

0673

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



MANU T
I & P A

UNA APLICACION DE LA INVESTIGACION DE OPERACIONES
EN SISTEMAS AEROPORTUARIOS

MAESTRÍA EN INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

MAYO, 1981

DAVID JIMENEZ BARRON



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



DEPFI

TUNAM
1981
JIM

Vertical text on the left margin, possibly a stamp or reference code, including the number '004' at the top.

Faint horizontal text at the top right of the page.

Faint horizontal text below the logo.

Faint horizontal text below the main title.

Faint horizontal text in the middle section.

Faint horizontal text in the lower middle section.

Faint horizontal text near the bottom.

Faint horizontal text at the bottom of the page.

Faint horizontal text at the very bottom.

CONTENIDO

	Pag.
ANALISIS BIBLIOGRAFICO	1
I. INTRODUCCION.	4
1.1. Antecedentes.	4
1.2. El problema de asignación de turnos de aterrizaje de aeronaves en un aeropuerto.	5
1.3. Objetivo.	8
II. PLANTEAMIENTO DEL MODELO DE ASIGNACION DE TURNOS DE ATERRIZAJE DE AERONAVES.	9
2.1. Objetivo.	9
2.2. Descripción de los parámetros del modelo.	9
2.3. Representación gráfica del modelo de sucesión de aeronaves.	12
2.4. Estructura del modelo.	13
III. MODELO PARA LA ASIGNACION DE TURNOS DE ATERRIZAJE DE AERONAVES.	17
3.1. Objetivo	17
3.2. Bases utilizadas.	17

	Pag.
IV. FUNCION OBJETIVO.	21
4.1. Introducción.	21
4.2. Minimización del tiempo de estancia de los pasajeros en las aeronaves.	22
4.3. Minimización del consumo de combustible de las aeronaves.	22
V. CONCLUSIONES.	24
BIBLIOGRAFIA	26

ANALISIS BIBLIOGRAFICO

- RESUMEN

En este trabajo se describe una aplicación de la Investigación de Operaciones en el campo de los Sistemas Aeroportuarios. La aplicación consiste en la presentación de un modelo matemático orientado a contribuir en la solución del problema referente a la asignación de turnos de aterrizaje de aeronaves.

- TEMAS DE MAYOR IMPORTANCIA

El modelo que se presenta tiene como objetivo el de minimizar el tiempo en el que las aeronaves están en la cola de espera considerando el hecho de que no existen condiciones de prioridad para cualquiera de las aeronaves que vayan a descender.

- ORIGINAL Y NOVEDOSO DEL TRABAJO

El aspecto mas importante de este trabajo es la aportación que se puede brindar a la solución de problemas de la industria de la aviación por medio de la Investigación de Operaciones.

- ASPECTOS SOBRESALIENTES

El aspecto más importante de este trabajo es el relativo a la posibilidad de ser aplicado a un problema de la vida real. Su implementación podría brindar una serie de beneficios económicos a las aerolíneas, los aeropuertos y al país además del bienestar que se proporcionaría a los pasajeros.

- ENFOQUE

El enfoque bajo el cual se elaboró este trabajo está fundamentalmente orientado hacia la práctica, basándose desde luego en un análisis teórico del problema.

- NIVEL

El tema desarrollado en este trabajo puede ser utilizado como parte del material didáctico del programa de estudios de la Maestría en Investigación de Operaciones.

- TEMAS Y PROBLEMAS NO TRATADOS

En el presente trabajo no se atendió a la solución del problema desde el punto de vista "dinámico", es decir, que no se consideró la posibilidad de aceptar el ingreso de nuevas aeronaves durante el proceso de asignación de turnos de aterrizaje. Además, tampoco se

analizó el problema para el caso de que existieran dos pistas de aterrizaje.

- CONSIDERACIONES DE ESTE TRABAJO CON RESPECTO A OTROS REALIZADOS

Para la elaboración de este trabajo, se atendió a estudios realizados por diversas instituciones entre los que se pueden mencionar los del Flight Transportation Laboratory del M.I.T. (Massachusetts Institute of Technology).

- OTROS COMENTARIOS

En este trabajo únicamente se planteó un modelo matemático, quedando para posteriores estudios del tema, la elaboración de ejemplos.

CAPITULO I

INTRODUCCION

1.1 ANTECEDENTES

En la actualidad, la industria del transporte aéreo se ha convertido en una de las más importantes. Su participación ha contribuido en gran medida al desarrollo económico de un país al realizar, en tiempos muy reducidos y bajos costos, el traslado de personas y carga así como facilitar la comunicación entre zonas alejadas.

Para que la industria del transporte aéreo llegara a ser lo que es, fue necesario el planteamiento y solución de una serie de factores que de alguna manera u otra intervienen en la operación de los sistemas aeroportuarios. Estos sistemas se han ido sofisticando conforme lo han requerido las necesidades de servicios aeroportuarios debido fundamentalmente al dinamismo y altos costos que caracterizan a esta industria.

