  
- Control Tipo C y Tipo D  
Los chequeos o trabajos mayores designados como Tipo C y D se realizan aproximadamente una vez cada una a cuatro años, respectivamente, y requieren que el avión este fuera de servicio durante un máximo de un mes. Debido a que los controles de tipo C y D están espaciados a intervalos relativamente grandes y debido a la dinámica naturaleza del mercado, estos dos controles no necesitan ser tomados en cuenta en la programación de la planeación de personal de mantenimiento ya que adicionalmente ya se tiene programado un personal especialmente para estas tareas mayores. La preocupación principal de las líneas aéreas es en el cumplimiento de los requisitos del tipo de los controles A y B a través de su política de inspección y mantenimiento de auto-impuesta de 4 días. A menos que haya circunstancias excepcionales, las inspecciones y las reparaciones se llevan a cabo en las noches también conocidas como pernoctas de la aeronave en una base determinada en la cual se realizan tarjetas específicas asignadas por la dirección central de mantenimiento.

## **ANÁLISIS**

La asignación de personal de mantenimiento como lo mencionan los autores es de naturaleza estocástica se formulan problemas de programación entera ya que los turnos están planeados para que los cubran o no dependiendo de las variables que se presentan, dichas variables pueden ser tipos de licencias que tengan cada uno de los integrantes de mantenimiento en donde el avión realice la pernoctada, si el mantenimiento es de línea o de servicio mayores y el tipo de control al que la aeronave deba ser sometida según la frecuencia que este prevista.

Es estocástica en su mayoría de veces en el mantenimiento de líneas ya que este se efectúa durante la operación de los itinerarios y es allí donde resultan los problemas técnicos no previstos. Se evidencia una naturaleza determinista en el mantenimiento de servicios mayores ya que estos se programan con gran antelación y se asigna un personal determinado para las tareas que se realizan a cada aeronave.

### **2.5.2 Remolcadores de aeronaves (aircraft air tow tugs)**

Como se mencionó en capítulos anteriores los costos por combustible que asumen las aerolíneas son una de las mayores preocupaciones, en efecto estos costos no solo se dan en los trayectos de carreteo por las calles de rodaje que conducen a las pistas de los aeropuertos y el consumo propio de los vuelos determinados sino que también se ve la necesidad de ahorrar combustible con los movimientos que deben hacer en tierra trasladando la aeronave desde una puerta de embarque hacia un hangar de mantenimiento, por lo general estos traslados se dan en aeropuertos de gran tamaño y en donde están los servicios mayores de las compañías aéreas; estos movimientos se realizan con los remolcadores ya que desplazar la aeronave por sus propios medios implica un consumo adicional de combustible el cual se quiere evitar; estos traslados se efectúan entre las 6 P.M. y las 4 A.M. en donde la operación de los aeropuertos es relativamente menor y las calles de rodaje están menos congestionadas.

Los remolcadores también son usados en las operaciones de línea, estos son usados para remolcar la aeronave desde las puertas de embarque hasta las calles de rodaje paralelas para dar inicio al arranque de los motores esto se hace por varias razones tales como motivos de seguridad ya que no se deben de iniciar motores estando la aeronave cerca a la puerta de embarque o a las edificaciones, ahorro de combustible evitando traslados de un lugar a otro usando la potencia propia del avión, reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> y por ultimo reducción en la contaminación auditiva.

Los remolques considerados están diseñados para aeronaves de fuselaje ancho y fuselaje estrecho y es capaz de remolcar ambos tipos de aeronaves. La fijación del remolcador (tow-barless) <sup>15</sup> a la aeronave se realiza a través de dos brazos de bajo nivel, cuando estos están asegurados al tren delantero de la aeronave elevan ligeramente del suelo al mismo y están listos para proceder al retroceso de la aeronave (push back) <sup>16</sup>. La aeronave se mueve a continuación, utilizando la

towtug<sup>17</sup>; o también se puede usar el remolcador (tow-bar) <sup>18</sup> el cual tiene una barra en vez de un sistema de brazos de bajo nivel para remolcar las aeronaves. [85].



Figura 40. Tow-Barless-Tug. [86]



Figura 41. Tow-Bar-Tug [87]

Debido a la naturaleza estocástica de los tiempos de llegada y salida, los tiempos de carreteo, tiempos de servicio de mantenimiento, y los precios del combustible para aviones, un enfoque de modelos de simulación para estudiar el problema parecía ser apropiado [88].

En la siguiente figura se muestra el proceso lógico del uso de los remolcadores:

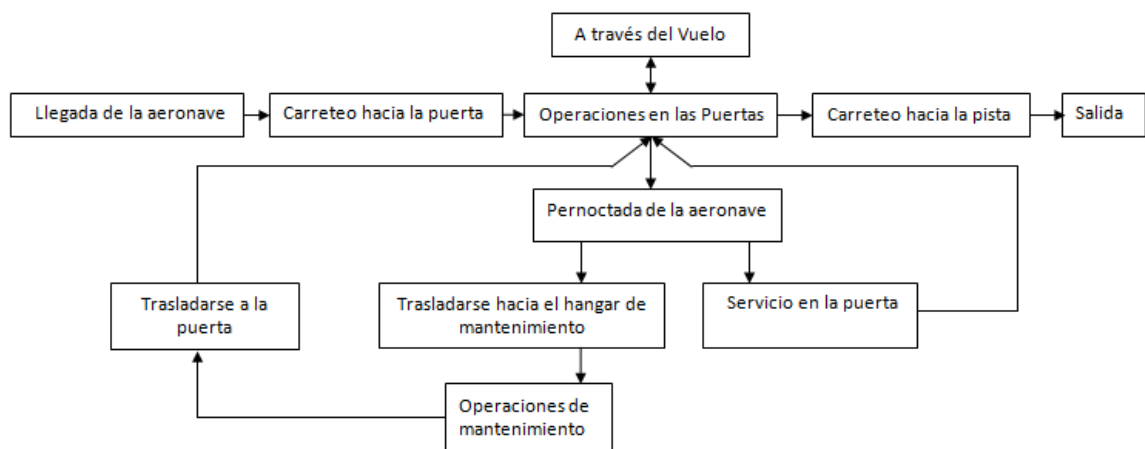


Figura 42. Proceso lógico del uso de remolcadores. [88]

## ANÁLISIS

En este problema se pretende optimizar el consumo de combustible de la aeronave mediante el uso de los remolcadores, los remolcadores son vehículos necesarios para retirar las aeronaves de las posiciones de las puertas de embarque ya que las aeronaves no pueden moverse por sus propios medios debido a que están muy cerca al edificio de la terminal. Estos están relacionados con las operaciones de mantenimiento ya que los remolcadores son usados para llevar las aeronaves a las posiciones de prueba de motores o pruebas de superficies, estos trasladan las aeronaves para que no consuman combustible adicional al programado para las pruebas correspondientes, tratando de optimizar las operaciones de mantenimiento y los costos asociados al consumo de combustible en tierra.



### **2.5.3 Planificación de capacidad de pistas de aterrizaje (runway capacity planning)**

Los aeropuertos juegan un papel muy importante en el desarrollo de las operaciones de las compañías aéreas ya que estos permiten que converjan tanto pasajeros como las mismas líneas aéreas. Después de la ley de desregulación de 1970 el tráfico aéreo comenzó a incrementarse dramáticamente; a pesar de que los aeropuertos comenzaron a modernizarse y a concebirse aún más grandes por el volumen de la demanda estos siguen siendo insuficientes en su espacio para albergar la cantidad de aeronaves que requieren su uso. Las demoras resultantes debido a estos inconvenientes de saturación y poco espacio conducen a la ineficiencia y el aumento de los gastos a las compañías aéreas, la incomodidad y el incremento de los costes para los pasajeros, al igual que el aumento de la carga de trabajo para el sistema de control de tráfico aéreo.

De hecho, la falta de capacidad de los aeropuertos ha sido prevista por la FAA para ser uno de los más graves obstáculos para el crecimiento de la aviación comercial y privada. [89]

Por lo tanto, el análisis de la capacidad de la demanda, es un componente vital proceso de planificación de los aeropuertos, es crucial ya que se debe conocer qué tipo de definición de los requisitos físicos de las instalaciones aeroportuarias se debe poseer para satisfacer la demanda futura.

Las instalaciones del aeropuerto incluyen ampliamente lo concerniente en el campo de aviación a pistas, calles de rodaje, puertas, instalaciones de la terminal, y acceso a los aeropuertos y estacionamientos [135].

Algunos enfoques para la mejora de estas instalaciones, ampliando así la capacidad aeroportuaria, pueden clasificarse como:

Técnicas para aumentar la velocidad de operación de la pista y por lo tanto aumentar la zona de operaciones la capacidad o mitigar retraso aeronave; técnicas para mover la aeronave desde la pista hasta las puertas de embarque y moverlo de nuevo lo antes posible para acortar el traslado inicial y el traslado de salida y sus componentes de la demora; técnicas para ayudar en el transporte de pasajeros a través del edificio de la terminal y el flujo de vehículos en circulación alrededor del aeropuerto y las carreteras de acceso al mismo. Beasley, Sonander y Havelock [90] se centran en el desarrollo de un algoritmo para la mejora de la programación de las aeronaves que esperan aterrizar. Desarrollaron un algoritmo heurístico basado en la heurística de población (population heuristic) reduciendo

el intervalo de tiempo necesario para aterrizar de las aeronaves. KIM y HANSEN [91] proponen dos metodologías de validación que se pueden utilizar para probar predicciones de los modelos con la realidad

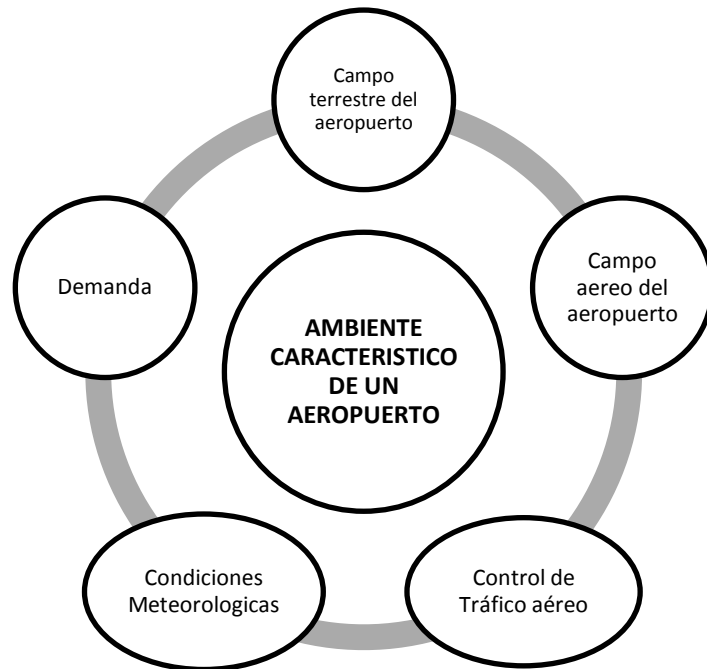


Figura 43. Ambiente característico de un aeropuerto. [Fuente: Autoría Propia]

## ANÁLISIS

Para la planeación de la capacidad de pistas de aterrizaje se debe contemplar la demanda atribuida a cada aeropuerto, esta es de carácter determinista en tiempos cortos, estos tiempos se deben a que los planes de vuelos que solicitan las aerolíneas o los aviones particulares son enviados a los aeropuertos destino de esta forma pueden planificar la forma en cómo deben de asignar las pistas de aterrizaje para las llegadas y las salidas de las aeronaves. También se considera estocástica en tiempos más prolongados ya que se cuentan con proyecciones de aumento en los volúmenes de tráfico aéreo pero estos tienden a ser inciertos a la hora de utilizar las pistas de aterrizajes, una variable asociada es el

comportamiento de las condiciones meteorológicas que dificulta la llegada y salida de aeronaves y el uso adecuado de las pistas de aterrizaje.

Los métodos basados en población se caracterizan por trabajar con un conjunto de soluciones las cuales serían los aviones que usarían las pistas de aterrizaje en un momento determinado en cada iteración. El resultado final proporcionado por este tipo de algoritmos depende fuertemente de la forma en que manipula la población. Bien sea que las aeronaves sean asignadas a una pista en uso para agilizar su tiempo de aterrizaje.

#### **2.5.4 Sistemas de transporte de pequeñas aeronaves**

Es un sistema de transporte eficiente y confiable, es la columna vertebral de cada economía exitosa [136]. La demanda para el transporte aéreo sigue creciendo, mientras que las carreteras y los actuales sistemas de hub-and-spoke se vuelven cada vez más congestionadas. El aumento de la congestión y las demoras continúan hoy en día en la infraestructura actual, mientras que las inversiones nacionales para reducir estos problemas son llegar a un punto de disminución de la eficacia. Si no se abordan estas preocupaciones, los retrasos en el sistema hub-and-spoke limitarán la actividad económica de las regiones y comunidades. Con el 98% de la población de los EE.UU.[136] que viven a 30 minutos en automóvil de más de 5.000 instalaciones de desembarque de uso público que existen, esta situación se considera infraestructura que es un recurso nacional sin explotar de la movilidad.

La introducción y el compromiso con el sistema hub-and-spoke de enrutamiento se han concentrado en el desarrollo de los aeropuertos de las principales ciudades, el aumento del tráfico aéreo y la congestión de estas regiones específicas [137]. Por el contrario, muchos aeropuertos rurales y sus comunidades han sufrido una falta de servicio aéreo esencial, debido al hecho de que no ha sido económicamente viable para las compañías aéreas para servir estos aeropuertos. Como resultado, muchos de los principales aeropuertos de las ciudades están muy congestionados, operando en o por encima de la capacidad y muchos aeropuertos de las zonas rurales son cada vez más infrautilizados. Esta tendencia ha sido evidente durante algún tiempo y esta es cada vez más significativa.

El Sistema de Transporte de Pequeñas aeronaves (SATS) fue presentado como una solución para mejorar este desequilibrio al disminuir la congestión en los aeropuertos de la ciudad, y mejorar la utilización de aeropuertos rurales. Con esta visión, la NASA<sup>19</sup>, el Departamento de EE.UU. de Transporte (DOT), la

Administración Federal de Aviación (FAA), la industria, las partes interesadas, y la academia se unieron para perseguir la viabilidad del SATS. Su objetivo era utilizar la tecnología de última generación, para mejorar los viajes entre el mando comunidades y centros de transporte urbano, y mediante el uso de la aviación general de aeropuertos. Principio sobre una nueva generación de pequeños y asequibles aviones, SATS operarían en un sistema totalmente distribuido de pequeños aeropuertos que sirven miles de comunidades suburbanas, rurales y remotas. La pequeña visión de transporte en avión fue concebido como una alternativa de viaje seguro, liberar a las personas y los productos de los retrasos con el transporte del sistema mediante la creación de acceso a más comunidades

A continuación se indican algunos de los beneficios esperados de SATS:

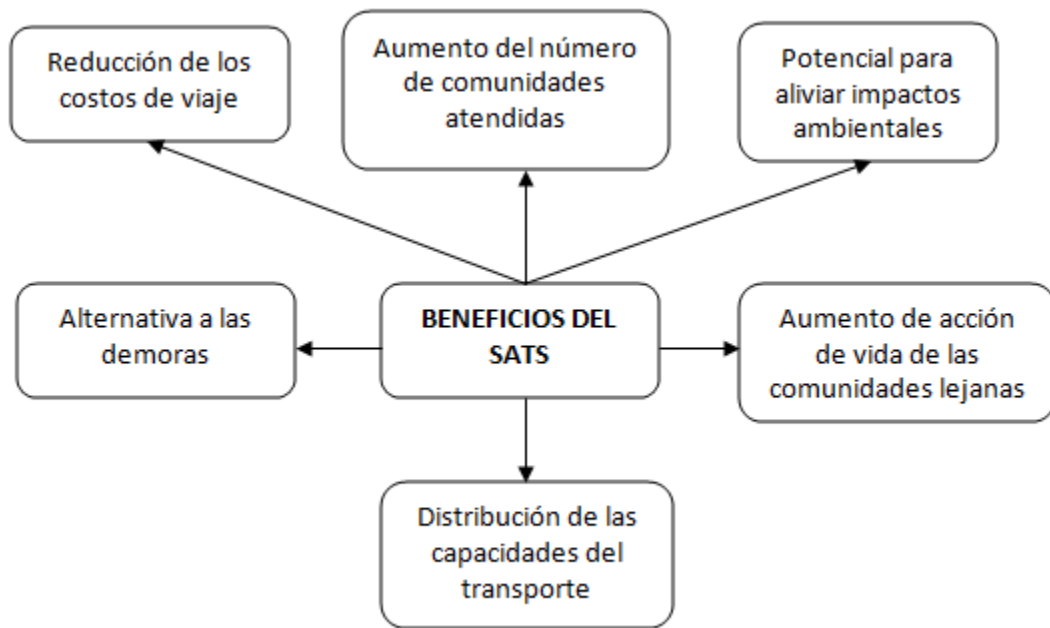


Figura 44. Beneficios del SATS. [Fuente: Autoría Propia]

Los taxis aéreos son una buena alternativa debido al crecimiento de la demanda de aviones pequeños, que han sido testigos de un aumento en el número de sus fabricantes. Las compañías que utilizan los avances en la fabricación de

aeronaves, aviónica, y la caída de precios de los componentes han sido capaces de ofrecer a los pequeños jets de 4-8 plazas a precios muy razonables. Un gran número de empresarios han puesto pedidos de estos aviones para iniciar compañías de taxis aéreos en varias partes de los Estados Unidos. Estas empresas de nueva creación utilizan aeropuertos regionales y ofrecen un servicio completo a los sus pasajeros. Algunas de ellas con ofrecen una llamada antes de una hora para el servicio. Una vez que se contacten los pasajeros, la compañía envía un automóvil para recoger el cliente en su hogar o lugar de trabajo. El vehículo conduce entonces el pasajero o a los pasajeros hacia el aeropuerto regional más cercano sin necesidad de hacer filas ni, esperar en salas por tiempos prolongados.

## **ANÁLISIS**

En Colombia este fenómeno es evidenciado en la zona oriental del país, especialmente en la zona de frontera con Venezuela, ya que en esta zona geográfica del país se encuentran comunidades totalmente aisladas por carretera, y el acceso a estas es por medio de la combinación de medios de transporte y una sucesión de transbordos y desplazamientos a pie. Estas comunidades no tienen el contacto debido con las grandes capitales, sus tecnologías son poco avanzadas, a pesar de que cultivan sus propios alimentos, algunos insumos necesarios solo pueden llegar a ellos vía aérea, y lo hacen por medio de aeronaves que tiene hasta medio siglo de vida totalmente antiguos y sin mucha tecnología las cuales utilizan como pistas de aterrizajes potreros y zonas llanas para poder servir a las comunidades apartadas. Las ciudades capitales del oriente del país cuentan con los aeropuertos y las estructuras necesarias pero estos se consideran como aeropuertos rurales los cuales son servidos por pocas aerolíneas, en su mayoría regionales o por la aerolínea del gobierno nacional Satena, la falta de frecuencias se da específicamente porque las distancias son considerablemente mayores a las que las aerolíneas cubren en el centro-centro occidente-suroccidente y el norte del país, además las sillas ocupadas por milla recorrida son poco rentables y no cubren en su totalidad los costos operacionales en que incurrirían al realizar dichos viajes.