Entre los factores que determinan los sistemas aeroportuarios se encuentran:

- Localización de la terminal aeroportuaria.
- Características de la terminal aeroportuaria.

- Demanda de servicios en tierra del público y de las aeronaves.
- Número de operaciones de ascenso y descenso de aeronaves y su estacionalidad.
- Requerimiento de mantenimiento de aeronaves.
- Reservación de boletos
- Necesidades de crecimiento de la flota.

Los factores antes mencionados bien sea aislados o en conjunto sientan las bases para que las operaciones aeroportuarias resulten eficientes en tiempo y costo. Entre estos aspectos el relativo al manejo del número de operaciones de ascenso y descenso de aeronaves y su estacionalidad constituye un problema de gran importancia por las condiciones de seguridad y costo que involucra.

Dada la amplitud del problema en cuestión, el presente documento se enfocará a la presentación de un modelo matemático para el caso referente al descenso de aeronaves. Con este modelo se pretende contribuir de alguna manera a la optimización de las actividades aeroportuarias.

1.2 EL PROBLEMA DE ASIGNACION DE TURNOS DE ATERRIZAJE DE AERONAVES EN UN AEROPUERTO

Una de las actividades mas importantes que se realizan en un aeropuerto es la relativa al control de llegadas de aeronaves. Esta actividad consiste en la asignación de turnos de aterrizaje a cada una de las

aeronaves que se localicen dentro del área de influencia del aeropuerto, involucrando la decisión referente a qué aeronave debe aterrizar en una pista en particular, cuándo hacerlo y qué maniobras ejecutar para lograrlo.

Para la asignación de turnos, es necesario contemplar las condiciones que puede presentar en sí un aterrizaje como son: tipo de aeronaves, peso, velocidad y clima prevaleciente en el aeropuerto. Además, hay que tener presentes las condiciones que existen en dos aterrizajes sucesivos. Esto es, el aterrizaje de dos aviones de la misma categoría; tal es el caso de una secuencia de un avión grande y luego uno pequeño. Este último sufrirá los efectos de la turbulencia creada por los motores del primero por lo que, debido a razones de seguridad, será necesario que exista un determinado lapso entre cada avión.

Por lo tanto, la asignación de turnos de aterrizaje en una cola de espera, se traduce en la búsqueda de una estrategia que permita el descenso de aviones tan pronto como sea posible contemplando las características que presente cada aterrizaje.

Por otra parte, conforme se incrementa la demanda para utilización de pistas de aterrizaje, el procedimiento para la asignación de turnos tiende a ser mas complejo puesto que las aeronaves continuamente están entrando y saliendo del sistema. Durante períodos "pico", la demanda para utilización de pistas puede alcanzar o bien rebasar la capacidad del sistema motivando retrasos excesivos, disgusto de los pasajeros,

aumento en el consumo de combustible y la alteración de los itinerarios de las aerolíneas. Bajo estas condiciones puede lógicamente esperarse un aumento en los riesgos de colisión.

Actualmente, y debido a las restricciones de seguridad, el procedimiento seguido por la mayor parte de los aeropuertos del mundo, está basado en el criterio del que primero llega primero aterriza (FIFO). Esta estrategia contribuye en gran medida a la formación de colas de espera y en consecuencia a la ocurrencia de retrasos, debido a que ésta no aprovecha las características que prevalecen cuando ocurren dos aterrizajes sucesivos como son turbulencia, velocidad y distancia entre dos aeronaves. Si éstas siempre fueran iguales el procedimiento de asignación de turnos para cualquier avión sería el mismo y entonces no habría retrasos.

Dado que estas características no son iguales y debido a la variabilidad de los parámetros mencionados es necesario buscar un procedimiento de asignación de turnos de aterrizaje que permita el manejo de la cola de espera de una forma mucho más eficiente y que se traduzca en una serie de beneficios para las aerolíneas, los pasajeros y el aeropuerto.

En este trabajo se presenta un modelo matemático para la solución del problema descrito el cual se basa en estudios realizados por el Flight Transportation Laboratory del M.I.T. (Massachusetts Institute of Technology).

1.2 OBJETIVO

Como se mencionó anteriormente, el objetivo principal de este trabajo es la presentación de un modelo matemático que contribuya a la solución del problema de secuencia de aterrizajes de aviones en una cola de espera.

Para tal fin, se pretende aprovechar la semejanza de este problema con respecto al caso del agente viajero contemplando desde luego, las diferencias en cuanto a restricciones y función objetivo.

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL MODELO DE ASIGNACION DE TURNOS DE ATERRIZAJE DE AERONAVES

2.1 OBJETIVO

Este capítulo tiene por objeto presentar la descripción de los parámetros que intervienen en la formulación del modelo de asignación de turnos de aterrizaje de aeronaves.

A continuación se explica cada una de las partes que comprende este capítulo.

2.2 DESCRIPCION DE LOS PARAMETROS DEL MODELO

Supóngase que el controlador de tráfico aéreo se enfrenta al siguiente problema:

Un número determinado de aeronaves está en espera para aterrizar en un aeropuerto de una sola pista. Su trabajo consiste en encontrar una secuencia de aterrizajes para esas aeronaves de modo tal que una cierta medida de ejecución sea optimizada al mismo tiempo que todas las restricciones del problema sean satisfechas.

De acuerdo al planteamiento anterior, cabe hacer las siguientes

consideraciones:

1. Se supone que las aeronaves en cuestión están esperando para aterrizar. Esto significa que entonces están acomodadas de acuerdo a un determinado patrón y en espera de las instrucciones del controlador de tierra relativas al momento en el que deben iniciar sus maniobras de aterrizaje.
2. No se toman en cuenta las llegadas de nuevas aeronaves. En otras palabras, la tarea de asignación de turnos de aterrizaje terminará tan pronto como los aviones en espera hayan aterrizado. Bajo dicha hipótesis, esta versión del problema es conocida como "estática". La situación equivalente de la vida real es obviamente diferente ya que las aeronaves constantemente están llegando y añadiéndose a la cola de aterrizaje de una manera aleatoria. Esta versión del problema es llamada "dinámica" y no será considerada dentro de este documento.
3. El criterio de optimización utilizado en este modelo es el referente a Ultimo Tiempo de Aterrizaje (UTA) ya que con éste se busca minimizar el tiempo de aterrizaje de las aeronaves, esto es, se persigue encontrar una secuencia de aterrizajes tal que la ultima aeronave que aterrice lo haga tan pronto como sea posible.
4. Por lo que se refiere a restricciones, se requerirá la satisfacción de las relativas a tiempo mínimo de interarribos. Esto significa

que el intervalo de tiempo entre el aterrizaje de la aeronave i seguida por el aterrizaje de la aeronave j no deberá ser menor que un intervalo de tiempo establecido $t_{i,j}$.

5. Para el conteo del tiempo que tarda un avión en aterrizar, se supondrá que la cuenta de éste empezará con el aterrizaje de la aeronave cero ($t=0$). Dado que este avión ya aterrizó, éste no está incluido en la cola de aviones en espera de aterrizar y sólo tiene influencia sobre el siguiente avión que vaya a hacerlo. Por otro lado, el avión cero no será especificado ya que es con el que se inicia el procedimiento (el avión cero es falso, "dummy").
6. La composición del conjunto de aeronaves que están en espera de aterrizar, es conocida. Para cada par ordenado (i,j) de aeronaves, el intervalo mínimo de tiempo $t_{i,j}$ es también conocido así como el número de pasajeros en cada aeronave.
7. Por otra parte, en cualquier etapa del procedimiento de asignación de posiciones, el controlador de tráfico podrá contar con la suficiente libertad para asignar el siguiente turno de aterrizaje a cualquiera de las aeronaves sobrantes. Esto significa que inicialmente no habrá consideraciones de prioridad ignorándose la posición inicial que tienen esos aviones en el momento en el que llegan a la proximidad del área terminal.
8. Se supondrá que todas las aeronaves desean aterrizar tan pronto

como sea posible. Por lo tanto, no se permitirán "huecos" innecesarios en el empleo de la pista de aterrizaje.

En otras palabras, si la aeronave i es inmediatamente seguida por la aeronave j , el intervalo de tiempo entre estos dos aterrizajes sucesivos no tendrá por que ser más grande que $t_{i,j}$ pero si igual a $t_{i,j}$.

2.3 REPRESENTACION GRAFICA DEL MODELO DE SUCESION DE AERONAVES

El problema anterior puede describirse por medio de la figura 2.1. Los nodos de esta gráfica representan a los aeroplanos en el sistema. Un nodo especial representa el avión cero. El costo de ir del nodo i al nodo j esta representado por $t_{i,j}$.

El problema de asignación de turnos de aterrizaje viene a ser una secuencia de visitas a todos los nodos de la gráfica, exactamente a cada uno de ellos, empezando a partir del nodo del avión cero (nodo cero).

Es importante hacer notar que el problema, como se presenta no requiere un retorno al nodo inicial. En la figura 2.2 se presenta una secuencia factible de visitas, junto con el arco de regreso de costo cero.

Si se considera que el objeto principal del problema es el de

minimizar el último tiempo de aterrizaje, éste podría ser resuelto como un caso clásico del problema del agente viajero.

2.4 ESTRUCTURA DEL MODELO

Dado que se ha mencionado que el problema de asignación de turnos de aterrizaje se resolverá como un caso especial del agente viajero, pero tomando en cuenta su estructura, a continuación se describirá cual es ésta y como se pueden obtener ventajas de ella.

Una primera observación, es la relativa a que es posible clasificar a los aviones, que están en espera de aterrizaje, en un número relativamente pequeño de "categorías". Esta clasificación debe ser tal que todos los aviones pertenecientes a la misma categoría tengan las mismas o muy similares características en lo que se refiere a intervalos mínimos de tiempo y número de pasajeros.