### **2.5.5 Re-enrutamientos de tráfico**

La primera y más simple versión considera un solo aeropuerto y toma las decisiones sobre las operaciones en tierra que se tiene para este problema de un solo aeropuerto. En la segunda instancia el problema toma decisiones por toda una red de aeropuertos. Por lo tanto se distinguen por si los retrasos en donde se supone que se propagan en la red de los aeropuertos, como los aviones realizan vuelos consecutivos además de determinar los tiempos de liberación de los aviones en tierra, en el aire también se determina el ajuste de la velocidad óptima del avión mientras se encuentra volando a través de una red de aeropuertos teniendo en cuenta la capacidad del espacio aéreo. Por lo tanto, en el problema se determina cómo controlar un vuelo a lo largo de su duración, no simplemente antes su partida. Si se le suma la complicación final, el desvío de vuelos debido a las fluctuaciones drásticas de la capacidad disponible de las regiones del espacio aéreo, se obtiene una gestión de re direccionamiento. En este problema, un vuelo puede ser desviado a través de una trayectoria de vuelo diferente con el fin de llegar a su destino, si la ruta actual pasa por una región que es inutilizable por razones generalmente relacionadas con la mala las condiciones meteorológicas [138]. Con el fin de describir el trabajo de estos problemas se tiene en cuenta las siguientes variaciones de modelado:

- Modelos deterministas vs estocástico, que se distinguen por si las capacidades del sistema (aeropuertos y sectores del espacio aéreo) se supone determinista o probabilístico.
- Los modelos estáticos vs dinámicos, que se distinguen por sí o no las soluciones se actualizan dinámicamente durante el día.

### **ANÁLISIS**

Los re enrutamientos de aeronaves son muy frecuentes cuando se tienen condiciones meteorológicas adversas estas están previamente consideradas por las tripulaciones en caso de que el aeropuerto de destino presenta dichas condiciones o la capacidad del aeropuerto en cuanto a tráfico se vea restringida, estas previsiones de carácter determinista se consideran como aeropuertos alternos los cuales están incluidos cálculos en el consumo de combustible en caso de usar el re enrutamiento. El control de tráfico aéreo tiene la autoridad para realizar re enrutamientos si así lo considera necesario o si debe de darle prioridad a una aeronave por circunstancias especiales que ameriten un tratamiento

especial hasta su aterrizaje, estas situaciones por lo general son eventos médicos que ocurren dentro de las aeronaves o fallas técnicas en las aeronaves, en donde estas situaciones generan re enrutamientos a las aeronaves que utilizan el espacio aéreo en ese momento. Los eventos naturales como emanación de columnas de cenizas por eventos de volcanes son considerados como críticos en el re enrutamiento ya que este tipo de condiciones afectan drásticamente el desempeño de las aeronaves y no se debe volar bajo estas circunstancias, últimamente se evidenciaron tales circunstancias en el ámbito nacional ya que debido a las columnas de humo y cenizas emanadas por el volcán Nevado del Ruiz las operaciones aéreas alrededor de estas zona se vieron comprometidas y las rutas que cruzaban por allí mismo debieron de ser desviadas para no encontrarse con este fenómeno.

## **2.6. MEDIO AMBIENTE Y CONTAMINACIÓN**

### **2.6.1 Emisiones de gases de aeronaves**

El transporte aéreo es una fuente importante de la contaminación que afecta tanto a la calidad del aire local y el clima global. Las emisiones que generan los aviones son el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), vapor de agua (H<sub>2</sub>O), óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno (NOx), hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO), (SOx) y partículas. La calidad del aire local se ve afectada, por ejemplo, por el CO y NOx que son precursores del ozono troposférico, un compuesto tóxico. Además, NOx son es uno de los ingredientes del smog y la lluvia ácida, lo que agrava el asma y afecta a los bosques y fauna, respectivamente. Por otro lado, el ozono troposférico, así como CO<sub>2</sub> son gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático global. Según un informe de 1999 por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), el transporte aéreo representaron el 3,5% del total radiativo antropogénico (se refiere a los gases de efecto invernadero) [93] acumulado en la atmósfera. Esto se estima que aumentará hasta un 12,2%, en 2050.

El transporte aéreo ha experimentado un importante crecimiento en las últimas dos décadas, y se espera que esta tendencia continúe en los próximos años. El tráfico de pasajeros de líneas aéreas regulares tiene aumentaron un 60% en los últimos 10 años y las previsiones indican un 5% la tasa de crecimiento interanual para los próximos 10 a 15 años (IPCC). El sector de la aviación consume aproximadamente el 13% de del total de combustible fósil utilizado en el

transporte, lo que corresponde a aproximadamente el 2-3% del total combustibles fósiles utilizados en todo el mundo (IPCC). Dadas las fuertes tendencias de crecimiento en el transporte aéreo, el sector de la aviación será cada vez más una fuente importante de gases de efecto invernadero y su impacto se espera que afecte la calidad del aire local y el cambio climático global se aumente en el futuro [92].

Las grandes compañías aéreas están actualmente comprometidas con el medio ambiente y la mejora continua de las tecnologías de sus aeronaves logrando que sean más eficientes y amigables con el medio ambiente es así como la fabricante de aeronaves The Boeing Company [96] mencionan que durante los últimos 40 años han reducido la intensidad de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) por 70%; para seguir contribuyendo con al cambio le apuestan a materiales alternativos desarrollados y procesos más eficientes para la fabricación y el mantenimiento de las aeronaves, la incorporación de cuatro innovadora nuevas tecnologías de motores, un mayor uso de materiales compuestos ligeros, alta eficiencia en aplicaciones de sistemas y modernos conceptos de aerodinámica que hacen mejoras hasta del 20 % en el consumo de combustible[94]. En 2006, Boeing se dio cuenta de investigaciones que sugieren que un combustible podría ser producido a partir de una fuente de biomasa, material que lleva a cabo así ser mejor que el combustible jet producido por tradicional fósiles tradicionales a base de aceite, las fuentes potenciales de aceite bioderivados incluyen la Salicornia <sup>20</sup>, la Jatrofa <sup>21</sup>, la Camelina <sup>22</sup> y algas [97].



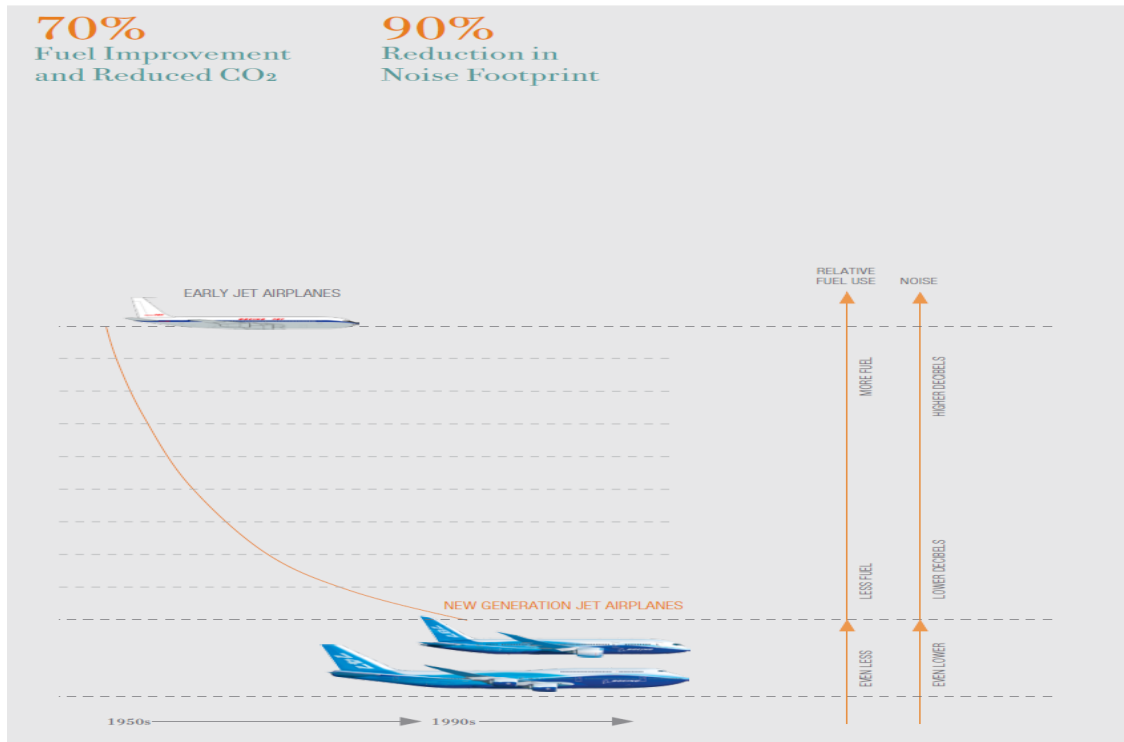


Figura 45. Progreso de la Aviación en generación de emisiones de gas [97].

### **2.6.2 Ruido generado por las aeronaves**

La llegada de la era del jet exacerbó el problema del ruido generado por los aviones, los parisinos y londinenses fueron los primeros en vivir bajo las rutas de vuelo y en quejarse por tan incómodo suceso, sus casos fueron considerados por los organismos gubernamentales superiores. El resultado fue la introducción de restricciones operativas y de los plazos en que los aviones no podrían aterrizar o despegar, BURTON [98] propone estudiar los métodos más usados para contrarrestar los efectos del ruido, su medición e indicar los decibeles que se producen.

Estos tipos de restricciones se encuentran todavía en vigencia hoy en día, tanto en Londres y París, así como la mayoría de los aeropuertos de todo el mundo. Los nuevos tipos de restricciones se han vuelto más complejas, con diferentes restricciones y tasas de aterrizaje aplicado en función de la certificación de ruido de las aeronaves [95].

Para contrarrestar estas dificultades los fabricantes se están enfocando en mejorar el diseño de los motores jet para que su funcionamiento sea más eficiente y genere el menor impacto ambiental tanto en emisiones de gases como en el ruido que generan, adicionalmente las aerolíneas recurren a la tecnología que les brinda los fabricantes de sus aeronaves ya que deben de emplear los sistemas de disminución de potencia en las situaciones en donde normalmente los motores empleaban mucha energía y posteriormente generaban ruido excesivo, de esta manera emplean también ángulos de ascenso más pronunciados y reducción de potencia y velocidades para evitar el ruido cuando salen de las zonas pobladas que están alrededor de los aeropuertos, estos procedimientos están certificados por la ICAO (organización internacional de aviación civil) , la siguiente figura describe este procedimiento:

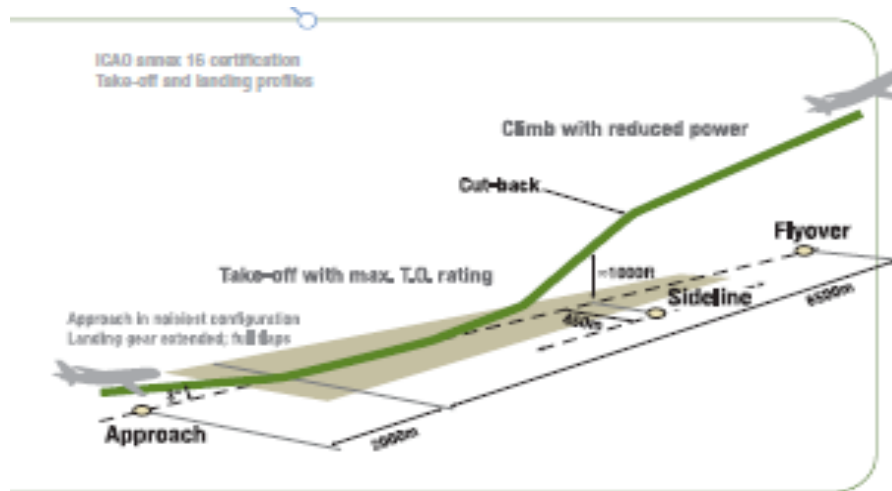


Figura 46. Procedimientos para evitar el ruido. [95]

## 2.7 AFLUENCIA DEL TRÁFICO AÉREO

### 2.7.1 Afluencia y teoría de colas

Las aeronaves entrantes en un aeropuerto requieren servicios en un sistema que consiste en una serie de tres "estaciones": una pista de aterrizaje, una puerta y una pista de despegue. "Estado estacionario" tradicional de análisis de secuencias de colas no son apropiadas para este sistema debido a las siguientes características:

La variación temporal en la tasa de llegada: Prácticamente todos los aeropuertos y sobre todo aeropuertos principales son objeto de grandes variables en el tiempo, dinámica de la tasa de demanda. Investigaciones comparando los resultados transitorios y de estado estable para SINGLESERVER colas [138] sugiere que, en tales casos, el tiempo necesario para alcanzar "estado estacionario" excede sustancialmente el tiempo durante el cual la demanda puede razonablemente considerarse como constante. Esto implica que los modelos que describen sólo estados estables de comportamiento tienen un valor muy limitado.

La dependencia de tiempo de tasa de servicio: Tanto para el aterrizaje y procesos de salida en un aeropuerto, el servicio de tasa o capacidad de los aeropuertos depende del número y la disposición geométrica de las pistas de aterrizaje que puede ser utilizado o configuración de la pista y de la distancia de separación que

se requiere entre aterrizajes sucesivos y / o despegues. Estos factores a su vez se determinan principalmente por causas meteorológicas: techo de visibilidad, la dirección del viento y velocidad del viento. Por lo tanto, las tarifas del servicio varían en tiempo como una función de las condiciones climáticas y formación de modelos de colas que suponen que las tarifas de servicios constantes son inapropiadas.

La interdependencia de los tiempos de servicio: En el aterrizaje y despegue las separaciones requeridas entre cada avión también dependen del tipo de aeronave por ejemplo, se requieren seis millas náuticas de separación cuando un aeronaves de carácter pesado es seguida por una más pequeña en el último enfoque en reglas de vuelo por instrumentos, mientras que sólo dos millas y medio o tres millas náuticas son necesarios cuando una avión pequeño es seguido por uno pesado. Por otra parte, debido a muchas de las transferencias de pasajeros entre vuelos, un avión se toma más tiempo en la puerta de la terminal a menudo dependiendo de la hora de llegada de los otros vuelos, especialmente en los aeropuertos hub. Tales complicaciones hacen la suposición usual de independiente, e idénticamente distribuidos los tiempos de servicio en el típico análisis de cola apropiado.

## **2.8 EL TRANSPORTE AÉREO EN COLOMBIA**

La historia del transporte aéreo en Colombia se remonta al 5 de diciembre de 1919 en la ciudad Barranquilla y con un capital de 100.000 pesos, se constituyó la Sociedad Colombo-Alemana de Transportes Aéreos (Scadta), que empezó a operar efectivamente en 1920 siendo pionera en América en establecer una aerolínea de correo, carga y pasajeros, (Scadta) hoy Avianca y la segunda del mundo, meses después de establecerse la aerolínea holandesa KLM [129].

El primer vuelo al interior de Colombia tardó ocho horas. El éxito sería inmediato porque el transporte terrestre en el país era muy deficiente y la mayoría de gente se movilizaba en barcos a vapor por el río Magdalena para llegar a la costa Caribe desde el interior del país.

El país poco a poco empezó a tener infraestructura aeroportuaria, que recibió un importante impulso durante el régimen del general Gustavo Rojas Pinilla, dejando los potreros y los ríos como únicas pistas. En 1954, Rojas creó la Empresa

Colombiana de Aeródromos (ECA), entidad encargada de dotar a las regiones más apartadas del país de aeropuertos y así conectarlas por aire [128].

El transporte aéreo es uno de los servicios más importantes de la economía colombiana. En primer lugar, debido a la topografía del país que dificulta la operación de otro tipo de transporte, facilita la integración y la conectividad. Es esencial para conectar y llegar a algunas de las regiones más apartadas. En segundo lugar, permite la conexión con la economía mundial, hecho que resulta imperativo dada la dinámica de la globalización en el mundo. En este sentido, el Estado considera el transporte aéreo un servicio público esencial, lo cual pone de manifiesto su papel como un factor vital para el desarrollo económico nacional.

Por su parte, la evolución del tráfico de pasajeros en transporte aéreo muestra un crecimiento alto, con un 8% anual promedio entre 2002 y 2010, y con un 10,1% si se mide la evolución de pasajeros internacionales. El tráfico de pasajeros, comparado con el de carga, representa el 82% de la actividad del sector. Esta evolución ha situado al transporte aéreo colombiano en un puesto importante en el mundo. Entre 101 países, el transporte aéreo colombiano ocupó en el 2009 el puesto 38 en pasajeros-kilómetro transportados, y el puesto 22 en toneladas-kilómetro, mientras que en comparación con países de la región Colombia ocupó el cuarto y tercer lugar respectivamente [132].

El crecimiento del tráfico aéreo ha sido acompañado desde la década de los 90 por una política pública de liberalización del espacio aéreo en los mercados interno y externo, y por el re-direccionamiento de la inversión pública hacia la modernización y actualización del espacio aéreo, concesionando los aeropuertos de mayor tráfico en el país. En efecto, desde la apertura económica de 1991 Colombia pasó de una regulación que hacía restrictivo el acceso al mercado a un esquema de libertad vigilada. Fue así como en lo local en los últimos veinte años, después de tener una aerolínea nacional como Avianca, se permitió la entrada al mercado de nuevos participantes con capital nacional-Aces y Aerorepública (hoy Copa Airlines Colombia)-, hasta llegar al modelo en el que vía distintas formas de reorganización empresarial se cuenta en el mercado con importante participación de capital extranjero [133].

Varios estudios destacan la importancia de una infraestructura de transporte aéreo eficiente, especialmente para los países en desarrollo, enfocándola además desde la perspectiva de los beneficios que se derivan para el comercio (OMC, 2004). La OMC<sup>23</sup> señala que al igual que los demás servicios de transporte, el aéreo está relacionado con el comercio internacional de dos maneras claras. En primer lugar,

como objeto de comercio, es decir como servicio por derecho propio; y en segundo lugar, como un servicio intermediario fundamental para muchos otros tipos de comercio, tanto en la esfera de los bienes como en la de los servicios (por ejemplo, en el turismo), La infraestructura del sector está compuesta por tres elementos: el espacio aéreo, las aerolíneas, y los aeropuertos [134].

En cuanto el espacio aéreo se sabe que los volúmenes de vuelos a nivel nacional se están incrementando significativamente especialmente en las ciudades destino consideradas como hubs o centro de conexiones por las aerolíneas del país, estas zonas de espacio aéreo se ven altamente congestionadas en horas pico como los son los intervalos de tiempo entre las 6 a 10 am, y de 4 a 10 pm; a pesar de ello el tráfico aéreo se ha elevado aún más y dichas horas ahora son más difíciles de predecir por los procesos estocásticos que involucran la llegada de los aviones a estas áreas congestionadas, por esto el proceso se está volviendo determinista y manejándose en tiempos reales ya que los aeropuertos están previendo tiempos estimados de llegada de las aeronaves provenientes de las ciudades y rutas tipo spoke que vuelan las aerolíneas, el control de tráfico aéreo da un flujo estimado el cual es informado a las torres de control secundarias al igual que a las oficinas de operaciones de las compañías todo esto se hace previamente con los itinerarios programados de cada compañía aérea que opera en el país.

Las aerolíneas juegan un papel fundamental en el servicio de conectividad, como se mencionaba anteriormente el sector privado e internacional se le permitió invertir capital en el transporte aéreo nacional lo cual dinamizó el mercado aeronáutico cambiándolo de un monopolio como el que manejaba Avianca y volviéndolo más versátil y atractivo para los usuarios ya que los precios se redujeron considerablemente y fueron más asequibles. Como se sabe el negocio de la aviación es un negocio costoso y las aerolíneas nacionales que operaban como Aires y Aerorepública acudieron al apalancamiento extranjero para competir en el mercado, al igual que Avianca que a pesar de ser la aerolínea emblema de Colombia fue adquirida por empresarios extranjeros y ahora es una holding de un grupo financiero el cual tiene un gran conglomerado de negocios que van desde la exploración y explotación de petróleo, el sector de transporte terrestre y aeronáutico, hasta hoteles y la agricultura. Las tres principales aerolíneas que se disputan el mercado nacional e internacional ahora son LANCO (LAN Colombia) una filial de la aerolínea chilena LAN ahora conocida como LATAM por la integración de la aerolínea TAM de Brasil a su plan de negocios, Copa Airlines la cual absorbió a Aerorepública y finalmente Avianca hoy conocida como AviancaTaca por su fusión con la aerolínea centroamericana Taca, pero para comienzos de Junio de 2013 recibirá el nombre de Avianca por ser la marca más

reconocida de ambas en América. Las tres aerolíneas se caracterizan por manejar el plan de negocios con hubs los cuales son Bogotá, Lima y Santiago de Chile para LANCO, Copa maneja el hub de Panamá, y Avianca con la fusión que realizó paso a tener 4 hubs en el mismo número de países como los son Bogotá (Colombia), Lima (Perú), San Salvador (Salvador) y San José (Costa Rica).

De esta forma el mercado regional se ve cubierto por las aerolíneas llamadas de bajos costos. Para algunos, en principio, el modelo abrió la competencia y obligó a las otras empresas a repensar sus esquemas de tarifas, para otros se trata de un concepto mal aplicado y sugieren que no permanecerá por mucho tiempo.

Alberto Maya Restrepo, experto en temas aeronáuticos, recuerda que "Aerolíneas como VivaColombia se presentaron como una aerolínea que intentaba competir con el transporte terrestre y creó una expectativa que, considero, no ha cumplido, pero sí favoreció la rebaja de tarifas y ofreció precios competitivos frente a lo que tenían las otras empresas, lo cual generó una competencia" [130].

Este tipo de aerolíneas manejan los vuelos tipo spoke sin centralizar sus vuelos en un lugar específico sino que cubren rutas directas desde ciudades intermedias hacia otras.

Germán Efromovich, presidente de Synergy Group, principal accionista de Avianca, plantea dudas frente al esquema de las aerolíneas de bajo costo. "Las llaman de bajo costo, porque dejan de ofrecer servicios para cobrar menos, pero el combustible del piloto, el avión o el motor, valen igual" [130]

Como se sabe en el problema del transporte aéreo todas estas variables se toman a consideración y las empresas llamadas de bajo costo retrasan su operación significativamente al no poder controlar los eventos estocásticos de la aviación los cuales generan malestar en los pasajeros que son los directamente afectados ya que este modelo de aviación aún es muy novedoso en Colombia y los usuarios no están acostumbrados a este ni que se les cobre por cualquier servicio adicional.

En cuanto la infraestructura, se pide que los aeropuertos estén a la altura del servicio que prestan pero estos se están quedando rezagados bien sea por la falta de inversión o por la falta de planeación de los mismo ya que a pesar de que el principal aeródromo del país El Dorado fue remodelado ya se hacen cuentas de que se está quedando pequeño para la operación, en la siguiente figura se muestra la opción final contemplada para la remodelación total.

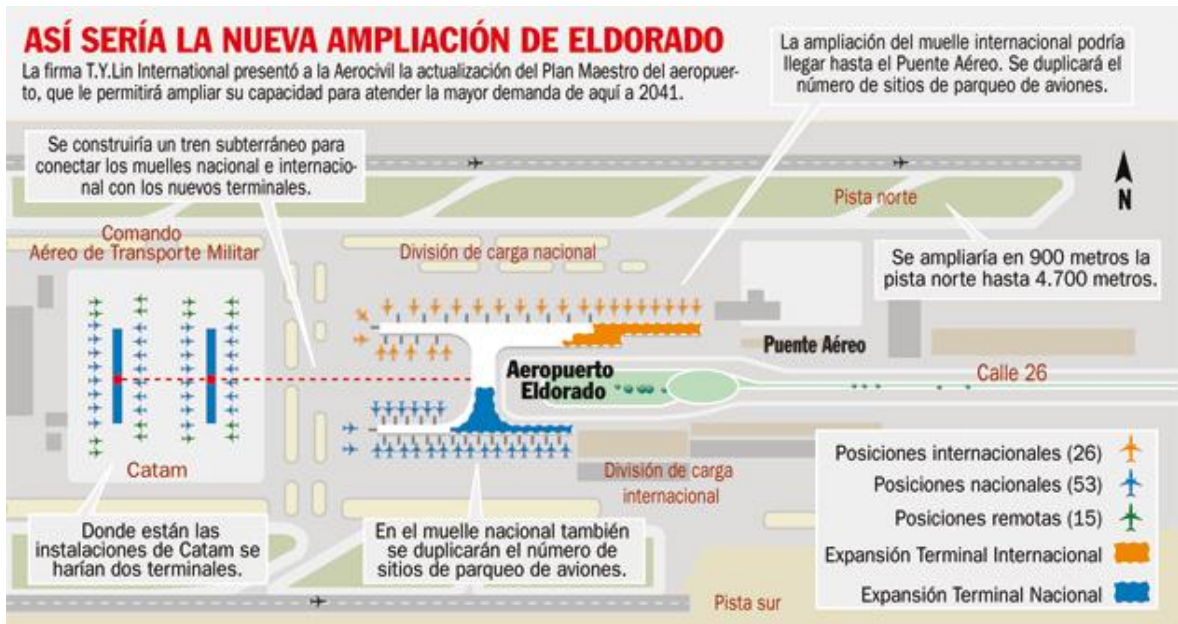


Figura 47. Nueva ampliación del Aeropuerto Internacional El Dorado [131]

Lo que se planea es tener una terminal satélite o una terminal total en donde actualmente se encuentra la base militar CATAM (comando aéreo de transporte) para complementar la terminal nacional que se encuentra actualmente en desarrollo, de esta forma se complementarían con la ya culminada terminal internacional y la terminal de carga, además se prevé que el terminal puente aéreo usado actualmente por Avianca sea empleado de igual manera para ampliar la zona internacional y tener más posiciones de parqueo dispuestas para la alta demanda que se tiene actualmente.



## 2.9 TABLA DE TAXONOMÍA Y CLASIFICACIÓN DE LOS AUTORES ESTUDIADOS

AUTOR	AÑO	ABREVIACION	NÚMERO DE ETAPAS		NATURALEZA DE LA DEMANDA/SUMINISTRO		TAMAÑO DE LA FLOTA		CLASE DE ASIGNACION		HORIZONTE DE PLANEACION		OBJETIVOS		TIPO DE MODELO	DESCRIPCION
			Una Etapa	Múltiples etapas	Estocástica	Determinista	Un Equipo	Múltiples Equipos	Minimización	Maximización	Un Período (Estático)	Múltiples Periodos (Dinámico)	Un Objetivo	Múltiples Objetivos		
Tingley, G.	1979	CS		x	x	x		x	X	x		x		x	Set-Partitioning	Crew Scheduling
Giafferri, C., Hamon, J., and Engline, J.	1982	CS		x	x	x		x	X	x		x		x	Set-Partitioning	Crew Scheduling
BABIC, O., TEODOROVIC, D., AND TOSIC, V	1984	GAP		x	x	x		x	X			x	x		Linear binary programming	Gate Assignment Problem
ETSCHAMAIER, MAXIMILIAN, MATHASEL	1985	FSP		x	x			x		x		x		x	Time space net work	Flight Scheduling Problem
Sarra, D.	1988	CS		x	x	x		x	X	x		x		x	Set-Partitioning	Crew Scheduling
Abara, J.	1989	FAP		x	x			x	X			x		x	mixed-integer program / branching	Fleet Assignment Problem
BIHR, R.	1990	GAP		x											Linear programming	Gate Assignment Problem
Bihir, R.A.	1990	GAP		x	x			x	X			x		x	Linear integer programming model	Gate Assignment Problem
Verbeek, P.J.	1991	MP		x	x			x	X			x		x	Linear integer programming model	Manpowering Planning
Kabbani, N.	1992	ARP		x	x			x	X			x		x	Set-Partitioning	Aircraft Routing Problem
Ryan, D.M.	1992	CS		x	x	x		x	X	x		x		x	Set-Partitioning	Crew Scheduling
DOBSON, LEDERER	1993	FSP		x	x			x		x		x		x	Hub-and-Spoke	Flight Scheduling Problem
SURAMANIAN , SCHEFF, QUILLINAN, WIPER, MARSTEN	1994	FAP		x	x			x	X			x		x	large scale mixed- integer linear programming / time space network	Fleet Assignment Problem
Subramanian, R, Schrr, R.P. Jr., Quillinan, J.D., Wiper, D.S., and Marsten, R.E.	1994	FAP		x		x		x	X			x		x	Time space net work/ multi-commodity network	Fleet Assignment Problem
BRUSCO	1995	MP		x	x			x	X			x		x	Linear integer programming model	Manpowering Planning
Hane, C.A., Barnhart, C., Johnson, E.L., Marsten, R.E., Nemhauser, G.L.	1995	FAP		x		x		x	X			x		x	Time space net work/ multi-commodity network	Fleet Assignment Problem
Brusco, M.J., Jacobs, L.W., Bongiorno, R.J., Lyons, D.V., and Tang, B.	1995	MP		x	x			x	x			x		x	Linear integer programming model	Manpowering Planning
Talluri, K.T.	1996	FAP		x		x		x	x			x		x	Time space net work/ multi-commodity network	Fleet Assignment Problem
Barnhart, C., Boland, N.L., Clarke, L.W., Johnson, E.L., Nemhauser, G.L., and	1996	ARP		x	x			x	x			x		x	Set-Partitioning	Aircraft Routing Problem
Gelman, E., Krishna, A., and Ramaswamy, S.	1996	CS		x	x	x		x	x	x		x		x	Set-Partitioning	Crew Scheduling
DESAULNIERS, G	1997	MMP		x	x			x	x			x		x	Set-Partitioning / A column generation technique	Maintenance Manpowering Planning
VANCE, P.H., BARNHART, C., JOHNSON, E.L., NEMHAUSER, G.L.,	1997	CS		x		x		x	x	x		x		x	Set-Partitioning	Crew Scheduling
Arguelo, M.F., Bard, J.F., and Yu, G.	1997	ARP		x	x			x	x			x		x	Set-Partitioning	Aircraft Routing Problem

AUTOR	AÑO	ABREVIACION	NÚMERO DE ETAPAS		NATURALEZA DE LA DEMANDA/SUMINISTRO		TAMAÑO DE LA FLOTA		CLASE DE ASIGNACION		HORIZONTE DE PLANEACION		OBJETIVOS		TIPO DE MODELO	DESCRIPCION
			Una Etapa	Múltiples etapas	Estocástica	Determinista	Un Equipo	Múltiples Equipos	Minimización	Maximización	Un Período (Estático)	Múltiples Periodos (Dinámico)	Un Objetivo	Múltiples Objetivos		
Clarke, L., Hane, C., Johnson, E., and Nemhauser, G.	1997	ARP		X	x			x	x			x		x	Set-Partitioning	Aircraft Routing Problem
Clarke, L., Johnson, E., Nemhauser, G., and Zhu, Z.	1997	ARP		X	x			x	x			x		x	Set-Partitioning	Aircraft Routing Problem
Desaulniers, G., Desrosiers, J., Dumas, Y., Solomon, M.M., and Soumis, F.	1997	ARP		X	x			x	x			x		x	Set-Partitioning	Aircraft Routing Problem
Jo, G.S., Jung, J.J., and Yang, C.Y.	1997	GAP		X	x			x	x			x		x	Linear integer programming model	Gate Assignment Problem
MASON	1998	MMP		X	x			x	x			x		x	Integer programming	Maintenance Manpowering Planning
GRANDEAUS, S., CLARKE, MATHAISE	1998	FSP		X	x			x		x		x		x	Time space net work	Flight Scheduling Problem
Barnhart, C., Boland, N., Clarke, L.W., Johnson, E.L., Nemhauser, G.L.	1998	FAP		X	x			x	x			x		x	mixed-integer program / branching	Fleet Assignment Problem
Gopalan, R. and Talluri, K.	1998	ARP		X	x			x	x			x		x	Set-Partitioning	Aircraft Routing Problem
Paoletti, B., Cappelletti, S., Cinfrignini, L., and Lenner, C.	1998	ARP		X	x			x	x			x		x	Set-Partitioning	Aircraft Routing Problem
Talluri, K.	1998	ARP		X	x			x	x			x		x	Set-Partitioning	Aircraft Routing Problem
Brusco, M.J. and Jacobs, L.W.	1998	MP		X	x			x	x			x		x	Linear integer programming model	Manpowering Planning
Yu, G.	1998	MP		X	x			x	x			x		x	Linear integer programming model	Manpowering Planning
Haghani, A. and Chen, M.C. (	1998	GAP		X	x			x	x			x		x	Linear integer programming model	Gate Assignment Problem
GU, Y. AND CHUNG, C	1999	GAP		X	x	x		x	x			x		x	Genetic Algorithm	Gate Assignment Problem
Kuzminski, P.	1999	FSP		X	x			x		x		x		x	Time space net work	Flight Scheduling Problem
Ioachim, I., Desrosiers, J., Soumis, F., and Belanger, N.	1999	FAP		X		x		x	x			x		x	Time space net work/ multi-commodity network	Fleet Assignment Problem
Yu, G. and Thengvall, B.	1999	FAP		X		x		x	x			x		x	Time space net work/ multi-commodity network	Fleet Assignment Problem
Ioachim, I., Desrosiers, J., Soumis, F., and Belanger, N.	1999	ARP		X	x			x	x			x		x	Set-Partitioning	Aircraft Routing Problem

AUTOR	AÑO	ABREVIACION	NÚMERO DE ETAPAS		NATURALEZA DE LA DEMANDA/SUMINISTRO		TAMAÑO DE LA FLOTA		CLASE DE ASIGNACION		HORIZONTE DE PLANEACION		OBJETIVOS		TIPO DE MODELO	DESCRIPCION
			Una Etapa	Múltiples etapas	Estocástica	Determinista	Un Equipo	Múltiples Equipos	Minimización	Maximización	Un Período (Estático)	Múltiples Periodos (Dinámico)	Un Objetivo	Múltiples Objetivos		
Gamache, M., Soumis, F., Marquis, G., and Desrosiers, J.	1999	CS		x		x		x	x			x		x	Set-Partitioning	Crew Scheduling
Yu, G. and Thengvall, B.	1999	CS		x	x	x		x	x			x		x	Set-Partitioning	Crew Scheduling
Yu, G. and Thengvall, B.	1999	MP		x	x			x	x			x		x	Linear integer programming model	Manpowering Planning
Gu, Y. and Chung, C.A.	1999	GAP		x	x			x	x			x		x	Linear integer programming model	Gate Assignment Problem
Yu, G. and Thengvall, B.	1999	GAP		x	x			x	x			x		x	Linear integer programming model	Gate Assignment Problem
Janic, M.	2000	FSP		x	x			x		x		x		x	Time space net work	Flight Scheduling Problem
Jarrah, A., Goodstein, J., and Narasimhan, R.	2000	FAP		x		x		x	x			x		x	Time space net work/ multi-commodity network	Fleet Assignment Problem
Jarrah, A.I. and Strehler, J.C.	2000	ARP		x	x			x	x			x		x	Set-Partitioning	Aircraft Routing Problem
Gelman, E., Gulsen, M., Narayanan, A., and Nguyen, T.	2000	CS		x	x	x		x	x			x		x	Set-Partitioning	Crew Scheduling
Hjorring, C.A, Karisch, S.E., and Kohl, N.	2000	CS		x	x	x		x	x			x		x	Set-Partitioning	Crew Scheduling
Bolat, A.	2000	GAP		x	x			x	x			x		x	Linear integer programming model	Gate Assignment Problem
AHUJA, GOODSTEIN JO, MUKHERJEE, ORLIN, SHARMA	2001	FAP		x	x			x	x			x		x	Neighborhood Search /Tabu Search	Fleet Assignment Problem
BUTCHERS, DAY, GOLDIE, MILLER, MEYER, RYAN, SCOTT	2001	CS		x		x		x	x			x		x	Set-Partitioning	Crew Scheduling
XU, J. AND BAILEY, G	2001	GAP		x	x	x		x	x			x		x	Integer programming/Tabu search	Gate Assignment Problem
Grosche, T., Heinzl, A., and Rothlauf, F.	2001	FSP		x	x			x		x		x		x	Time space net work	Flight Scheduling Problem
Clarke, P.,	2001	FAP		x	x			x	x			x		x	mixed-integer program / branching	Fleet Assignment Problem
Bard, J., Yu, G., and Arguelo, M.F.	2001	ARP		x	x			x	x			x		x	Set-Partitioning	Aircraft Routing Problem
Cordeau, J.F., Stojkovic, G., Soumis, F., and Desrosiers, J.	2001	ARP		x	x			x	x			x		x	Set-Partitioning	Aircraft Routing Problem
Klabjan, D., Johnson, E.L., Nemhauser, G.L., Gelman, E., and Ramaswamy,	2001	CS		x		x		x	x			x		x	Set-Partitioning	Crew Scheduling
STOJKOVI, SOUMIS, DESROSISERS, SOLOMON	2002	FSP		x		x		x		x		x		x	Time - based model	Flight Scheduling Problem

AUTOR	AÑO	ABREVIACION	NÚMERO DE ETAPAS		NATURALEZA DE LA DEMANDA/SUMINISTRO		TAMAÑO DE LA FLOTA		CLASE DE ASIGNACION		HORIZONTE DE PLANEACION		OBJETIVOS		TIPO DE MODELO	DESCRIPCION
			Una Etapa	Múltiples etapas	Estocástica	Determinista	Un Equipo	Múltiples Equipos	Minimización	Maximización	Un Período (Estático)	Múltiples Periodos (Dinámico)	Un Objetivo	Múltiples Objetivos		
PAK y PIER SMA	2002	RM		x	x	x		x		x	x	x		x	deterministic linear programming model	Revenue Management
ZOUJIN, ABILLAMA y TOHME E	2002	FMS		x	x	x			x				x		Linear integer programming model	Fuel Management System
HAGHANI & SHAFahi	2002	MMP		x	x				x					x	Integer programming / branch and bound	Maintenance Manpowering Planning
Radnoti, G. (	2002	FSP		x	x					x				x	Time space net work	Flight Scheduling Problem
Yu, G. and Thengvall, B.	2002	FSP		x	x					x				x	Time space net work	Flight Scheduling Problem
Armacost, A., Barnhart, C., and Ware, K.	2002	ARP		x	x					x				x	Set-Partitioning	Aircraft Routing Problem
Klabjan, D., Johnson, E.L., Nemhauser, G.L., Gelman, E., and Ramaswamy, S.	2002	CS		x	x	x			x	x				x	Set-Partitioning	Crew Scheduling
Dubofsky, D.A.	2002	FMS		x	x	x								x	Linear integer programming model	Fuel Management System
Lam, S.H., Cao, J.M., and Fan, F.	2002	GAP		x	x					x				x	Linear integer programming model	Gate Assignment Problem
LUNG WU, CAVES	2003	FSP			x					x				x	Turn Time Model	Flight Scheduling Problem
CHELLAPPAN SRIRAM, ALI HAGHANI	2003	MMP		x	x									x	Multi-commodity network flow model	Maintenance Manpowering Planning
Bartholomew-Biggs, M., Parkhurst, S., and Wilson, S.	2003	ARP		x	x					x				x	Set-Partitioning	Aircraft Routing Problem
Klabjan, D.	2003	CS		x	x	x				x				x	Set-Partitioning	Crew Scheduling
ANTOINE, BIENIASWSKI, KROO, WOLPERT	2004	FAP		x	x									x	Time space net work/ multi-commodity network	Fleet Assignment Problem
Özdemir	2004	CS		x		x				x				x	Method Sprint/ branch and bound /branch and follow method	Crew Scheduling
DING, LIM, RODRIGUES y ZHU	2004	GAP		x		x								x	Tabú Search / Meta-heuristic	Gate Assignment Problem
YAN, S. & YANG, T.H. & CHEN,	2004	MMP		x	x					x				x	Mixed linear integer programming model	Maintenance Manpowering Planning
Carter, D. A., Rogers, D. A., and Simkins, B. J.	2004	FMS		x	x	x				x				x	Linear integer programming model	Fuel Management System
HIGLE, JOHNSON	2005	FSP		x		x								x	Dynamic Network	Flight Scheduling Problem
THIEL	2005	CS		x		x				x				x	Set-Partitioning	Crew Scheduling
VONECHE	2005	RM		x	x	x								x	Mixed-stochastic-no-linear integer programming model	Revenue Management
CHENDONG LI	2005	GAP		x	x	x								x	Mixed linear integer programming model	Gate Assignment Problem
Jacobson, S.H., McLay, L.A., Kobza, J.E., and Bowman	2005	GAP		x	x									x	Linear integer programming model	Gate Assignment Problem
SHERALI, BISH, ZHU	2006	FAP		x	x									x	mixed-integer program / branching	Fleet Assignment Problem
SHERALI, BISH, ZHU	2006	FAP		x		x								x	mixed-integer program / branching	Fleet Assignment Problem