Desde luego, es cierto que los parámetros señalados están sujetos a variaciones aleatorias, aún cuando se trate de dos aeronaves idénticas. Por ejemplo- el número de pasajeros en dos Boeing 727 será, en general, diferente. Lo mismo sucederá en cuanto a sus velocidades de aterrizaje, las cuales no sólo dependen de las condiciones del clima. Sin embargo, las fluctuaciones en las velocidades de aterrizaje, se traducen en variaciones relativas al intervalo de tiempo mínimo entre aterrizajes sucesivos. Por ello, es lógico suponer que en promedio 2 aviones similares cualesquiera

(como los dos Boeing 727 del ejemplo) presentarán parámetros con valores aproximadamente iguales. Este es el criterio bajo el cual se hizo la clasificación.

Por lo que se refiere a la cuestión relativa a la similitud entre aviones, en general, se acostumbra dividir a los diferentes tipos de aeronaves comerciales en las siguientes categorías (aunque pueden existir otras clasificaciones): jets de cabina ancha (B-747), jets de cabina media (B-727) y jets de cabina pequeña (DC-9).

En base a la clasificación antes mencionada, se identifica la ventaja siguiente:

El procedimiento de asignación de turnos de aterrizaje de aeronaves puede ser drásticamente reducida de tamaño. Por ejemplo, la gráfica de la figura 2.3(a) referente a un problema de 3 categorías puede ser reducida a una gráfica de 3 nodos, según se aprecia en la figura 2.3(b) y en lugar de visitar a cada uno de los nodos de la gráfica detallada existe la posibilidad equivalente de visitar cada nodo un número determinado de veces de acuerdo a la gráfica condensada.

Es importante aclarar que esto no significa que al utilizar la gráfica condensada sea necesario realizar visitas por todos los nodos de la primera categoría, y entonces moverse a la siguiente categoría y pasar por todos sus nodos y así sucesivamente. Esto quiere decir que se puede pasar por 2 categorías particulares alternativamente tantas

veces como sea necesario.

En esencia la gráfica condensada contiene toda la información de la gráfica completa, pero de una forma más eficiente. Entonces, en lugar de trabajar con una matriz muy grande de separación de tiempos, la matriz se reduce bastante para la gráfica condensada. En este último caso, cabe mencionar que los elementos de la diagonal principal no son iguales a infinito, sino a los tiempos mínimos de interarribo entre 2 aterrizajes sucesivos de aviones pertenecientes a la misma categoría. Esto significa que, en contraste a la gráfica completa, la condensada contiene "loops".

Tomando en cuenta las observaciones antes mencionadas y aplicándolas al problema particular de asignación de turnos de aterrizaje, éste puede ser redefinido de la forma siguiente:

Sea N el número de aviones que están en espera de aterrizar en un aeropuerto de una sola pista. Sea k_i el número inicial de aviones por categoría " i ". Finalmente, sea $t_{i,j}$ el tiempo mínimo permisible de interarribos que debe transcurrir entre el aterrizaje de un avión de la categoría " i " seguido por el aterrizaje de un avión de la categoría " j " y sea i_0 la categoría del avión que llega en el lugar cero ($t=0$).

Todas las variables señaladas son los parámetros de entrada en el problema de asignación de aterrizaje de aeronaves para el caso sin

restricciones.

La descripción del modelo matemático para la solución del problema detallado anteriormente, se presenta en el siguiente capítulo.

REPRESENTACION GRAFICA DEL PROBLEMA DE ASIGNACION DE
TURNOS DE ATERRIZAJE.

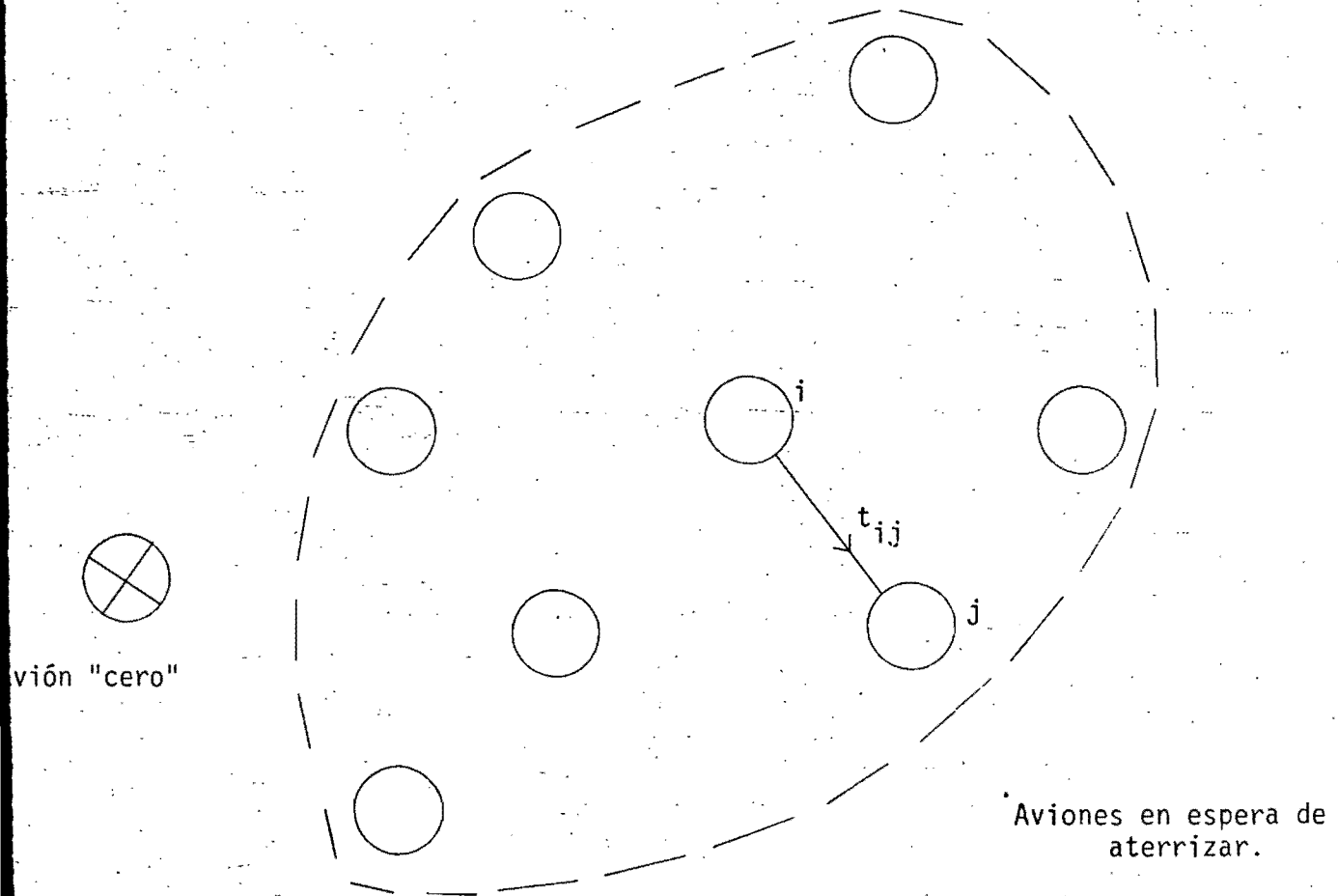


FIGURA 2.1

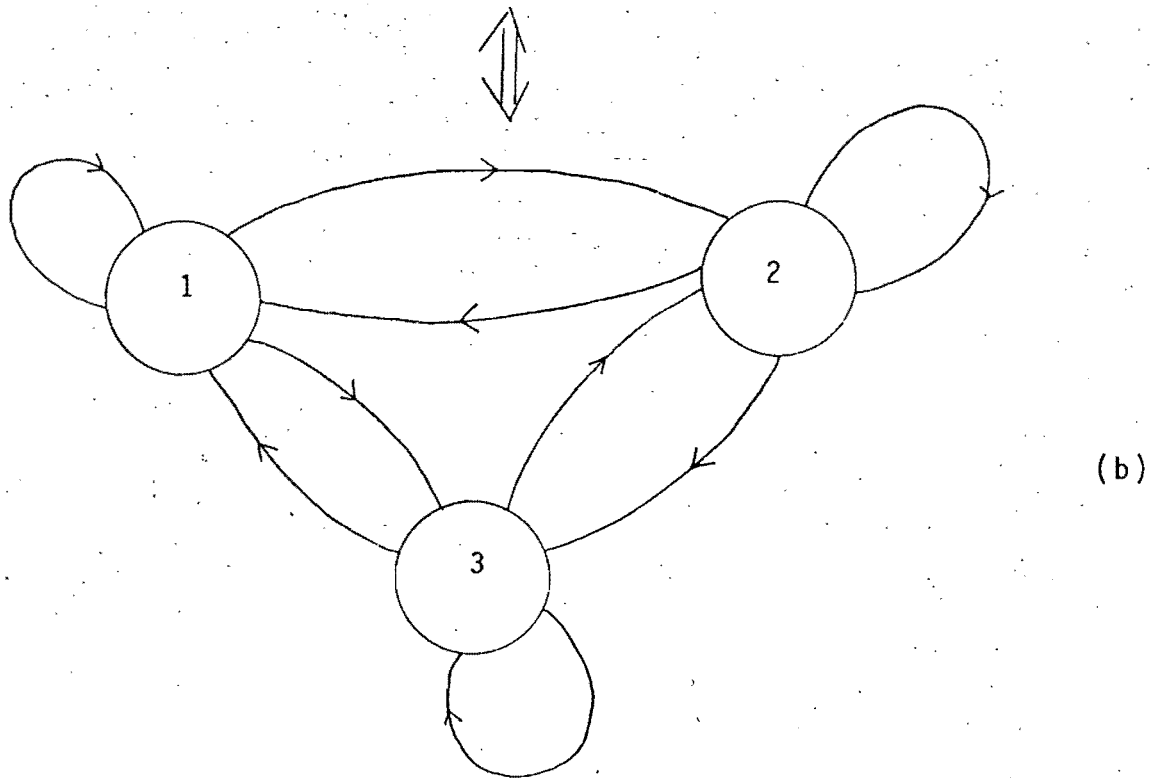
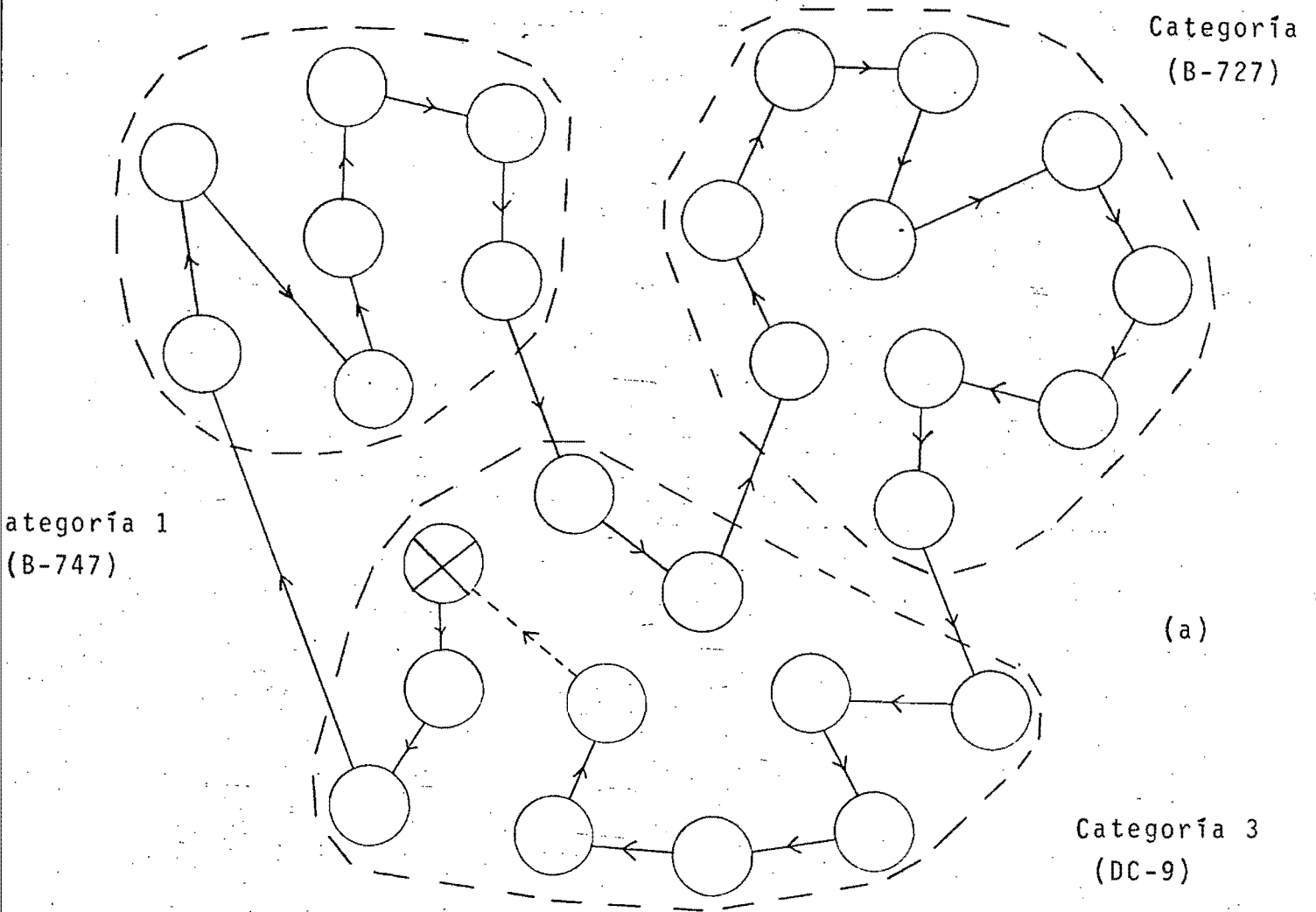


FIGURA 2.3

CAPITULO III

MODELO PARA LA ASIGNACION DE TURNOS DE ATERRIZAJE DE AERONAVES

3.1 OBJETIVO

En esta parte del trabajo se presenta el modelo para la asignación de turnos de aterrizaje de aeronaves en el cual se considera que el controlador de tráfico aéreo puede, en cualquier momento, asignar el siguiente turno de aterrizaje a cualesquiera de las aeronaves que se encuentren en la proximidad del área de influencia del aeropuerto.

La descripción del modelo aparece a continuación.