AUTOR	AÑO	ABREVIACION	NUMERO DE ETAPAS		NATURALEZA DE LA DEMANDA/SUMINISTRO		TAMANO DE LA FLOTA		CLASE DE ASIGNACION		HORIZONTE DE PLANEACION		OBJETIVOS		TIPO DE MODELO	DESCRIPCION
			Una Etapa	Múltiples etapas	Estocástica	Determinista	Un Equipo	Múltiples Equipos	Minimización	Maximización	Un Período (Estático)	Múltiples Periodos (Dinámico)	Un Objetivo	Múltiples Objetivos		
Sherali, H. D., Bish, E. K., and Zhu, X.	2006	FAP		X		x		x	x			x		x	Time space net work/ multi-commodity network	Fleet Assignment Problem
Sherali, H. D., Bish, E. K., and Zhu, X.	2006	ARP		X	x			x	x			x		x	Set-Partitioning	Aircraft Routing Problem
McLay, L.A., Jacobson, S.H., and Kobza, J. E. (	2006	GAP		X	x			x	x			x		x	Linear integer programming model	Gate Asigment Problem
MINHO, MING y YONG	2007	RM		X	x	x		x	x	x	x	x		x	Linear integer programming model	Revenu Management
Green, T. and Scalise, A.	2007	GAP		X	x			x	x			x		x	Linear integer programming model	Gate Asigment Problem
BARNHART C.	2008	FSP		X	x			x	x			x		x	Time space net work	Flight Scheduling Problem
Maike, C.	2008	GAP		X	x			x	x			x		x	Linear integer programming model	Gate Asigment Problem
Papadakos, N.	2009	FSP		X	x			x	x	x		x		x	Time space net work	Flight Scheduling Problem
Papadakos, N.	2009	ARP		X	x			x	x			x		x	Set-Partitioning	Aircraft Routing Problem
Chance, D. M.	2009	FMS		X	x	x		x	x			x		x	Linear integer programming model	Fuel Management System
BAZARGAN MASSOUD	2010	FSP		X	x			x	x			x		x	Time space net work	Flight Scheduling Problem
BAZARGAN MASSOUD	2010	FAP		X		x		x	x			x		x	Time space net work/ multi-commodity network	Fleet Assignment Problem
NILIM, EL GHAOU, DUONG	2010	ARP		X	x			x	x			x		x	Set-Partitioning	Aircraft Routing Problem
MARLA, BARNHART	2010	ARP		X		x		x	x			x		x	Set-Partitioning	Aircraft Routing Problem
SUAIBATUL, SITI, TAN KIM ,NOVIN, EDI L.HARAHAP,MALEM	2010	ARP		X	x			x	x			x		x	Set-Partitioning	Aircraft Routing Problem
BAZARGAN MASSOUD	2010	CS		X		x		x	x	x		x		x	Set-Partitioning	Crew Scheduling
BAZARGAN MASSOUD	2010	MP		X		x		x	x			x		x	Linear integer programming model	Manpowering Planning
RASMUSSEN MATIAS, LUSBY RICHARD, RYANZ DAVID, LARSEN JESPER,	2011	CS		X		x		x	x	x		x		x	Set-Partitioning	Crew Scheduling
BARTHOLOMEW, PARKHURST , WILSON	2011	ARP			x			x	x			x		x	Tabu Search / Algoritmo Genético	Aircraft Routing Problem
RONG y GRUNOW	2011	MP		X	x			x	x			x		x	Mixed linear integer programming model	Manpowering Planning
C'OT' JEAN-PHILIPPE, MARCOTTE PATRICE, SAVARD GILLES	2011	RM		X	x	x		x		x		x		x	mixed linear integer program	Revenu Management
JE Beasley, J Sonander , P Havelock	2011	RCP		X	x	x		x		x		x		x	Population Heuristic	Runway Capacity Planning

En este capítulo se encuentra la descripción general del problema del transporte aéreo.

### **3 MÉTODOS DE SOLUCIÓN EN LA CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA DEL TRANSPORTE AÉREO**

#### **3.1 MÉTODOS EXACTOS**

Como se ha mencionado anteriormente el problema del transporte aéreo es bastante amplio y complejo; estos están clasificados como problemas de optimización combinatorial, que ha sido considerados en su gran mayoría como NP-duro, polinomios no deterministas (NP) en algoritmos de tiempo. Para algoritmos de tiempo polinomial, lo que indica que las técnicas de solución exactas no son la mejor alternativa para la mayoría de instancias de los problemas, sin embargo pueden resolverse usando dichas técnicas debido a que es formulado como un problema de programación lineal o como un problema de programación entera, los métodos exactos que pueden aplicarse para solucionar el problema son:

- El método simplex
- El método de ramificación y acotamiento (Branch and bound)
- El método de generación de columna
- Programación dinámica

MÉTODO	DESCRIPCIÓN
Simplex	<p>Es un método analítico de solución de problemas de programación lineal capaz de resolver modelos más complejos que los resueltos mediante el método gráfico sin restricción en el número de variables.</p> <p>Es un método iterativo que permite ir mejorando la solución en cada paso. La razón matemática de esta mejora radica en que el método consiste en caminar del vértice de un poliedro a un vértice vecino de manera que aumente o disminuya (según el contexto de la función objetivo, sea maximizar o minimizar), dado que el número de vértices que presenta un poliedro solución es finito siempre se hallará solución.</p> <p>El método del simplex se basa en la siguiente propiedad: si la función objetivo, <math>f</math>, no toma su valor máximo en el vértice <math>A</math>, entonces hay una arista que parte de <math>A</math>, a lo largo de la cual <math>f</math> aumenta.</p>
Generación de columnas	<p>La técnica del método de generación de columnas consiste en resolver problemas de programación lineal donde las columnas (variables del problema) no son conocidas o es impráctico generarlas explícitamente, generalmente en problemas que tiene un número exponencial de variables. Para resolver estos problemas se empieza con un problema maestro, el cual es una relajación lineal del problema original y debe de tener una estructura relativamente simple (se genera solo un número pequeño de columnas, necesario para obtener una solución factible para el problema relajado).</p> <p>Después hay un sub-problema que permite identificar columnas (variables) adicionales que no han sido incluidas en el problema maestro y que mejoren el valor de la función objetivo.</p>
Programación Dinámica	<p>En el diseño de métodos "Divide y Vencerás" para resolver un problema se divide en subproblemas independientes, los cuales se resuelven de manera recursiva para combinar finalmente las soluciones y así resolver el problema original.</p> <p>El inconveniente se presenta cuando los subproblemas obtenidos no son independientes sino que existe solapamiento entre ellos; entonces es cuando una solución recursiva no resulta eficiente por la repetición de cálculos que conlleva. En estos casos es cuando la Programación Dinámica puede ofrecer una solución aceptable. La eficiencia de esta técnica consiste en resolver los subproblemas una sola vez, guardando sus soluciones en una tabla para su futura utilización.</p> <p>La solución de problemas mediante esta técnica se basa en el llamado principio de óptimo enunciado por Bellman en 1957 y que dice:</p> <p>"En una secuencia de decisiones óptima toda subsecuencia ha de ser también óptima".</p>
Ramificación y acotamiento	<p>La técnica de Ramificación y acotamiento se suele interpretar como un árbol de soluciones, donde cada rama nos lleva a una posible solución posterior a la actual. La característica de esta técnica es que el algoritmo se encarga de detectar en qué ramificación las soluciones dadas ya no están siendo óptimas, para "podar" esa rama del árbol y no continuar malgastando recursos y procesos en casos que se alejan de la solución óptima.</p>

Tabla 3. Métodos exactos para la solución del Problema del Transporte Aéreo.

## 3.2 MÉTODOS HEURÍSTICOS

Como se ha descrito la complejidad natural del problema del transporte aéreo y sus subproblemas asociados estimuló el uso de métodos no exactos que encontraran soluciones de calidad en instancias de tamaño considerable del problema por el considerable número de variables que manejan.

A pesar de que los métodos heurísticos no encuentran la solución óptima del problema, poseen otras ventajas las cuales son: la flexibilidad al abordar temas de complicada modelización, el bajo costo computacional, la capacidad de brindar soluciones factibles en problemas donde no se puedan usar los métodos exactos y al mismo tiempo las soluciones factibles pueden ser usadas como soluciones iniciales para aplicar otro tipo de procedimientos.

Los procedimientos heurísticos tienden a desarrollarse para un tipo particular de problema, por lo que es difícil establecer una clasificación completa de estos métodos, sin embargo estas técnicas tienden a ser clasificadas en las siguientes categorías:

Métodos de búsqueda local: Es un método para resolver problemas de optimización computacionalmente difíciles. La búsqueda local se puede utilizar en los problemas que se pueden formular como la búsqueda de una solución de la maximización de un criterio de entre una serie de soluciones de candidatas. El método explora mientras se mueve de solución a solución en el espacio de soluciones candidatas (considerado como el espacio de búsqueda) mediante la aplicación de los cambios locales, el procedimiento se repite hasta que la solución pueda mejorarse.

Métodos de reducción: la forma de operar de estos métodos consiste en ir adicionando restricciones al problema que generen una reducción del espacio factible de solución. Estas restricciones son formuladas con base a las propiedades comunes identificadas sobre las soluciones de calidad encontradas al problema.

Métodos inductivos: este método consiste en la generalización de las soluciones encontradas en instancias simples del problema.

Métodos constructivos: parten de una solución inicial vacía y van añadiendo componentes hasta construir una solución.



### 3.3 METAHEURÍSTICAS

Los algoritmos metaheurísticos son algoritmos aproximados de optimización y búsqueda de propósito general. Son procedimientos iterativos que guían una heurística subordinada combinando de forma inteligente distintos conceptos para explorar y explotar adecuadamente el espacio de búsqueda.

Estos ofrecen ciertas ventajas ya que se tienen algoritmos de propósito general, tienen gran éxito en la práctica, son fácilmente implementables y paralelizables; los inconvenientes que presentan son algoritmos aproximados no exactos, son altamente no determinísticos y presentan poca base teórica.

Los factores que pueden hacer interesante su uso son cuando no hay un método exacto de resolución, o éste requiere mucho tiempo de cálculo y se tiene memoria ineficiente, cuando no se necesita la solución óptima, basta con una de buena calidad.

Para obtener buenas soluciones, cualquier algoritmo de búsqueda debe establecer un balance adecuado entre dos características contradictorias del proceso:

- Intensificación: cantidad de esfuerzo empleado en la búsqueda en la región actual (explotación del espacio).
- Diversificación: cantidad de esfuerzo empleado en la búsqueda en regiones distantes del espacio (exploración).

Las técnicas metaheurísticas proponen la combinación de diferentes técnicas heurísticas en un nivel mucho más elevado; a esto se debe la palabra meta, que significa “más allá” o “a un nivel superior”. Este término fue utilizado por primera vez en artículo seminal sobre búsqueda tabú por GLOVER [99] y antes de ser validado y aceptado por la comunidad investigativa les correspondía el nombre de heurísticas modernas, REEVES [101]. OSMAN y KELLY [100] definen las metaheurísticas como métodos aproximados para la solución de problemas NP-duros de optimización combinatorial, los cuales no pueden ser resueltos mediante heurísticas ya que no arrojan resultados eficientes.

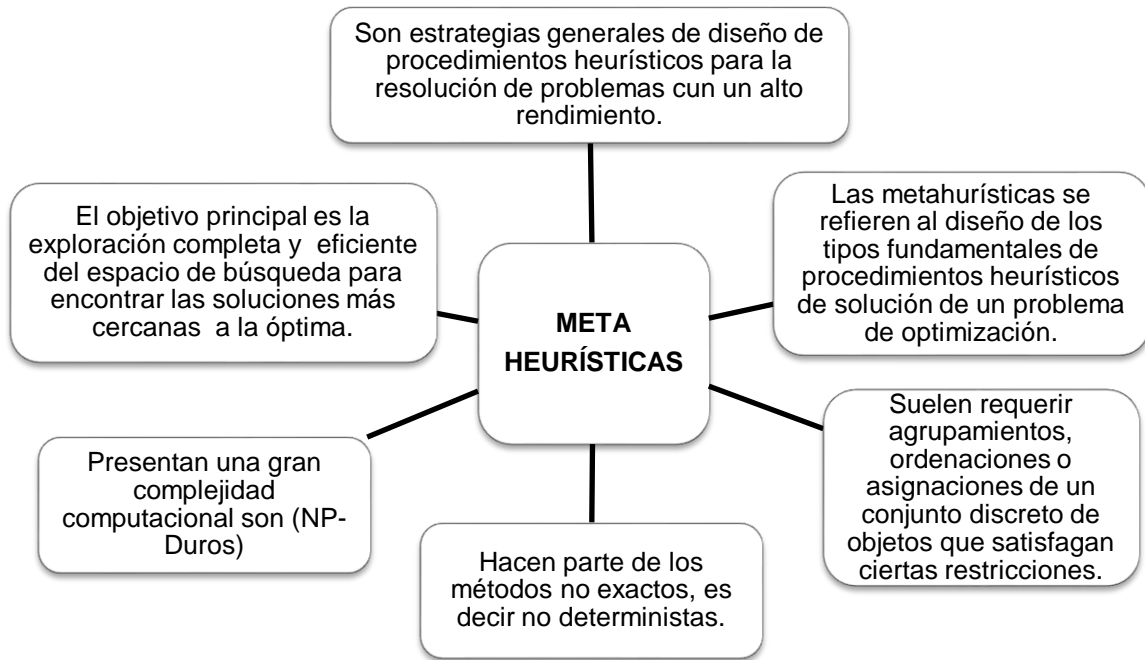


Figura 48. Características fundamentales de las metaheurísticas. [Fuente Autoría Propia]

Las metaheurísticas presentan diversos tipos de búsqueda que se pueden clasificar por la naturaleza de las mismas. Los tipos fundamentales se describen a continuación:

<b>TIPOS DE BUSQUEDA</b>	<b>MÉTODOS DE RELAJACIÓN</b>	Se refieren a procedimientos de resolución de problemas que utilizan relajaciones del modelo original (modificaciones del modelo que hacen al problema más fácil de resolver, cuya solución facilita la solución del problema original.
	<b>PROCESOS CONSTRUCTIVOS</b>	Se orientan a los procedimientos que tratan de la obtención de una solución a partir del análisis y selección paulatina de las componentes que la forman.
	<b>BUSQUEDA POR ENTORNO</b>	Guían los procedimientos que usan transformaciones o movimientos para recorrer el espacio de soluciones alternativas y explotar las estructuras de entornos asociados: la búsqueda tabú, la búsqueda con vecindario variable y el recocido simulado.
	<b>MÉTODOS EVOLUTIVOS</b>	Están enfocados a los procedimientos basados en conjuntos de soluciones que evolucionan sobre el espacio de soluciones

Tabla 4. Tipos de búsqueda de las metaheurísticas.

### 3.3.1 Clasificación de las metaheurísticas

Para la clasificación de las metaheurísticas BLUM y ROLI [102] clasifican las metaheurísticas en las que se inspiran en la naturaleza y las no inspiradas; las basadas en memoria o sin memoria, en métodos con funciones objetivo estáticas o dinámicas, entre otras variables. En la actualidad es utilizada una clasificación mucho más general que se fija en la utilización paso a paso de un único elemento del espacio de búsqueda; estas son conocidas como metaheurísticas basadas en trayectorias.

Adicionalmente son consideradas las metaheurísticas basadas en población, las cuales hacen referencia al trabajo con un conjunto de puntos o poblaciones.

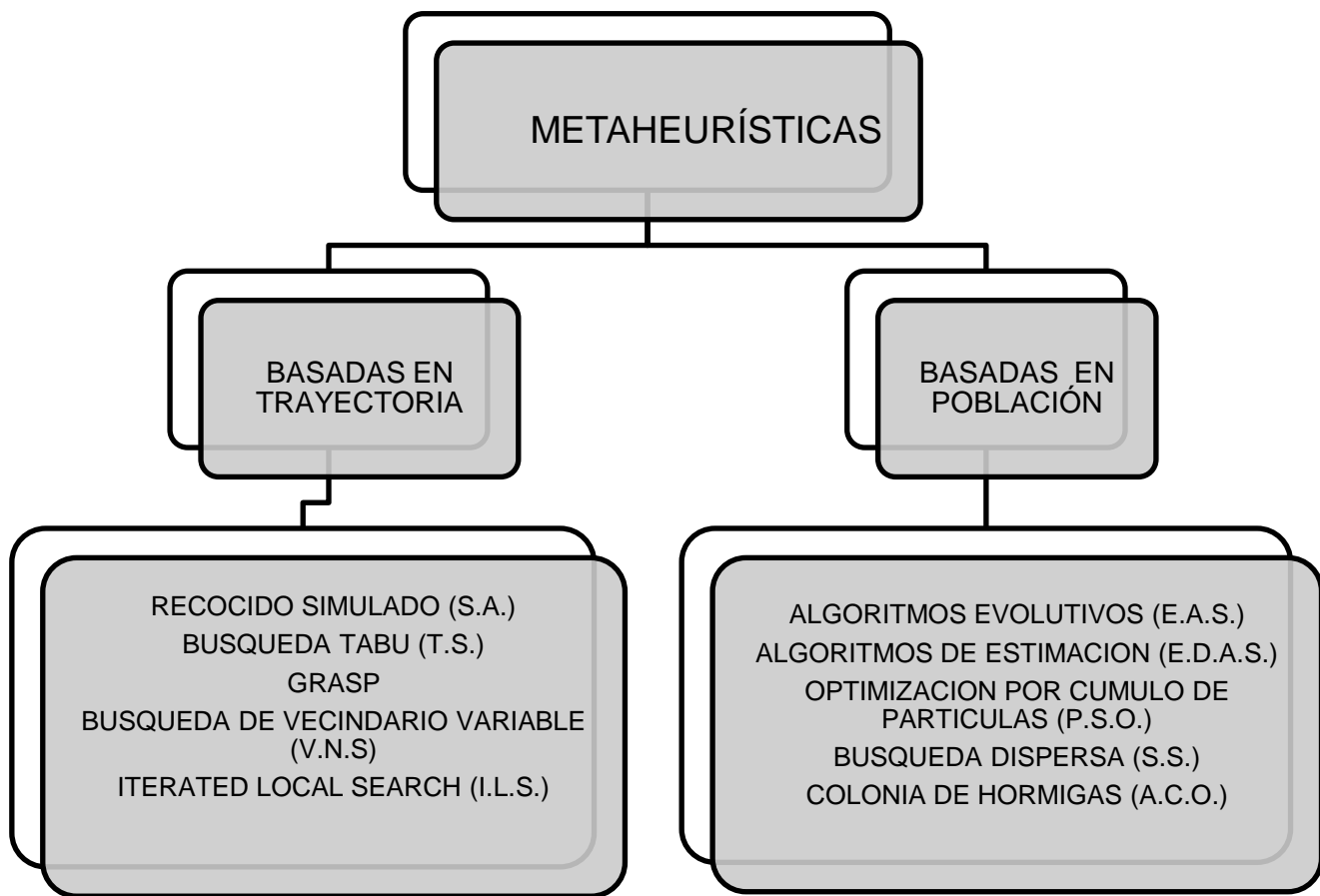


Figura 49. Clasificación de las principales metaheurísticas. [Fuente: Autoría Propia]

### 3.3.1.1 *Métodos basados en trayectoria*

El término Método Basado en Trayectoria es usado porque el proceso de búsqueda llevado a cabo se caracteriza por determinar una trayectoria en el espacio de soluciones. Por lo tanto, una solución sucesora puede o no pertenecer al vecindario de la actual.

La principal característica de estos métodos es que parten de un punto y mediante la exploración del vecindario van actualizando la solución actual, formando una trayectoria.

La mayoría de estos algoritmos surgen como extensiones de los métodos de búsqueda local simples a los que se les añade alguna característica para escapar

de los mínimos locales [103]. Esto implica la necesidad de una condición de parada más compleja que la de encontrar un mínimo local. Normalmente se termina la búsqueda cuando se alcanza un número máximo predefinido de iteraciones, se encuentra una solución con una calidad aceptable, o se detecta un estancamiento del proceso.

### **3.3.1.2 Recocido simulado (s.a.)**

El enfriamiento o Recocido Simulado (Simulated Annealing S.A.) es una de las más antiguas entre las metaheurísticas y seguramente es el primer algoritmo con una estrategia explícita para escapar de los óptimos locales. El SA fue inicialmente presentado por KIRKPATRICK GELATT y VECCHI [103]. La idea del SA es simular el proceso de recocido del metal y del cristal. Para evitar quedar atrapado en un óptimo local, el algoritmo permite elegir una solución peor que la solución actual. En cada iteración se elige, a partir de la solución actual  $s$ , una solución  $s'$  del vecindario  $N(s)$ . Si  $s'$  es mejor que  $s$  (es decir, tiene un mejor valor en la función de ajuste), se sustituye  $s$  por  $s'$  como solución actual. Si la solución  $s'$  es peor, entonces es aceptada con una determinada probabilidad que depende de la temperatura actual  $T$  y de la variación en la función de ajuste,  $f(s') - f(s)$  (caso de minimización).

### **3.3.1.3 Búsqueda tabú (t.s.)**

La Búsqueda Tabú o Tabu Search (TS) es una de las metaheurísticas que se han aplicado con más éxito a la hora de resolver problemas de optimización combinatorial. Los fundamentos de este método fueron introducidos por GLOVER [104]. La idea básica de la búsqueda tabú es el uso explícito de un historial de la búsqueda (una memoria de corto plazo), tanto para escapar de los óptimos locales como para implementar su estrategia de exploración y evitar buscar varias veces en la misma región. Esta memoria de corto plazo es implementada en esta técnica como una lista tabú, donde se mantienen las soluciones visitadas más recientemente para excluirlas de los próximos movimientos. En cada iteración se elige la mejor solución entre las permitidas y la solución es añadida a la lista tabú.

Este algoritmo se ha utilizado en la solución del problema de asignación cuadrática (QAP) TAILLARD. [105], el problema de máxima satisfacción (MAXSAT), el problema de ruteo de vehículos (VRP) (Fred W. Glover, Gary A. Kochenberger [106]), entre otros.

### **3.3.1.1.3 GRASP**

El Procedimiento de Búsqueda Aleatorizado y Adaptativo o The Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP) [107] es una metaheurística simple que combina heurísticos constructivos con búsqueda local. GRASP es un procedimiento iterativo compuesto de dos fases: primero una construcción de una solución y después un proceso de mejora. La solución mejorada es el resultado del proceso de búsqueda.

### **3.3.1.1.4 La búsqueda en vecindario variable (v.n.s)**

La Búsqueda en Vecindario Variable o Variable Neighborhood Search (VNS) es una metaheurística propuesta en [108], que aplica explícitamente una estrategia para cambiar entre diferentes estructuras de vecindario de entre un conjunto de ellas definidas al inicio del algoritmo. Este algoritmo es muy general y con muchos grados de libertad a la hora de diseñar variaciones e instancias particulares.

### **3.3.1.1.5 La búsqueda local iterada (I.L.S.)**

La Búsqueda Local Iterada o Iterated Local Search (ILS) [109] es una metaheurística basada en un concepto simple pero muy efectivo. En cada iteración, la solución actual es perturbada y a esta nueva solución se le aplica un método de búsqueda local para mejorarla. Este nuevo óptimo local obtenido por el método de mejora puede ser aceptado como nueva solución actual si pasa un test de aceptación.

### **3.3.1.4 Métodos basados en población**

Los métodos basados en población se caracterizan por trabajar con un conjunto de soluciones (población) en cada iteración, a diferencia de los métodos que vimos antes que únicamente utilizan un punto del espacio de búsqueda por iteración. El resultado final proporcionado por este tipo de algoritmos depende fuertemente de la forma en que manipula la población.

### **3.3.1.4.1 Los algoritmos evolutivos (E.A.)**

Los Algoritmos Evolutivos o Evolutionary Algorithms (EA) [110] están inspirados en la capacidad de la naturaleza para evolucionar seres para adaptarlos a los

cambios de su entorno. Esta familia de técnicas sigue un proceso iterativo y estocástico que opera sobre una población de individuos.

Cada individuo representa una solución potencial al problema que se está resolviendo. Inicialmente, la población es generada aleatoriamente (quizás con ayuda de un heurístico de construcción). Cada individuo en la población tiene asignado, por medio de una función de aptitud (fitness), una medida de su bondad con respecto al problema bajo consideración.

Este valor es la información cuantitativa que el algoritmo usa para guiar su búsqueda. En los métodos que siguen el esquema de los algoritmos evolutivos, la modificación de la población se lleva a cabo mediante tres operadores: selección, recombinación y mutación.

Estos algoritmos establecen un equilibrio entre la explotación de buenas soluciones (fase de selección) y la exploración de nuevas zonas del espacio de búsqueda (fase de reproducción), basados sobre el hecho que la política de reemplazo permite la aceptación de nuevas soluciones que no mejoran necesariamente la existentes.

En la literatura se han propuesto diferentes algoritmos basados en este esquema general. Básicamente, estas propuestas se pueden clasificar en tres categorías que fueron desarrolladas de forma independiente.

### **3.3.1.2.2 Algoritmos de estimación de distribuciones (EDAS)**

Conocidos como *Estimation of Distribution Algorithms (EDAs)*, algoritmos de estimación de distribuciones MÜHLENBEIN y PAAFI [111]. Se crearon con el fin de mejorar los operadores de recombinación de los algoritmos evolutivos, en los cuales a veces se presentan bloques constructivos de mala calidad. Basan sus principios en teorías probabilísticas y trabajan con una población que evoluciona de la mano con el avance de la búsqueda. El algoritmo sigue repeticiones cíclicas hasta alcanzar un punto de parada, solo cuando se ha generado la población. Una parte de las mejores soluciones de la población actual se selecciona y se procede a calcular una distribución de probabilidades del espacio de búsqueda, la cual es la muestra para obtener la población en la próxima iteración. Esta es una metaheurística muy nueva, la cual se ha aplicado al problema de la mochila, planificación de tareas y problemas de optimización en general BULLNHEIMER [112].

#### **3.3.1.2.3 Cúmulos de partículas (P.S.O.)**

Los Algoritmos Basados en Cúmulos de Partículas o Particle Swarm Optimization (PSO) [113] son técnicas metaheurísticas inspiradas en el comportamiento social del vuelo de las bandadas de aves o el movimiento de los bancos de peces. Se fundamenta en los factores que influyen en la toma de decisión de un agente que forma parte de un conjunto de agentes similares. La toma de decisión por parte de cada agente se realiza conforme a una componente social y una componente individual, mediante las que se determina el movimiento (dirección) de este agente para alcanzar una nueva posición en el espacio de soluciones. Simulando este modelo de comportamiento se obtiene un método para resolver problemas de optimización.

#### **3.3.1.2.4 La búsqueda dispersa (S.S.)**

La Búsqueda Dispersa o Scatter Search (SS) [114] es una metaheurística cuyos principios fueron presentados en [115] y que actualmente está recibiendo una gran atención por parte de la comunidad científica. El algoritmo se basa en mantener un conjunto relativamente pequeño de soluciones tentativas (llamado conjunto de referencia) que se caracteriza tanto por contener buenas soluciones como soluciones diversas. Este conjunto se divide en subconjuntos de soluciones a las cuales se les aplica una operación de recombinación y mejora. Para realizar la mejora o refinamiento de soluciones se suelen utilizar mecanismos de búsqueda local.

#### **3.3.1.2.5 Colonias de hormigas (A.C.O.)**

Los sistemas basados en Colonias de Hormigas o Ant Colony Optimization (ACO) [116] son unas metaheurísticas inspiradas en el comportamiento en la de las hormigas reales cuando realizan la búsqueda de comida.

Este comportamiento es el siguiente: inicialmente, las hormigas exploran el área cercana a su nido de forma aleatoria. Tan pronto como una hormiga encuentra la comida, la lleva al nido. Mientras que realiza este camino, la hormiga va depositando una sustancia química denominada feromona. Esta sustancia ayudará al resto de las hormigas a encontrar la comida. Esta comunicación indirecta entre las hormigas mediante el rastro de feromona las capacita para encontrar el camino más corto entre el nido y la comida. Esta funcionalidad es la que intenta simular este método para resolver problemas de optimización. En esta técnica el rastro de feromona es simulado mediante un modelo probabilístico.



## 4. FORMULACIONES MATEMÁTICAS

A continuación se definen los problemas y formulaciones aplicados en el problema del transporte aéreo que están relacionados a la programación lineal y la programación lineal entera, es de saber que en los problemas de programación lineal entera se presenta un tipo de problemas formalmente similares a los problemas de programación lineal, ya que en su descripción solo se establecen expresiones lineales. Sin embargo no responden a problemas lineales ya que algunas o todas las variables del problema toman valores que no están en un conjunto continuo. Por ejemplo, pueden ser variables que toman valores 0 o 1 (binarias), o variables que toman valores enteros no negativos (0,1,2,...).

### 4.1 PROBLEMA DE LA RUTA MÁS CORTO (SHORTEST PATH PROBLEM)

En este tipo de problemas se intenta identificar una ruta de acceso, desde el origen al destino, dentro de la red, de allí se produce un mínimo entre la relación tiempo / coste de transporte. Este problema en particular es especialmente atractivo para los manejos de carga y escenarios de origen / destino. El problema consiste en una red conectada con costos conocidos para cada arco en la red. El objetivo es identificar la ruta con el mínimo que costará entre dos nodos deseados. El modelo matemático general para el problema de la ruta más corta (SPP) es presentado por un binario (0-1) de programación entera de la siguiente manera:

*Conjuntos*

$M$  = Conjuntos de nodos

*Indices*

$i, j, k$  = Indices para los nodos

*Parámetros*

$C_{i,j}$  = costo del flujo a través del arco uniendo el nodo  $i$  al nodo  $j$

$m$  = destino del nodo

*Variable de decisión*

$$x_{i,j} = \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ si el arco } (i,j) \text{ es parte de la ruta} \\ 0 \text{ de lo contrario} \end{array} \right\}$$

*Función objetivo*

$$\text{Minimizar } \sum_{i \in M} \sum_{j \in M} c_{i,j} x_{i,j} \quad (1)$$

*Sujeto a*

$$\sum_{j \in M} x_{1,j} = 1 \quad j \neq 1 \quad (2)$$

$$\sum_{j \in M} x_{i,j} - \sum_{k \in M} x_{k,j} = 0 \quad \text{para todo } (\forall) i, i \neq 1 \text{ y } i \neq m \quad (3)$$

$$\sum_{i \in M} x_{i,m} = 1 \quad (4)$$

La función objetivo (1) intenta reducir al mínimo el costo total, mientras que la restricción (2) garantiza que el flujo se envía desde la fuente al nodo. El conjunto de restricciones (3) imponen que todos los otros nodos (excepto la fuente y el nodo destino) son nodos de transbordo. Por último, las restricción (4) asegura de que el flujo se reciba en el nodo de destino (demanda).

#### **4.1.1 Problema del costo mínimo de flujo**

El problema de la red del flujo de costo mínimo busca satisfacer los requisitos de los nodos a un costo mínimo. Esta es una forma generalizada de transporte, transbordo, y problemas de ruta más corta. En esta clase de problemas se da por supuesto se sabe que el costo por unidad del flujo y las capacidades asociadas con cada arco.

*Conjuntos*

$M = \text{Conjuntos de nodos}$

*Indices*

$i, j, k$  = Indices para los nodos

Parámetros

$C_{i,j}$  = costo del flujo a través del arco uniendo el nodo  $i$  al nodo  $j$

$b_i$  = monto de oferta/demanda para el nodo  $i$

$L_{i,j}$  = límite inferior del flujo a través del arco  $(i, j)$

$U_{i,j}$  = límite superior del flujo a través del arco  $(i, j)$

Variable de decisión

$x_{i,j}$  = cantidad de flujo del nodo  $i$  al nodo  $j$

Función objetivo

$$\text{Minimizar } \sum_{i \in M} \sum_{j \in M} C_{i,j} x_{i,j} \quad (5)$$

Sujeto a

$$\sum_{j \in M} x_{i,j} - \sum_{k \in M} x_{k,j} = b_i \quad \forall i = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

$$L_{i,j} \leq x_{i,j} \leq U_{i,j} \quad (7)$$

La función objetivo (5) intenta reducir al mínimo el costo total de la red. Las restricciones (6) cumplen los requisitos de que cada nodo este determinada la cantidad de flujo entrante y flujo saliente de ese nodo. El conjunto de restricciones (7) impone las restricciones del límite menor y superior a lo largo de los arcos.

#### 4.1.2 Problema de flujo máximo

El problema de flujo máximo es un caso especial del problema de flujo de costo mínimo. Trata de encontrar la mayor cantidad de flujo que se pueden enviar desde un nodo (nodo de origen) a otro (nodo de destino) cuando la red está capacitada, que es decir, los arcos de la red tienen un límite de capacidad.

*Conjuntos*

$M =$  Conjuntos de nodos

*Indices*

$i, j, k =$  Indices para los nodos

*Parámetros*

$L_{i,j} =$  límite inferior del flujo a través del arco  $(i, j)$

$U_{i,j} =$  límite superior del flujo a través del arco  $(i, j)$

$m =$  nodo de destinación

*VARIABLES DE DECISIÓN*

$x_{i,j} =$  cantidad de flujo desde el nodo  $i$  al nodo  $j$

$f =$  cantidad de flujo del nodo de recurso al nodo de destinación

*Función objetivo*

Maximizar  $f$  (8)

*Sujeto a*

$$\sum_{j \in M} x_{i,j} = f \quad \leftrightarrow \quad \text{nodo de origen} \quad (9)$$

$$\sum_{i \in M} x_{i,j} - \sum_{k \in M} x_{j,k} = 0 \quad \leftrightarrow \quad \text{nodos de transbordo} \quad (10)$$

$$\sum_{i \in M} x_{i,m} = f \quad \leftrightarrow \quad \text{nodo de destinación} \quad (11)$$

$$L_{i,j} \leq x_{i,j} \leq U_{i,j} \quad (12)$$

La función objetivo (8) intenta maximizar el flujo desde el nodo de origen (nodo 1) al nodo de destino (nodo  $m$ ). El conjunto de restricciones (9) y (11) imponen las

restricciones de flujo de entrada y flujo de salida de la fuente y los nodos de destino. Todos los demás nodos son nodos de transbordo. El conjunto de restricciones (10) impone esta restricción. Por último, las limitaciones de (12) restringen el flujo a lo largo de los arcos sobre la base de la capacidad de imponerse.

#### 4.1.3 Problema multiservicio

Todos los modelos de red se suponen que un solo producto o tipo de la entidad se envía a través de una red. A veces, una red puede transportar diferentes tipos de productos. El problema de múltiples productos básicos busca minimizar el costo total cuando se envían diferentes tipos de productos a través de la misma red. Los productos pueden o bien ser diferenciados por sus características físicas o simplemente por ciertos atributos. El problema multi-producto se utiliza ampliamente en la industria del transporte. En la industria de las aerolíneas, el modelo multi-mercancía es adoptado para formular modelos de asignación de flotas de aeronaves y emparejamiento de tripulación.

##### *Conjuntos*

$M = \text{Conjuntos de nodos}$

$K = \text{Conjuntos de producto}$

##### *Indices*

$i, j = \text{índices para los nodos}$

$k = \text{índices para los productos}$

##### *Parámetros*

$c_{i,j,k} = \text{costo unitario del flujo del nodo } i \text{ al nodo } j \text{ del producto } k$

$b_{i,k} = \text{cantidad oferta /demanda del nodo } i \text{ al producto } k$

$U_{i,j} = \text{capacidad de flujo en el arco}(i,j)$

*Variables de decisión*

$X_{i,j,k}$  = cantidad de flujo desde el nodo  $i$  al nodo  $j$  del producto

*Función objetivo*

$$\text{Min} \sum_{k \in K} \sum_{i \in M} \sum_{j \in M} c_{i,j,k} x_{i,j,k} \quad (13)$$

*Sujeto a*

$$\sum_{t \in M} x_{i,t,k} - \sum_{t \in M} x_{t,i,k} = b_{i,j} \quad \text{para todo } i \in M \text{ y } k \in K \quad (14)$$

$$\sum_{k \in K} x_{i,t,k} \leq u_{i,j} \quad \text{para todo } i \in M \text{ y } j \in M \quad (15)$$

En este modelo, la función objetivo (13) busca minimizar el costo total de la red más de todos los nodos y todos los productos. El conjunto de restricciones (14) y (15) satisface la oferta / demanda del nodo e impone restricciones de capacidad en el arco.

## 4.2 MODELOS DE PROGRAMACION ENTERA

Los modelos de programación entera se relacionan con ciertos tipos de modelos de programación lineal en los que todas las variables de decisión están obligadas a ser enteros no negativos.

### 4.2.1 Problemas de particionamiento (set-covering/partitioning problems)

Problemas de conjunto de particionamientos se refieren a casos en los que cada miembro de un grupo debe ser asignado o emparejado a un miembro (s) de otro conjunto. Los ejemplos incluyen la asignación de los miembros de la tripulación en los vuelos, los aviones a las rutas, etc. El objetivo del problema es reducir al mínimo el costo total de esta asignación.

### Conjuntos

$M$  = miembros del conjunto 1

$N$  = miembros del conjunto 2

### Indices

$i$  = índices para el conjunto 1

$j$  = índices para el conjunto 2

### Parámetros

$c_i$  = costo asociado con la selección del miembro  $j$

$$a_{i,j} = \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ si el miembro } j \text{ abarca al miembro } i \\ 0 \text{ de lo contrario} \end{array} \right\}$$

### Variables de decisión

$$x_j = \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ si el miembro } j \text{ es seleccionado} \\ 0 \text{ de lo contrario} \end{array} \right\}$$

El modelo de programación binaria se describe de la siguiente forma

### Función objetivo

$$\text{Min } \sum_{i \in N} c_j x_j \quad (16)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in N} a_{i,j} x_j \geq 1 \quad \text{para todo } i \in M \quad (17)$$

En este modelo, la función objetivo (16) busca minimizar la cobertura total costará la asignación. El conjunto de restricciones (17) impone que cada miembro del grupo 1 está cubierta por al menos un miembro del conjunto 2.

La formulación conjunto de partición del problema anterior es similar, excepto que (2.17) es ahora reescrito con una rigurosa igualdad como se muestra de la siguiente manera:

$$\sum_{j \in N} a_{i,j} x_j = 1 \quad \text{para todo } i \in M$$

En estos modelos se hacen referencias a las matrices. Por un conjunto de recubrimiento o matriz de conjunto de particiones, se refieren a una matriz de  $a_{i,j}$  parámetros donde los miembros de un conjunto (índice  $i$ ) están representados por filas y los miembros del otro grupo (índice  $j$ ) están representados por columnas, como se muestra a continuación.

*Miembros del conjunto 2 indexado por  $j$*

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{miembros del conjunto 1 indexados por } i \end{array} \left( \begin{array}{cccc} 1 & 0 & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots \\ & & \dots & \dots \\ 1 & 1 & \dots & \dots \end{array} \right) \right\}$$

En esta matriz un valor de 1 significa que el miembro específico en conjunto 1 está cubierta por el miembro específico en conjunto 2. Un valor de 0 significa que esta cobertura no existe.