3.2 BASES UTILIZADAS

El modelo desarrollado para la asignación de turnos de aterrizaje de aeronaves aprovecha la similitud que en este caso existe con el problema del agente viajero. Para poder plantearlo como un problema de programación dinámica, es importante hacer las siguientes consideraciones:

3.2.1. ETAPAS DE ESTADO

Una etapa del problema corresponde al aterrizaje de una determinada categoría de aeronaves. Estando en cualquier etapa, la información que se requerirá para tomar una decisión que conduzca a la siguiente etapa estará contenida en las variables de estado que a continuación se describen:

- a) L es la categoría de aeronaves que está aterrizando en este momento y es conocida como la última de las categorías que han aterrizado hasta entonces. Sea $L \in \{ 1, 2, \dots, N \}$
- b) k_j es el número de aeronaves que pertenecen a la categoría "j" que no ha aterrizado hasta el momento.

3.2.2. VARIABLE DE DECISION

Sea "x" la que identifique a la siguiente categoría a aterrizar.

Dado que las aeronaves que no han aterrizado son posibles candidatos para hacerlo en la siguiente etapa, "x" debe ser escogida del conjunto $X = \{ y: 1 \leq y \leq N; k_y > 0 \}$

3.2.3. TRANSICION DEL ESTADO DE DECISION

Si el estado $(x, k'_1, k'_2, \dots, k'_N)$ sigue inmediatamente al estado $(L, k_1, k_2, \dots, k_N)$, entonces:

$$k'_j = \begin{cases} k_j - 1 & \text{si } j=x \\ k_j & \text{en cualquier otro caso.} \end{cases}$$

Para toda $j=1, \dots, N$

3.2.4. RECURSION DE OPTIMALIDAD

Sea $V(L, k_1, \dots, k_N)$ el valor optimo de todas las decisiones subsecuentes que se pueden tomar desde el estado actual (L, k_1, \dots, k_N) , hasta el final del procedimiento de asignación en donde $k_1 = k_2 = \dots = k_N = 0$.



DEPMI

Dado que en cualquier etapa del procedimiento de asignación de turnos de aterrizaje hay que elegir al mejor de los elementos del conjunto X , esto implica que:

$$V(L, k_1, k_2, \dots, k_N) = \min_{x \in X} \left[t_{L,x} + V(x, k'_1, \dots, k'_N) \right] \quad (3.1)$$

donde:

$$X = \{ y: 1 \leq y \leq N, k_y > 0 \} \quad (3.2)$$

$$y \quad k'_j = \begin{cases} k_j - 1 & \text{si } j=x \\ k_j & \text{en cualquier otro caso.} \end{cases} \quad (3.2)$$

3.2.5. CONDICIONES DE ACOTAMIENTO

$$V(L, 0, \dots, 0) = 0 \quad (3.4)$$

para todas las $L=1, \dots, N$, dado que si $k_1 = k_2 = \dots = k_N = 0$ ya no hay mas aeronaves que aterrizar.

3.2.6. IDENTIFICACION DE LA SIGUIENTE MEJOR CATEGORIA

Sea $S(L, k_1, k_2, \dots, k_N)$ la siguiente mejor categoría a aterrizar a partir del estado actual $(L, k_1, k_2, \dots, k_N)$. Por lo tanto:

$$S(L, k_1, k_2, \dots, k_N) = x$$

Si

$$V(L, k_1, k_2, \dots, k_N) = t_{L,x} + V(x, k'_1, \dots, k'_N) \quad (3.5)$$

En el caso de que exista más de una x que satisfaga la expresión,

3.3 OBSERVACIONES

De acuerdo al planteamiento presentado en los incisos anteriores, se observa que la función objetivo puede ser modificada de tal forma que sea factible incorporar otros criterios de optimización. En el siguiente capítulo se presentan dos casos por medio de los cuales se ilustra la versatilidad de la función objetivo.

CAPITULO IV

FUNCION OBJETIVO

4.1 INTRODUCCION

El criterio de optimización empleado en los capítulos anteriores ha sido enfocado principalmente a plantear una forma de solución que minimice el tiempo de aterrizaje de las aeronaves. Sin embargo, este criterio también puede ser orientado hacia la solución óptima de problemas que puedan presentar tanto los pasajeros como las aerolíneas, ya que es posible plantear otro tipo de funciones objetivo de acuerdo a los diferentes requerimientos que se demanden.

En el caso referente a los pasajeros, podría demandarse por ejemplo, un tiempo mínimo de estancia de éstos en las aeronaves que están en espera de aterrizar. Por lo que a las aerolíneas concierne, se podría requerir que se minimice el consumo de combustible.

A continuación se presentan las modificaciones que se efectuarían a la función objetivo para analizar los dos casos mencionados.