#### 4.2.2 El problema del agente viajero (traveling salesman problem)

El problema del agente viajante es un problema clásico en la investigación de operaciones, y ha recibido considerable atención en la literatura. Tiene grandes aplicaciones en la secuencia de la serie de trabajos o rutas. El problema del agente se describe de la siguiente forma: A partir de su ciudad natal o de origen, un vendedor quiere visitar una serie de ciudades sólo una vez, y finalmente regresar a su ciudad de origen. El problema es determinar la mejor secuencia para visitar estas ciudades por lo que el costo total (distancia total o tiempo total recorrido) se reduce al mínimo.



A pesar de la simplicidad del alcance del problema, la solución a este problema es muy difícil ya que es uno de los problemas combinatorios computacionalmente más intensivo

*Conjuntos*

$N$  = número de ciudades

*Indices*

$i, j$  = índices para todas las ciudades

*Parámetros*

$C_{i,j}$  = costo de viajar de la ciudad  $i$  a la ciudad  $j$

*Variable de decisión*

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{si la ciudad } j \text{ le sigue la ciudad } i \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

*El modelo de programación entera es el siguiente:*

*Función objetivo*

$$\text{Minimizar } \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{i,j} x_{i,j} \quad (18)$$

*Sujeto a*

$$\sum_{j \in N} x_{i,j} = 1 \quad \text{para todo } i = 1, \dots, N \quad (19)$$

$$\sum_{i \in N} x_{i,j} = 1 \quad \text{para todo } j = 1, \dots, N \quad (20)$$

$$t_i - t_j + Nx_{i,j} < N - 1 \quad \text{para } i, j = 2, 3, \dots, N \quad (21)$$

En este modelo, la función objetivo (18) busca minimizar el costo total del viaje. El conjunto de restricciones (19) se asegura de que cada ciudad  $i$  es seguida exactamente por una ciudad  $j$ . Del mismo modo, el conjunto de restricciones (20)

se asegura de que cada ciudad  $j$  es visitada exactamente una vez. El conjunto de restricciones (21) aplica la restricción de las rutas secundarias. Las variables  $t_i$  y  $t_j$  son números fijos arbitrarios utilizados para romper las rutas secundarias.

### **4.3 FORMULACIÓN PARA EL FLEET ASSIGNMENT PROBLEM (FAM)**

En la asignación de flotas los investigadores han desarrollado un método ingenioso al adoptar una red espacio-tiempo (time - space network) para formular este problema, este enfoque facilita el proceso de modelar el problema.

La red espacio-temporal que se presenta a continuación presenta los aeropuertos como columnas, y las horas de la jornada como filas. En esta red, los arcos (flechas) son los vuelos, y los nodos representan la entrada o salida de un segmento de vuelo en un aeropuerto determinado, a una hora específica del día.

Un arco envolvente conecta el último nodo al primer nodo en dado ciudad. Estos arcos representan normalmente la aeronave que pasa la noche en un aeropuerto, y conecta la última llegada al vuelo de salida del día siguiente.

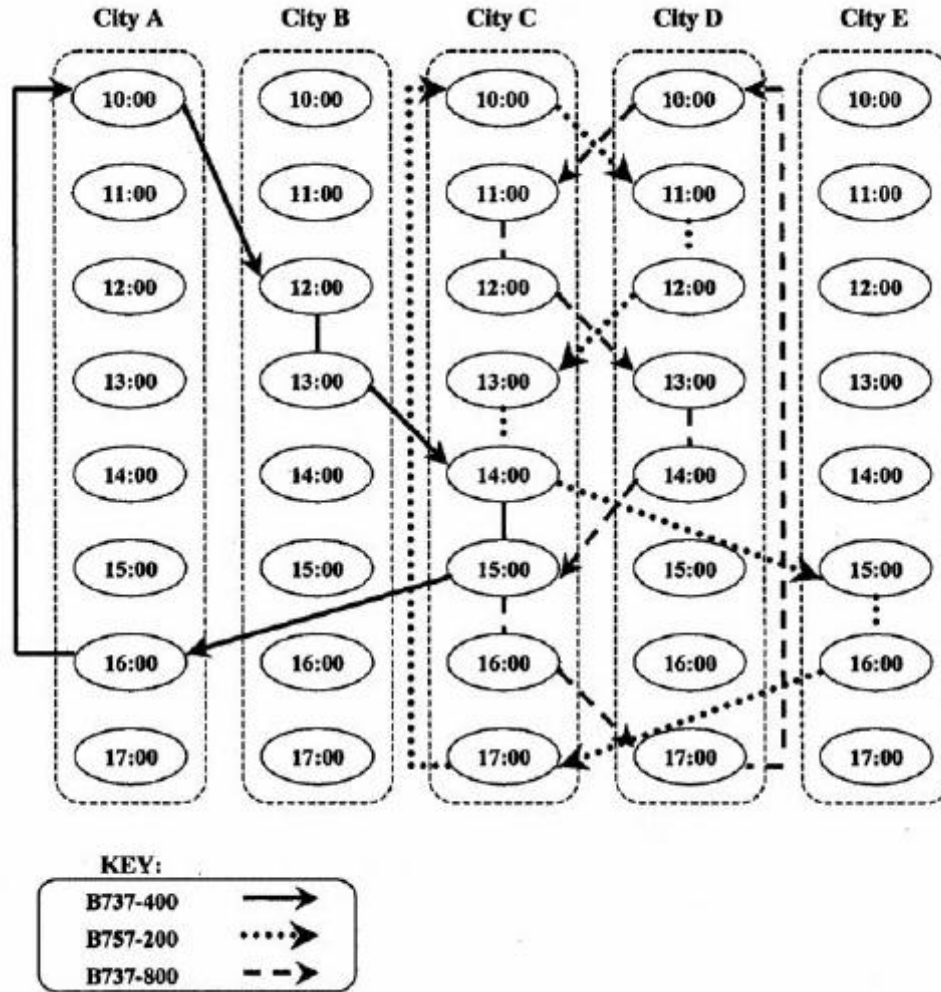


Figura 50. Ejemplo de una red espacio-tiempo (time - space network). [119]

Las flechas representan 3 diferentes aeronaves en una asignación de vuelos diarios en diferentes ciudades.

Se presentamos formalmente el modelo matemático general para el problema de asignación de flotas de la siguiente forma. HANE [118] se refiere a este como el modelo básico de asignación de flota (FAM) simplificada usando una red espacio-tiempo.

### Conjuntos

$F$  = conjunto de vuelos

$K$  = conjunto de tipos de flotas

$C$  = conjunto de últimos nodos, que representan a todos

los nodos con aviones a tierra durante la noche en un aeropuerto de la red

$M$  = números de nodos en la red

### Índice

$i$  = índice del vuelo

$j$  = índice de la flota

$k$  = índice de los nodos

### Parámetros

$C_{i,j}$  = costo de asignación de la flota tipo  $j$  al vuelo  $i$

$N_j$  = número de aviones disponible en el tipo de flota  $j$

$S_{i,k} = \begin{cases} +1 & \text{si el vuelo } i \text{ es una llegada en el nodo } k \\ -1 & \text{si el vuelo } i \text{ es una salida desde el nodo } k \end{cases}$

$x_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{si el vuelo } i \text{ está asignado a la flota tipo } j \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$

$G_{k,j}$  = variable de decisión entera representando el número de vuelo de la flota tipo  $j$  en tierra en el nodo  $k$

El problema de programación lineal se describe de la siguiente forma:

### Función objetivo

$$\text{Minimizar } \sum_{j \in K} \sum_{i \in F} C_{i,j} x_{i,j} \quad (22)$$

### Sujeto a

$$\sum_{j \in K} x_{i,j} = 1 \quad \text{para todo } i \in F \quad (23)$$

$$G_{k-1,j} - \sum_{i \in f} S_{i,k} x_{i,j} = G_{k,j} \quad \text{para todo } k \in M \text{ y } j \in K \quad (24)$$

$$\sum_{k \in C} G_{k,j} \leq N_j \quad \text{para todo } j \in K \quad (25)$$

$$x_{i,j} \in \{0,1\} \quad \text{para todo } i \in F \text{ y } j \in K \quad (26)$$

$$G_{k,j} \in Z^+ \quad \text{para todo } k \in M \text{ y } j \in K \quad (27)$$

La función objetivo en (22) busca minimizar la el costo total de la asignación de los diferentes tipos de flotas de todos los vuelos en el calendario.

La restricción (23) es la restricción de vuelo para garantizar que cada vuelo se cubierto por un tipo de flota. La restricción (24) es la restricción de balance de aeronaves. El número de aeronaves para cualquier tipo de flota en cualquier nodo es el número de aeronaves de este mismo tipo de flota justo antes de ese nodo (representado en el modelo mediante  $G_{k-1,j}$ ), además de las llegadas (representada por el  $S_{i,k}$  toma un valor 1) menos las salidas (representada por  $S_{i,k}$  teniendo un valor de -1).

La restricción (26) representa el tamaño de la flota. El número de aviones de la flota tipo  $j$ , el cual no debe exceder el número disponible de las aeronaves en la flota ( $N_j$ ). Las restricciones (26) y (27) representan el estado binario y de enteros de las variables de decisión.  $Z^+$  es el conjunto de números enteros positivos.

#### 4.4 FORMULACIÓN PARA EL AIRCRAFT ROUTING

Este método utiliza una formulación con un conjunto de particiones (set-partitioning) a determinar el enrutamiento diario para cada aeronave. En este enfoque, se generan todos los itinerarios válidos para cada aeronave.

En la mayoría de las aerolíneas no realizan ciclos cerrados (periodos de tres días en que la aeronave cumple sus itinerarios hasta llegar de nuevo a la ciudad de origen) sino que realizan rutas mensuales en donde los aviones tienen la posibilidad de volar cualquiera de las rutas de la compañía aérea según sean sus necesidades de mantenimiento.

La Formulación propuesta por KABBANI [120] se presenta de la siguiente forma:

### Conjuntos

$F$  = conjunto de vuelos

$R$  = conjunto de rutas factibles

### Indices

$j$  = índice de la ruta

$i$  = índice del vuelo

### Parámetros

$c_j$  = costo de la ruta  $j$

$a_{i,j}$  = 1 si el vuelo  $i$  está cubierto por la ruta  $j$ , y 0 de lo contrario

$N$  = número total de vuelos en la flota

### Variable de decisión

$x_j = \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ si la ruta } j \text{ es seleccionada} \\ 0 \text{ de lo contrario} \end{array} \right\}$

Minimizar  $\sum_{j \in R} c_j x_j$

### Sujeto a

$$\sum_{j \in R} a_{i,j} x_j = 1 \quad \text{para todo } i \in F \quad (28)$$

$$\sum_{j \in R} x_j \leq N \quad (29)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \text{para todo } j \in R$$

En el anterior problema de programación lineal entera la función objetivo busca minimizar el costo total de las rutas seleccionadas. Si otros objetivos, tales como la cobertura de los vuelos, el número disponible de aeronaves, labores de mantenimiento y los turnos de pernoctada, entonces la función objetivo anterior en

consecuencia puede ser modificada y tener muchas más variables de decisión. La restricción (28) se asegura de que cada vuelo está cubierto por una y sólo una ruta. La restricción (29) restringe el número de rutas seleccionadas a la disposición del número de aeronaves dentro de un tipo de flota en particular.

Dentro de las consideraciones en la función objetivo que se pueden dar para modificar el modelo se dan las siguientes:

Maximizar través de los valores: Ya que los vuelos sin escalas son la primera opción para pasajeros. En ausencia de tales vuelos punto a punto, los pasajeros deben tomar vuelos de conexión. (Through flights) Son vuelos los cuales se conocen como un tipo de conexión que utiliza el mismo avión en los vuelos en subsiguientes en cuestión. Esto permite a los pasajeros a permanecer a bordo en lugar de desembarcar, buscando su nueva puerta de embarque y caminar a su vuelo de conexión. Estos vuelos son especialmente atractivos en aeropuertos que presentan mucha congestión.

En consecuencia, las compañías aéreas colocan los valores más altos en esas rutas favorables [121].

Reducir al mínimo los costos: Las líneas aéreas pueden asignar costos para penalizar rutas que ellos consideran que son desfavorables. Estas rutas desfavorables pueden incluir los tiempos de conexión muy largos y rutas circulares donde los aviones son aislados por volar entre un pequeño número de radios.

Maximizar las oportunidades de mantenimiento: Son aquellas rutas que ofrecen múltiples oportunidades de mantenimiento de la aeronave se dan pesos más altos.

#### **4.5 FORMULACIÓN PARA EL CREW SCHEDULING**

El crew scheduling se divide en dos subproblemas los cuales son el crew pairing y el crew rostering; objetivo del problema de emparejamiento de tripulación (crew pairing) es reducir al mínimo el costo total de asignación de tripulaciones de vuelo de los segmentos de vuelo, de modo que todos los vuelos sean cubiertos, y asegurarse que las reglas de la compañía y del gobierno se cumplan. Además, se deben considerar las limitaciones en el número de equipos (parejas) disponibles en cada base.

Este problema por lo general busca parejas que se traducen en una alta utilización de horas de vuelo para la tripulación, y tiempos mínimos de conexión, por lo tanto se quiere que estas parejas permanezcan en la misma aeronave en varios segmentos de vuelo si es posible.

La formulación [122] del Crew Pairing se considera de la siguiente forma:

*Conjuntos*

$F$  = conjunto de vuelos

$P$  = conjunto de posibles emparejamientos

$K$  = conjunto de tripulaciones en ciudades de base de origen

*Indices*

$j$  = índice de emparejamiento

$i$  = índice del vuelo

$k$  = índice de tripulación ciudad base

*Parámetros*

$C_j$  = costo de la tripulación de emparejamiento  $j$

$$a_{i,j} = \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ si el vuelo } i \text{ está cubierto por el emparejamiento } j \\ 0 \text{ de lo contrario} \end{array} \right\}$$

$$h_{k,j} = \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ si la ciudad base (empezando y terminado el vuelo)} \\ \text{para el emparejamiento } j \text{ es la ciudad } k \\ 0 \text{ de lo contrario} \end{array} \right\}$$

$b_{menor_k}$  = número mínimo de tripulación para ser usada el ciudad base  $k$

$b_{mayor_k}$  = número máximo de tripulación para ser usada el ciudad base  $k$

*Variable de decisión*

$$x_j = \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ si el emparejamiento } j \text{ es parte de la solución} \\ 0 \text{ de lo contrario} \end{array} \right\}$$

El modelo matemático está formulado como:

$$\text{Min } \sum_{j \in K} c_j x_j \quad (30)$$

Sujeto a:



$$\sum_{j \in P} a_{i,j} x_j = 1 \quad \text{para todos los tramos de vuelo } i \in F \quad (31)$$

$$b_{menor_k} \leq \sum_{j \in P} h_{k,j} x_j \leq b_{mayor_k} \quad \text{para todos los tramos de vuelo } i \in F \quad (32)$$

En este modelo, la función objetivo (30) intenta reducir al mínimo el costo total de emparejamientos de vuelo. La restricción (31) garantiza que cada tramo de vuelo sólo está cubierto una vez. La restricción procura (32) asegurarse de que las parejas de vuelo seleccionados permanecen dentro el número disponible de los miembros de la tripulación en cada base de operaciones.

El crew rostering se lleva a cabo una vez concluido el crew pairing; el crew rostering es el proceso de asignación de los miembros de la tripulación de emparejamientos tripulación efectuados, se construyen planillas mensuales personalizadas para los miembros de la tripulación.

El modelo matemático para el crew rostering depende de cómo se elijan para construir las listas, es decir, ya sea individual o listas anónimas.

La Formulación [123] se realiza de la siguiente manera:

*Conjuntos*

$P$  = conjunto de emparejamientos por lista de turno

$R$  = conjunto de turnos válidos

*Indices*

$j$  = índice turno

$i$  = índice de emparejamiento

*Parámetros*

$C_j$  = desviación del turno  $j$  del valor del tiempo objetivo del vuelo

$a_{i,j} = \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ si el emparejamiento } i \text{ está cubierto por el turno } j \\ 0 \text{ de lo contrario} \end{array} \right\}$

*Variable de decisión*

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{si el turno } j \text{ es parte de la solución} \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

El modelo matemático está formulado como:

$$\text{Minimizar } \sum_{j \in R} c_j x_j \tag{33}$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in R} a_{i,j} x_j \quad \text{para todo } i \in P \tag{34}$$

En este modelo, la función objetivo (33) intenta minimizar la suma total de las desviaciones. La restricción (34) garantiza que cada vuelo del emparejamiento de cada día es cubierto sólo una vez.

Es importante señalar que la dificultad para hacer frente a los problemas más grandes será agravado por la integración de estos dos problemas.

A continuación se muestra un ejemplo del diagrama resultante del crew scheduling

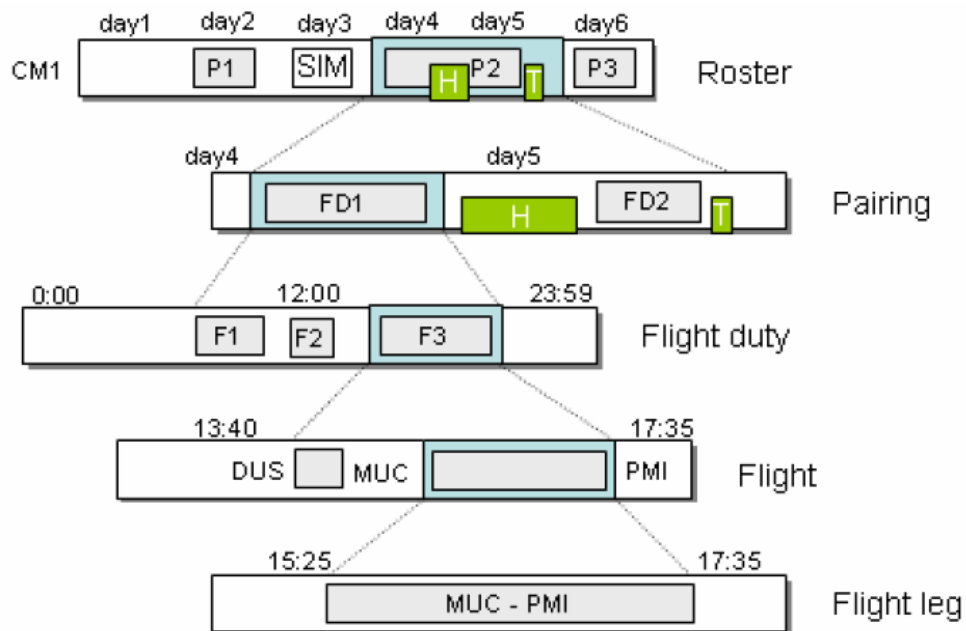


Figura 51. Diagrama del Crew scheduling [124].

Para el miembro de la tripulación CM1 una asignación con tres emparejamientos (P1, P2 y P3). Se aprecia que el CM1 está bloqueado en su labor el día 3 ya que está programado previamente una sesión de simulador para entrenamiento. En la ejecución del emparejamiento P2 requiere una estadía en un Hotel el día 5 al igual que un tránsito T para regresar a su base asignada para realizar el emparejamiento P3 al día siguiente. El emparejamiento P2 tiene una duración de dos días de labor y como resultado de este, el mismo consiste en de dos vuelos consecutivos (FD1, FD2). FD1 se descompone de nuevo en los vuelos F1, F2 y F3 los cuales consumen un total de menos de 14 horas de labor sin un descanso diario. El vuelo F3 inicia desde la ciudad (DUS) y se dirige hacia (PMI) haciendo una parada en el aeropuerto de la ciudad (MUC) para después proseguir hacia (PMI).

#### **4.6 FORMULACIÓN PARA EL MANPOWERING PROBLEM**

El modelo matemático propuesto por BRUSCO [125] se dirige tanto a tiempo parcial y a los empleados a tiempo completo, sus límites, numerosas combinaciones de turnos de trabajo, día y rotaciones semanales. Este método se ha utilizado en el desarrollo del sistema de planificación de recursos humanos automatizada de United Airlines llamado Pegasys. Este sistema automatizado ayuda a la compañía aérea en la determinación de la mejor planificación de colaboradores. Pegasys utiliza los horarios de vuelo, las previsiones de pasajeros, equipaje y carga, para calcular los requisitos de mano de obra. El modelo matemático para este sistema automatizado utiliza programación de recorrido personal que implica la determinación de los trabajos y días no laborables durante la semana, así como el cambio diario asociado de partida y finalización, para cada empleado.

La formulación [125] consiste en:

*Conjuntos*

$D =$  conjunto de días en la planeación semanal

$S =$  conjunto de turnos permitidos

$T =$  conjunto de todos los bloques de tiempo en la planeación semanal

### Indices

$i$  = índice por día en la planeación semanal

$j$  = índice por turno

$k$  = índice para bloques de tiempo

### Parámetros

$$a_{i,j,k} = \begin{cases} 1 & \text{si el bloque de tiempo } k \text{ es tiempo trabajado en el turno tipo } j \\ & \text{el cual comienza en el día } i \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

$R_k$

= número de trabajadores que se requiere que estén presentes en el bloque de tiempo  $k$

$x_{i,j}$

= número de empleados quienes comienzan a trabajar en el día  $i$  adoptando el turno  $j$

El problema está formulado como:

$$\text{Minimizar } \sum_{i \in D} \sum_{j \in S} x_{i,j}$$

Sujeto a:

$$\sum_{i \in D} \sum_{j \in S} a_{i,j,k} x_{i,j} \geq R_k \quad \forall k \in T$$

$$x_{i,j} \in Z^+ \quad \forall i \in D, \forall j \in S$$

En este modelo, la función objetivo intenta minimizar la fuerza de trabajo total sujeto a la disponibilidad de mano de obra para cada bloque de tiempo del día.

$Z^+$  representa el conjunto de números enteros positivos.

## 4.7 FORMULACIÓN PARA EL FUEL MANAGEMENT SYSTEM

Para la formulación del fuel management system se debe de tener en cuenta que este es uno de los costos más elevados asociados a las operaciones aéreas por su alta fluctuación de precios en los mercados y de los diferentes proveedores que se encuentran en las ciudades a las que sirven las aerolíneas.

La formulación básica propuesta por ZOUEN, ABILLAMA y TOHME [126] es de la siguiente manera:

*Conjunto*

$N$  = conjunto de todos los aviones en la flota

$n$

= conjunto de vuelos que conecta los aeropuertos en el horizonte predeterminando

*Indices*

$i$  = índice del aeropuerto

$j$  = índice del avión

*Parámetros*

$C_i$  = costo del combustible en el aeropuerto  $i$

$DOW$  = peso muerto del avión

$PL_i$  = peso de la carga en la salida del aeropuerto  $i$

$MTOW$  = máximo peso permitido en el despegue

$MLW$  = máximo peso permitido en el aterrizaje

$Tank$  = capacidad máxima del tanque

$FC_{i,i+1}$

= cantidad de consumo de combustible por el avión entre el aeropuerto  $i$  y el  $i + 1$

$SF_{i,i+1}$  = cantidad de combustible extra, cuando está llegando del aeropuerto  $i + 1$  viniendo

del aeropuerto  $i$

*Variable de decisión*

$x_i$  = cantidad de combustible cargado por el avión en el aeropuerto  $i$

$y_i$

= cantidad de combustible restante en el avión cuando éste aterriza en el aeropuerto  $i$

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1} X_i c_i x_i \quad (35)$$

$$x_i + y_i \leq \text{tank} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} DOW + \text{payload}_{i,i+1} + x_i + y_i \\ \leq MTOW \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} DOW + \text{payload}_{i,i+1} + x_i + y_i - FB_{i,i+1} \\ \leq MLW \end{aligned} \quad (38)$$

$$x_i + y_i - FB_{i,i+1} \geq SF_{i,i+1} \quad (39)$$

$$x_i + y_i - FB_{i,i+1} = y_{i+1} \quad (40)$$

En este modelo, la función objetivo en (35) intenta minimizar el total del costo de combustible para un conjunto de vuelos predeterminados, para todas las aeronaves de la flota.

El conjunto de restricciones en (36), (37), (38) y (39) son restricciones operativas y seguridad de las aeronaves.

La ecuación (40) proporciona el equilibrio entre el combustible cargado por y el consumo de combustible de la aeronave.

#### **4.8 FORMULACIÓN GATE ASSIGNMENT**

El problema de la asignación de las puertas de embarque (gate assignment problem) comúnmente está enfocado en la formulación desde la perspectiva del pasajero de una manera que la distancia total, que los pasajeros deben caminar entre las puertas de embarque se reduce al mínimo. El gate assignment problema (GAP) se define de la siguiente manera:

Dado un conjunto de puertas y vuelos disponibles, la matriz de distancias entre las ciudades, la matriz de transferencia de pasajeros entre vuelos, se trata de asignar estos vuelos a las puertas de manera que las distancias totales caminadas por los pasajeros se reducen al mínimo.

El modelo descrito es un modelo de programación lineal entera propuesto por BIHR [127].

### *Indices*

$i$  = índice para la llegada de los vuelos

$j, k$  = índice para las puertas de embarque

### *Conjuntos*

$F$  = conjunto de llegada de vuelos

$G$  = conjunto de puertas disponibles para la llegada de vuelos

$K$  = conjunto de puerta de salida

### *Parámetros*

$P_{i,k}$  = número de pasajeros llegando en el vuelo  $i$  y saliendo desde la puerta  $k$

$dp_{k,j}$

= unidades de distancia (en yardas, metro, pies, etc) para los pasajeros de la puerta  $k$   
a la puerta  $j$

$TP_{i,j}$

= distancia total caminada por todos los pasajeros en el vuelo  $i$  asignado para llegar  
a la puerta  $j$

$t_{i,k}$

= número de viajes para transportar el equipaje desde el vuelo  $i$  a la puerta de salida  $k$

$db_{k,j}$

= unidades de distancia (en yardas, metro, pies, etc) para transportar el equipaje en la rampa  
desde la puerta de salida  $k$  hasta llegar a la puerta  $j$

$TB_{i,j}$  = distancia total de transporte para todos los equipajes en el vuelo  $i$  asignando a la  
puerta de llegada  $j$

$w_1, w_2$

= pesos asignados al total de pasajeros que caminan y el equipaje que se transporta

en las respectivas distancias

$TP_{i,j}$  y  $TB_{i,j}$  son calculadas como sigue:

$$TP_{i,j} = \sum_{k \in K} p_{i,k} dp_{k,j} \quad \text{para todo } i \in F \text{ y } j \in G$$

$$TB_{i,j} = \sum_{k \in K} t_{i,k} db_{k,j} \quad \text{para todo } i \in F \text{ y } j \in G$$

*Variables de decisión*

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{si el vuelo } i \text{ es asignado a la puerta } j \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

*Función objetivo*

$$\text{Minimizar } \sum_{i \in F} \sum_{j \in G} (w_1 TP_{i,j} x_{i,j} + w_2 TB_{i,j} x_{i,j})$$

*Sujeto a :*

$$\sum_{j \in G} x_{i,j} = 1 \quad \text{para todo } i \quad (41)$$

$$\sum_{j \in F} x_{i,j} = 1 \quad \text{para todo } j \quad (42)$$

$$x_{i,j} \in \{0,1\} \quad \text{para todo } i \text{ y } j$$

Las restricciones (41) y (42) aseguran que cada vuelo se asigna a sólo una puerta de embarque y cada puerta se asigna exactamente a un vuelo.

En casos especiales si hay más puertas de embarque que vuelos próximos a llegar, entonces la restricción (42) se convierte en:

$$\sum_{i \in F} x_{i,j} \leq 1 \quad \text{para todo } j$$



La desigualdad anterior denota que una puerta de embarque puede ser asignado a un vuelo que llega tomando un valor de 1 o no será asignado a un vuelo en absoluto, cuando esta toma un valor de cero.

Si, por otro lado, hay más vuelos que llegan a la terminal, que puertas matemáticamente se puede escribir una desigualdad para la restricción (41) similar al caso especial anterior. Sin embargo, no será realista. Cada vuelo debe aterrizar y ser alojado en una puerta. Si no hay puertas disponibles para un vuelo que llega, como a veces sucede en aeropuertos de mucho tráfico, el avión tiene que esperar en la rampa o calle de rodaje hasta que se disponga de una puerta.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se estudiaron los tipos de problemas pertenecientes al problema del transporte aéreo que se han desarrollado a nivel mundial y los subproblemas asociados a este, el transporte aéreo nacional y su comportamiento, encontrando como base del estudio tres grandes macroproblemas los cuales son la planificación de la optimización, operaciones y optimización de despacho, complejidades computacionales y simulación.

Desde la óptica de la matemática se puede inferir que los modelos que se estudian tienen un gran contenido estocástico que generan que los problemas tengan una gran cantidad de variables asociadas al igual que su número de restricciones, estos son dinámicos en su gran mayoría y muchos de ellos tienen múltiples objetivos en el desarrollo del modelo ya que en algunas ocasiones se pretende maximizar y minimizar situaciones para darle una respuesta satisfactoria a los problemas enfrentados por las aerolíneas en el desarrollo de las operaciones.

Se identificó que gran parte de los subproblemas asociados al problema del transporte aéreo se tratan como modelos de redes de diferentes tipos como time space network, multi commodity network, modelos de programación lineal y programación lineal entera, se hace mucho énfasis en las notaciones binarias en las tomas de decisiones ya que muchos de estos subproblemas involucran una asignación determinada.

Dentro de la revisión del estado del arte del problema del transporte aéreo se encontró que existen múltiples investigaciones desarrolladas en instancias reales del problema las cuales han sido puestas en marcha por las compañías aéreas para la reducción de costos y generar al mismo tiempo operaciones aéreas más eficientes, pero las mismas son tan complejas que requieren de software avanzados por computadora para tener resultados satisfactorios en algunas ocasiones sin conocer los óptimos sino que se aproximan a posibles soluciones factibles. Los resultados en la investigación de operaciones comenzaron a evolucionar con el desarrollo de la ciencia de la computación a finales de los años 80 y comienzos de los 90 esta evolución logro que se adicionaran como se mencionaba anteriormente un gran número de variables y restricciones que facilitaron la resolución de problemas.

Se encontró que los modelos aplicados mundialmente por los investigadores y las grandes compañías aéreas para resolver el problema del transporte aéreo son totalmente adaptables al transporte aéreo nacional y de hecho las tres principales

aerolíneas del país usan grandes paquetes de software computarizados para afrontar los problemas operacionales en los que se ven inmersos cada día. A pesar del conocimiento de dichas técnicas a nivel mundial, a nivel nacional no se tienen estudios relacionados con los problemas del transporte aéreo en investigación de operaciones ya que los referentes al tema tratan en su gran mayoría de cifras estadísticas de movimiento e incremento de volumen de pasajeros y de las infraestructuras en el sistema aéreo.

Al revisar la bibliografía Bazargan expone de forma muy adecuada los procesos que se ven implícitos en el problema del transporte aéreo haciendo una descripción específica de cada uno de ellos y evidencia como los estudios de investigación de operaciones asociados al transporte aéreo son de gran complejidad y tienen gran impacto en los países más desarrollados en donde los sistemas de transporte son estudiados ampliamente no solo por los entes privados sino también por los grupos de trabajo universitarios especializados en estos campos.

Los desafíos y obstáculos que enfrenta el sector aeronáutico con los problemas de transporte aéreo son tales como el incremento considerado a nivel mundial de la demanda de este importante medio de transporte, satisfacer a los viajeros con rutas más directas sin menos esperas en tiempos razonables con el cumplimiento de los itinerarios, optimizar el espacio que se tiene para las operaciones tanto en tierra como en el aire ya que debido a la gran demanda los cielos están saturados y los aeropuertos congestionados haciendo que las operaciones sean más riesgosas pero en ningún momento inseguras. Afrontar la situación económica global ya que a pesar de la demanda que se tiene el negocio del transporte aéreo es muy costoso por las connotaciones tecnológicas que se emplean y los costos operacionales de las compañías son muy altos; debido a esto se dice que el más apto es el que perdura en este negocio y esa perdurabilidad se está logrando hoy en día con alianzas estratégicas entre las compañías aéreas para apalancar las compañías diversificar mercados y atender la demanda creciente siempre en busca de una reducción de costos de operación que optimice las utilidades sin afectar las operaciones.

Se identifica que las infraestructuras son un factor de preocupación principalmente en el ámbito nacional ya que en comparación con los grandes aeropuertos mundiales los nacionales están muy atrasados y sus esquemas de operación se quedaron en el pasado, la falta de previsión tanto en tráfico como en las nuevas aeronaves más tecnológicas, con mayor envergadura hacen que la congestión en tierra sea un caos total.

El modelo de operación de las compañías que operan en el país es otro de los factores que tiene en dificultades las operaciones en Colombia ya que las tres principales aerolíneas sirven el modelo de hubs o centros de conexiones, siendo su centro de conexión la ciudad de Bogotá, este inconveniente adicionado al de la infraestructura generan alta congestión y operaciones más complejas, finalmente se adhieren al problema las aerolíneas regionales que sirven el modelo de spoke pero que a su vez cumplen itinerarios en la misma ciudad en donde se presentan los inconvenientes operacionales.

Se determinó que los mayores problemas asociados son las operaciones irregulares en el transporte aéreo ya que estas están compuestas por procesos estocásticos que alteran considerablemente los itinerarios de las aerolíneas, entre estas operaciones se mencionan los problemas técnicos de las aeronaves, por tripulación de aeronaves y finalmente por factores climatológicos que son de difícil manejo y de alta complejidad para las compañías aéreas ya que este puede entorpecer la operación en su totalidad.

Otros problemas son el manejo de los precios de los combustibles por su gran variación a través del tiempo siendo este el primer de los costos operacionales a ser controlado por las compañías aéreas, las nuevas tecnologías están enfocadas en los biocombustibles no solo para la reducción de costos sino también para el mejor manejo ambiental con la reducción de emisión de gases contaminantes. Los grandes fabricantes de aeronaves también desarrollan motores más eficientes con más bajo consumo de combustible y modelos de aeronaves más livianas para optimizar el consumo y disminuir el ruido un factor que aqueja a los habitantes que viven en zonas aledañas a las terminales aéreas.

Trabajos futuros propuestos en esta investigación.

Este trabajo representa una base importante para el desarrollo de investigaciones futuras en el problema del transporte aéreo, sirve de base para tener en cuenta los métodos más usados y una clasificación de autores importantes que implementan métodos de solución heurísticos y más avanzados como el caso de la metaheurísticas, que permitan mejorar los problemas del transporte aéreo.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BAZARGAN MASSOUD. Airline Operations and Scheduling. Embry-Riddle Aeronautical University, USA. Ed 2. pp. 1. (2010).
- [2] BAZARGAN MASSOUD. Airline Operations and Scheduling. Embry-Riddle Aeronautical University, USA. Ed 2. pp. 1. (2010).
- [3] BAZARGAN MASSOUD. Airline Operations and Scheduling. Embry-Riddle Aeronautical University, USA. Ed 2. pp. 1. (2010).
- [4] YU, Gang. Operations Research in the Airline Industry. Department of Management Science and Information Systems, Graduate School of Business and Center for Management of Operations and Logistics. The University of Texas at Austin, USA. pp 0 (1998).
- [5] BAZARGAN MASSOUD. Airline Operations and Scheduling. Embry-Riddle Aeronautical University, USA. Ed 2. pp. 3-4. (2010).
- [6] Delliehausen, H.W. (2009) Personal communication, August 2009.
- [7] Menkes H. L. van den Briel, J. René Villalobos, Gary L. Hogg, Tim Lindemann, Anthony V. Mulé. America West Airlines Develops Efficient Boarding Strategies, Interfaces Vol. 35, No. 3, May–June 2005, pp. 191–201
- [8] STEINER, Albert. PHILIPP, Michel. Speeding up the airplane boarding process by using preboarding areas. School of Engineering Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften Rosenstrasse 3, 8400 Winterthur Switzerland (September 2009).
- [9] BACHMAT, Eitan. BEREND, Daniel. SAPIR, Luba. SKIENA, Steven. STOLYAROV, Natan. Analysis of Airplane Boarding Times.
- [10] BAZARGAN MASSOUD. Airline Operations and Scheduling. Embry-Riddle Aeronautical University, USA. Ed 2. pp. 183-184. (2010).
- [11] MICHEL GAMACHE, FRANC, OIS DOUMIS, AND GÉRALD MARQUIS “A column generation approach for large-scale aircrew rostering problems”, Gerad and École Polytechnique, Montréal, Canada,(1998)

[12] BUTCHERS E. Rod, DAY R. Paul, GOLDIE P. Andrew, MILLER Stephen, MEYER A. Jeff, RYAN M. Ryan, SCOTT C. Amanda, WALLACE A. Chris. "Optimized Crew Scheduling at Air New Zealand", INTERFACES 31: (pp. 30–56) 1 January–February 2001

[13] BAZARGAN MASSOUD. Airline Operations and Scheduling. Embry-Riddle Aeronautical University, USA. Ed 2. pp. 84-85. (2010).

[14] ÖZDEMİR Ugur. "Methodology For Crew-Pairing Problem in airline Crew Scheduling", B.S., Computer Science Engineering, Marmara University, pp 2004

[15] BALAJI Gopalakrishnan, ELLIS L. Johnson. Airline Crew Scheduling: State-of-the-Art, Annals of Operations Research 140, pp. 305–337. (2005)

[16] M.C. Bartholomew-Biggs, S.C. Parkhurst and S.P. Wilson. "Global Optimization Approaches to an Aircraft Routing Problem" pp 1-2.

[17] BAZARGAN MASSOUD. Airline Operations and Scheduling. Embry-Riddle Aeronautical University, USA. Ed 2. pp. 7. (2010).

[18] BAZARGAN MASSOUD. Airline Operations and Scheduling. Embry-Riddle Aeronautical University, USA. Ed 2. pp. 8. (2010).

[19] Grandeau, S., Clarke, M., and Mathaisel, D. (1998). Operations Research in the Airline Industry, edited by Gang Yu. Kluwer International Series, 312–36.

[20] ETSCHAMAIER, MAXIMILIAN M. AND MATHAISEL, D. Airline scheduling: An overview. Transportation Science, 9 (2), 127–38. (1985)

[21] BAZARGAN MASSOUD. Airline Operations and Scheduling. Embry-Riddle Aeronautical University, USA. Ed 2. pp. 31. (2010).

[22] RADNOTI, G. Profit Strategies for Air Transportation. Aviation Week Books, New York: McGraw-Hill, pp. 297–324. (2002)

[23] BAZARGAN MASSOUD. Airline Operations and Scheduling. Embry-Riddle Aeronautical University, USA. Ed 2. pp. 31. (2010).

[24] BAZARGAN MASSOUD. Airline Operations and Scheduling. Embry-Riddle Aeronautical University, USA. Ed 2. pp. 35. (2010).