4.2 MINIMIZACION DEL TIEMPO DE ESTANCIA DE LOS PASAJEROS EN LAS AERONAVES

Sea $V(L, k_1, \dots, k_N)$ el valor óptimo de todas las decisiones subsecuentes que se pueden tomar desde el estado actual (L, k_1, \dots, k_N) hasta el final del procedimiento de asignación en donde $k_1 = k_2 = \dots, k_N = 0$

Por lo tanto:

$$V(L, k_1, k_2, \dots, k_N) = \min_{x \in X} \left[\sum_{j=1}^N P_j \cdot t_{L,x} + V(x, k'_1, \dots, k'_N) \right]$$

donde:

$$X = \{ y: 1 \leq y \leq N, k_y > 0 \}$$

$$k'_j = \begin{cases} k_j - 1 & \text{si } j=x \\ k_j & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

y

$$P_j = \text{Pasajeros de la aeronave "j"}$$

4.3 MINIMIZACION DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE LAS AERONAVES

Como en el caso anterior, sea $V(L, k_1, \dots, k_N)$ el valor óptimo de todas las decisiones subsecuentes que se pueden tomar desde el estado actual (L, k_1, \dots, k_N) hasta el final del procedimiento de asignación en donde $k_1 = k_2 = \dots, k_N = 0$

Por lo tanto:

$$V(L, k_1, k_2, \dots, k_N) = \left[\begin{array}{l} \text{Min} \\ x \in X \end{array} \sum_{j=1}^N C_j \cdot t_{L,x} + V(x, k'_1, \dots, k'_N) \right]$$

donde:

$$X = \{ y: 1 \leq y \leq N, k_y > 0 \}$$

$$k'_j = \begin{cases} k_j - 1 & \text{si } j=x \\ k_j & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

y

C_j = Consumo de combustible de la aeronave "j"

CAPITULO V

CONCLUSIONES

A partir de los trabajos desarrollados en los capítulos anteriores se derivaron las siguientes conclusiones:

El modelo matemático para la asignación de turnos de aterrizaje de aeronaves, con todo y que representa una situación ideal, es susceptible de ser aplicado a la vida real.

El modelo se basa en el criterio de agrupación de aeronaves por categorías lo que permite el manejo de grupos de aviones, tan grandes como sea necesario. Asimismo, se sientan las bases para el desarrollo de modelos similares capaces de manejar situaciones más complejas como sería el caso de un sistema que involucre dos pistas de aterrizaje, que incluya condiciones de prioridad para el descenso de las aeronaves, que contemple una situación en la que se acepte el ingreso de nuevas aeronaves al sistema, o bien que incorpore el manejo de colas para el ascenso de las aeronaves.

Por otra parte, en lo que al funcionamiento del modelo concierne, cabe hacer notar que es posible evitar su uso repetitivo para cada combinación que presenten las aeronaves. Esto se lograría preparando de antemano tablas en las que aparecieran los diferentes

resultados del proceso de optimización (independientemente del estado inicial en el que estén acomodadas las aeronaves).

Posteriormente sólo habría que elegir en dichas tablas a la siguiente mejor combinación de aeronaves a aterrizar.

Considerando el procedimiento actualmente utilizado para el descenso de aeronaves, la implementación del presente modelo contribuiría a mejorar la eficiencia de éste proporcionando una serie de beneficios como pueden ser ahorros en combustible, uso de instalaciones aeroportuarias, cumplimiento de itinerarios, seguridad a los pasajeros al disminuir riesgos de colisión, reducción de la permanencia innecesaria en las terminales aeroportuarias o en los aviones y un aumento de la capacidad de los aeropuertos al poder ofrecer un mayor volumen de servicios con mejores condiciones de seguridad y consecuentemente prolongar así su vida útil.

Para implementar este modelo, será necesario contar con equipos de control aéreo lo suficientemente versátiles para que sea factible tomar decisiones en lapsos muy cortos, considerando desde luego, los casos de prioridad que se presenten sin afectar en ningún momento los requerimientos de seguridad.

BIBLIOGRAFIA

Bellman, R., "Combinatorial Processes and Dynamic Programming", American Mathematical Society, 1960.

Dear, R.G., "The Dynamic Scheduling of Aircraft in the Near Terminal Area", Flight Transportation Laboratory, M.I.T., Cambridge, Mass., 1976.

Held, M., y R.M. Karp, "A Dynamic Programming Approach to Sequencing Problems", Journal of SIAM, Vol. 10, No. 1, 1962.

Held, M., y R.M. Karp, "The Travelling Salesman Problem and Minimum Spanning Trees", Operations Research, Vol. 18, No. 6, 1970.

Blumstein, A., "An Analytic Investigation of Airport Capacity", Ph. D. Thesis, Cornell University, 1960.

Psaraftis, H., "A Dynamic Programming Approach to the Aircraft Sequencing Problem", Flight Transportation Laboratory, M.I.T., Cambridge, Mass., 1978.

Pardee, R.S., "An Application of Dynamic Programming to Optimal Scheduling in a Terminal Area Air Traffic Control System", TRW Computers Company.

Taneja, Nawal K., "The Comercial Airline Industry", M.I.T., Lexington Books, 1976