- [25] GORAN STOJKOVI, FRANCOIS SOUMIS, JACQUES DESROSIERS, MARIUS M.SOLOMON. An optimization model for a real-time flight scheduling problem. *Transportation Research Part A* 36. pp. 779–782 (2002)
- [26] DOBSON GREGORY, LEDERER PHILLIP J. Airlines Scheduling and Roting in a Hub-and-Spoke System. University of Rochester NewYork. *Transportation Science* Vol 27, No 3. pp 281-290. August (1993)
- [27] CHENG-LUNG WU, ROBERT E. CAVES. Flight Schedule Punctuality Control and Management: A Stochastic Approach. *Transportation Planning and Technology* Vol. 26, No. 4, pp 313-318. Agust (2003)
- [28] JULIA L. HIGLE, ANNE E. C. JOHNSON. Flight Schedule Planning with Maintenance Considerations . The University of Arizona Tucson, (2005)
- [29] ABARA, J. . Applying integer linear programming to the fleet assignment problem. *Interfaces*, 19 (4), 20–28.(1989)
- [30] Yu, G. and Thengvall, B. Airline optimization, in *Handbook of Applied Optimization*. Resende. New York: Oxford University Press. (1999)
- [31]BAZARGAN MASSOUD. Airline Operations and Scheduling. Embry-Riddle Aeronautical University, USA. Ed 2. pp. 45-47. (2010).
- [32] SHERALI HANIF D, BISH EBRU K. ZHU XIAOMEI. Airline Fleet assignment concepts, models, and algorithms. *European Journal of Operational Research* 172 pp 1-5 (2006)
- [33] SURAMANIAN RADHIKA, SCHEFF RICHARD P JR, QUILLINAN JOHN D, WIPER STEVE, MARSTEN ROY E. Coldstart: Fleet Assignment at Delta Airlines. *Transportation-Air Programming Interfaces* 24. pp. 104-120 (1994)
- [34] AHUJA RAVINDRA K., GOODSTEIN JON, MUKHERJEE AMIT, ORLIN JAMES B., SHARMA DUSHYANT. A Very Large-Scale Neighborhood Search Algorithm For the Combined Through and Fleet Assignment Model. pp. 3-10 (2001)
- [35] ANTOINE NICOLAS E., BIENIASWSKI STEFAN R., KROO ILAN M., WOLPERT DAVID H. Fleet Assignment Using Collective Intelligence. (2004)
- [36] BAZARGAN MASSOUD. Airline Operations and Scheduling. Embry-Riddle Aeronautical University, USA. Ed 2. pp. 45-47. (2010).

- [37] MARLA LVANYA, BARNHART CYNTHIA, Robust Optimization: Lessons Learned from Aircraft Routing. pp 3-10 (2010)
- [38] SUAIBATUL ASLAMIAH, SITI R.SIMAMORA,TAN KIM HEK,NOVIN M.SARINA, EDI L.HARAHAP,MALEM KARINA, Integer programming model for operational aircraft maintenance routing problem with side constraints, Proceedings of the 6th IMT-GT Conference on Mathematics, Statistics and its Applications (ICMSA2010) Universiti Tunku Abdul Rahman, Kuala Lumpur, Malaysia. pp 678-685 (2010)
- [39] BAZARGAN MASSOUD. Airline Operations and Scheduling. Embry-Riddle Aeronautical University, USA. Ed 2. pp. 83. (2010).
- [40] BUTCHERS E. ROD, DAY PAUL R., GOLDIE ANDREW P., MILLER STEPHEN., MEYER JEFF A., RYAN DAVID M., SCOTT AMANDA C., Optimized Crew Scheduling at Air New Zealand, INTERFACES 31: 1 (pp. 30–56) January–February 2001
- [41] RASMUSSEN MATIAS, LUSBY RICHARD, RYANZ DAVID, LARSEN JESPER, Subsequence Generation for the Airline Crew Pairing Problem, DTU Management Engineering Report 9 pp. 3-10 (2011)
- [42] THIEL MARKUS P., Team-oriented Airline Crew Scheduling and Rostering: Problem Description, Solution Approaches, and Decision Support, Faculty of Business Administration and Economics at the University of Paderborn, Germany, pp. 30-35 (2005)
- [43] Yu.G., Industrial Applications of Combinatorial Optimization. Kluwer Academics Publishers. (1998)
- [44] Brusco, M.J. and Jacobs, L.W., Personnel tour scheduling when startingtime restrictions are present., Management Science, 44 (4), 534–47 (2008)
- [45] RONG AIYING, GRUNOW MARTIN, Manpower Planning at air Cargo Terminals, Proceedings of the 9th Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference, pp. 666-673 (2008)
- [46] BAZARGAN MASSOUD. Airline Operations and Scheduling. Embry-Riddle Aeronautical University, USA. Ed 2. pp. 103-105. (2010).
- [47] Brusco, M.J., Jacobs, L.W., Bongiorno, R.J., Lyons, D.V., and Tang, B. Improving personnel scheduling at airline stations. Operations Research, 43 (5), 741-51. (1995).



[48] BAZARGAN MASSOUD. Airline Operations and Scheduling. Embry-Riddle Aeronautical University, USA. Ed 2. pp. 114-116. (2010).

[49] VONECHE FREDERIC, Yield Management In The Airline Industry, pp 2-6 (2005)

[50] MINHO CHO, MING FAN, YONG-PIN ZHOU, An Empirical Study of Revenue Management Practices in the Airline Industry, (2007)

[51] PAK KEVIN, PIERSMA NANDA, Airline Revenue Management An Overview Of Or Techniques 1982-2001, ERIM REPORT SERIES RESEARCH IN MANAGEMENT, pp 3-20 (2002)

[52] CÔTÉ JEAN-PHILIPPE, MARCOTTE PATRICE, SAVARD GILLES, A Bilevel Modelling Approach to Pricing and Fare Optimization in the Airline Industry, Journal of Revenue & Pricing Management Vol. 2 Issue 1, p23 April (2003)

[53] BAZARGAN MASSOUD. Airline Operations and Scheduling. Embry-Riddle Aeronautical University, USA. Ed 2. pp. 114-116. (2010).

[54] QUEROSENO, In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved April 21 (2013) from <http://es.wikipedia.org/wiki/Queroseno>

[55] BAZARGAN MASSOUD. Airline Operations and Scheduling. Embry-Riddle Aeronautical University, USA. Ed 2. pp. 139-141. (2010).

[56] VEDANT SINGH, SOMESH KUMAR SHARMA, S. VAIBHAV, Modeling the Civil Aircraft Operations for the Optimization of Fuel Consumption in Indian Air Transport Industry, Industrial Engineering Letters Vol 2, No.7, 2012

[57] PETER MORRELL and WILLIAM SWAN, Airline Jet Fuel Hedging: Theory and practice, Transports Reviews, Volume 26, Issue 6 pp. 713-725 (2006)

[58] ZOUEIN, P.P., ABILLAMA, W.R., TOHME E., A multiple period capacitated inventory model for airline fuel management: A case study, Journal of the Operational Research Society, 53, pp. 379–386. (2002)

[59] BAZARGAN MASSOUD. Airline Operations and Scheduling. Embry-Riddle Aeronautical University, USA. Ed 2. pp. 155-156. (2010).

[60] BALL MICHAEL, BARNHART CYNTHIA, NEMHAUSER GEORGE, ODONI AMEDEO, Air Transportation: Irregular Operations and Control,

- [61] ARGUELLO, M., BARD J.F., AND YU G, Models and methods for managing airline irregular operations, *Operations Research in the Airline Industry*, edited by G. Yu. Boston: Kluwer Academic Publishers, pp. 1–45. (1998)
- [62] MICHAEL DUDLEY DELANO CLARKE, Irregular airline operations: a review of the state-of-the-practice in airline operations control centers, *Journal of Air Transport Management*, pp. 67-76 (1998)
- [63] CHENDONG LI, Airport Gate Assignment—A Hybrid Model and Implementation, pp. 2-3 (2005)
- [64] Gu, Y. and Chung, C.A, Genetic algorithm approach to aircraft gate reassignment problem. *Journal of Transportation Engineering*, September/October, pp. 384–89. (1999)
- [65] BOLAT, A. Procedures for providing robust gate assignments for arriving aircrafts. *European Journal of Operational Research*, 120, pp. 63–80 (2000)
- [66] CHENDONG LI, Airport Gate Assignment—A Hybrid Model and Implementation, pp. 2 (2005)
- [67] BABIC, O., TEODOROVIC, D., AND TOSIC. V. Aircraft stand assignment to minimize walking. *Journal of Transportation Engineering* 110(1): pp.55–66. (1984)
- [68] BIHR, R. A conceptual solution to the aircraft gate assignment problem using, 0, 1 linear programming, *Computers and Industrial Engineering* (19): pp. 280–284. (1990)
- [69] GU, Y. AND CHUNG, C. Genetic algorithm approach to aircraft gate reassignment problem. *Journal of Transportation Engineering* (125) pp. 384–389. (1999)
- [70] XU, J. AND BAILEY, G. The airport gate assignment problem: mathematical model and a tabu search algorithm. *In Proceedings of the 34<sup>th</sup> Hawaii International Conference on System Sciences* (3): 10-19. (2001)
- [71] H. DING, A. LIM, B. RODRIGUES, Y. ZHU Aircraft and Gate Scheduling Optimization at Airports. *Proceedings of the 37th Hawaii International Conference on System Sciences*. pp. (2004)
- [72] SOI-HOI LAM, JIA-MENG CAO AND HENRY FAN. Development Of An Intelligent Agent For Airport Gate Assignment, *Journal of Air Transportation* Vol. 7, No. 2 – pp. (2002)

- [73] V. PREM KUMAR, M. B. PRADEEP KUMAR, MICHEL BIERLAIRE. Multi-Objective Airport Gate Assignment Problem, 11<sup>th</sup> Swiss Transport Research Conference. pp. (2011)
- [74] BAZARGAN MASSOUD. Airline Operations and Scheduling. Embry-Riddle Aeronautical University, USA. Ed 2. pp. 185. (2010).
- [75] Tomado de:  
[http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr\\_4\\_08/article\\_04\\_2.html](http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_08/article_04_2.html)
- [76] ] BAZARGAN MASSOUD. Airline Operations and Scheduling. Embry-Riddle Aeronautical University, USA. Ed 2. pp. 206. (2010).
- [77] DASKIN, M. *Network Discrete Location*. Wiley. (1995)
- [78] BAZARGAN MASSOUD, GUPTA LARI PAYAL, YOUNG SETH. A Simulation Approach To Manpower Planning, Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, pp. 1-9 (2003)
- [79] LAM MICHAEL. An Introduction to Airline Maintenance. The Handbook of Airline Economics, pp. 397- 406. (1995)
- [80] CHUN NICK AND HO GEORGE. Using Integer Programming for Airport Service Planning in Staff Scheduling, International Journal of Engineering Business Management, Vol. 2, No. 2, pp. 85-92 (2010)
- [81] MASON, A.J. & RYAN, D.M. & PANTON, D.M. "Integrated Simulation, Heuristic and Optimization Approaches to Staff Scheduling". Operations Research.46 (2). (1998)
- [82] AB OUL SYLLA . Operations Research in the Airline Industry Research Group Sabre, Inc pp. 60-61 June( 2000)
- [83] CHELLAPPAN SRIRAM, ALI HAGHANI. An optimization model for aircraft maintenance scheduling and re-assignment, Transportation Research Part A 37 pp.29–48 (2003)
- [84] CLARKE, L.W., JOHNSON, E.L., NEMHAUSER, G.L., ZHU, Z. The aircraft rotation problem. Annals of Operations Research 69, pp. 33–46. (1997)
- [85] BAZARGAN MASSOUD. Airline Operations and Scheduling. Embry-Riddle Aeronautical University, USA. Ed 2. pp. 238. (2010).

[86] ANDREAS VON PUTTKAMER, JÜRGEN OHRNER. EFM Aircraft Towing Plan at Munich Airport, Enteisen und Flugzeugschleppen am Flughafen München, pp. 1-2 (2005)

[87] Tomado de: <http://www.mcamglobal.com/index.php?pageLoad=142>

[88] BAZARGAN MASSOUD. Airline Operations and Scheduling. Embry-Riddle Aeronautical University, USA. Ed 2. pp. 238-239. (2010).

[89] Wells, A. T. Airport Planning and Management. 4th Edition. New York:McGraw-Hill. (2000)

[90] JE Beasley, J Sonander , P Havelock . Scheduling aircraft landings at London Heathrow using a population heuristic. Journal of the Operational Research Society 52, pp. 483 – 493 (2001)

[91] KIM AMY, HANSEN MARK. Validation of Runway Capacity Models. Eighth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM) pp. 1-9(2009)

[92] BRUNO MILLER , KENNETH MINOGUE, JOHN-PAUL CLARKE. Constraints in aviation infrastructure and surface aircraft emissions. pp. 1-15 (2007)

[93] Tomado de: [http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto\\_invernadero](http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_invernadero)

[94] CARSON SCOT, Aviation and the Environment: Our Commitment to a Better Future, Boeing Aeromagazine, pp. 1-- 2 (2013)

[95] Engine noise reduction programme Making aircraft engines better neighbours, Fast 37 Airbus Technical Magazine pp. 19-22 (2005)

[96] CARSON SCOT, Aviation and the Environment: Our Commitment to a Better Future, Boeing Aeromagazine, pp. 3 - 15 (2013)

[97] JAMES KINDER, Leading the Way to a biofueled Future, Boeing Aeromagazine, pp. 6-10 (2013)

[98] N J S BURTON, Methods Of Assessment Of Aircraft Noise, London South Bank University Department of Engineering Systems, pp. 2 -10 (2004)

[99] GLOVER FRED. “Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence”, Computers and Operations Research 5, 553-549.(1986)

- [100] OSMAN I.H. KELLY J.P, Meta-Heuristics: Theory and Applications, Ed. Kluwer Academics, Boston.(1996)
- [101] C.R. REEVES, editor. Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems. Black - well Scientific Publishing, Oxford, UK,, 1993.
- [102] CAPRARA, A., MONACI, M. On the two-dimensional Knapsack *problem*. Operations Research Letters 32, 5–14. Operations (2004)
- [103] S. KIRKPATRICK, C. GELATT, AND M. VECCHI. Optimization by SimulatedAnnealing. Science, 220(4598): pp.671- 680, (1983).
- [104] F. GLOVER. Future Paths for Integer Programming and Links to Arti\_cialIntelligence. Computers & Operations Research, 13:533\_549, (1986).
- [105] TAILLARD E. Robust taboo search for the quadratic assignment problem. Parallel Computing, 17(4-5): pag 443–455.(1991).
- [106] GLOVER F., KOCHENBERG G.A. Handbook of Metaheuristics. Kluwer Acade-mic Publishers, London.(2003)
- [107] T. FEO AND M. RESENDE. Greedy Randomized Adaptive Search Procedures. Journal of Global Optmization, 6:109 - 133, (1999)
- [108] N. MLADENOVIC AND P. HANSEN. Variable Neighborhood Search. Computers Oper. Res, 24:1097\_1100, (1997).
- [109] T. STÜTZLE. LOCAL Search Algorithms for Combinatorial Problems Analysis, Algorithms and New Applications. Technical report, DISKI Dissertationenzur Künstliken Intelligenz. Sankt Augustin, Germany, (1999).
- [110] T. BÄCK, D. FOGEL, Z. MICHALEWICZ. Handbook of Evolutionary Computation. IOP Publishing and Oxford University Press, New York and Bristol(UK), Feb (1997).
- [111] MÜHLENBEIN H. , PAAFI G., From recombination of genes to the estimation of distributions I. Binary parameters. In PPSN IV: Proceedings of the 4th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature, pages 178–187, London, UK, Springer-Verlag. (1996).
- [112] BULLNHEIMER B. ,HARTL R. ,STRAUSS C. , 1999, A new rank-based version of the ant system: a computational study. Central European Journal for Operations Research and Economics, 7(1), pp. 25–38 (1999)

- [113] J. KENNEDY, R. EBERHART, Y. SHI. SWARM Intelligence. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, (2001).
- [114] F. GLOVER AND G. KOCHENBERGER. Handbook of Metaheuristics. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, (2002).
- [115] F. GLOVER. Heuristics for Integer Programming Using Surrogate Constraints. *Decision Sciences*, 8: pp.156-166, (1977).
- [116] M. DORIGO. Optimization, Learning and Natural Algorithms. PhD thesis, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, 1992.
- [117] BAZARGAN MASSOUD. Airline Operations and Scheduling. Embry-Riddle Aeronautical University, USA. Ed 2. pp. 35-36. (2010).
- [118] HANE, C.A., BARNHART, C., JOHNSON, E.L., MARSTEN, R.E., NEMHAUSER, G.L., SIGISMONDI, G. The fleet assignment problem: Solving a large-scale integer program. *Mathematical Programming*, 70, pp. 211–32. (1995)
- [119] BAZARGAN MASSOUD. Airline Operations and Scheduling. Embry-Riddle Aeronautical University, USA. Ed 2. pp. 45. (2010).
- [120] KABBANI, N. (1992). Aircraft Routing At American Airlines. Presented At Agifors, October pp. 4–9, (1992).
- [121] JARRAH, A.I. AND STREHLER, J.C. An optimization model for assigning through flights. *IIE Transaction*, 32, pp. 237–44.(2000)
- [122] Armacost, A., Barnhart, C., and Ware, K. (2002). Composite variable formulations for express shipment service network design. *Transportation Science*, 36 (1), 1–20. (2002)
- [123] BARNHART, C., JOHNSON, E., NEMHAUSER, G.L., AND VANCE, P.H. (1997). Airline crew scheduling: A new formulation and decomposition algorithm. *Operations Research*, 45 (2), pp.188–200.(1997)
- [124] THIEL MARKUS. Team Oriented Airline Crew Scheduling and Rostering: Problem Description, Solution Approaches and Decision Support. University of Paderborn, Germany. pp. 25-26 (2005)
- [125] BRUSCO, M.J., JACOBS, L.W., BONGIORNO, R.J., LYONS, D.V., AND TANG, B. Improving personnel scheduling at airline stations. *Operations Research*, 43 (5), pp. 741-51. (1995)

- [126] ZOUEIN, P.P., ABILLAMA, W.R., AND TOHME, E. A multiple period capacitated inventory model for airline fuel management: A case study. *Journal of the Operational Research Society*, 53, pp. 379–86.(2002)
- [127] BIHR, R.A. A conceptual solution to the aircraft gate assignment problem using 0,1 linear programming. *Computers Ind. Engng*, 19 (1–4), pp. 280–84. (1990)
- [128] Tomado de: <http://www.portafolio.co/especiales/aeropuerto-eldorado/colombia-un-siglo-volando-y-conectando-al-pais>
- [129] Tomado de: [http://es.wikipedia.org/wiki/Transporte\\_en\\_Colombia#Transporte\\_a.C3.A9reo](http://es.wikipedia.org/wiki/Transporte_en_Colombia#Transporte_a.C3.A9reo)
- [130] Tomado de: <http://www.elcolombiano.com>
- [131] Tomado de [http://www.semana.com/upload/images/2013/3/7/336053\\_203644\\_1.jpg](http://www.semana.com/upload/images/2013/3/7/336053_203644_1.jpg)
- [132] MAURICIO OLIVERA PILAR CABRERA WENDY BERMÚDEZ ADRIANA HERNÁNDEZ. El Impacto Del Transporte Aéreo En La Economía Colombiana Y Las Políticas Públicas. pp. 1-3 (2011)
- [133] MAURICIO OLIVERA PILAR CABRERA WENDY BERMÚDEZ ADRIANA HERNÁNDEZ. El Impacto Del Transporte Aéreo En La Economía Colombiana Y Las Políticas Públicas. pp. 54-56 (2011)
- [134] MAURICIO OLIVERA PILAR CABRERA WENDY BERMÚDEZ ADRIANA HERNÁNDEZ. El Impacto Del Transporte Aéreo En La Economía Colombiana Y Las Políticas Públicas. pp. 75-76 (2011)
- [135] MUMAYIZ, S. A. Airport modeling and simulation: An overview, in *Airport Modeling and Simulation: Conference Proceedings*, edited by S. A. Mumayiz and P. Schonfeld. August 17–20, 1997, Key Bridge Marriot Hotel, Arlington, Virginia. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 1–7. (1997)
- [136] Ashford, N. and Wright, P. H. *Airport Engineering*. 3rd Edition. New York: Wiley. (1992).

[137] Reynolds-Feighan, A.J. and Button, K.J. (1999). An assessment of the capacity and congestion levels at European airports. *Journal of Air Transport Management*,5, pp. 113–34. (1999).

[138] Odoni, A. R. and E. Roth, "An Empirical Investigation of the Transient Behavior of Stationary Queueing Systems," *Oper. Res.*, 31,pp. 432-55.(1983)

[139] MARKUS P. THIEL, "Team-oriented airline Crew Scheduling and Rostering Problem Description, Solution approaches, and Decision Support", Doctoral Thesis, Universität Paderborn, pp 7-9, Paderborn (2005).