

OPTIMIZACION DEL PLAN DE FRECUENCIAS DE UNA LINEA AEREA

Luis Felipe Cerón C., Alejandro Belmar S., Bruno Philippi I.
Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile

R E S U M E N

Este trabajo presenta un modelo de optimización del plan de frecuencias de una línea aérea pequeña en el corto plazo (menos de seis meses). Si bien el modelo es general, éste fue desarrollado en base a un caso real, la ruta Nor-Sudamérica de LAN Chile, sirviendo este ejemplo de inspiración y orientación tanto para la estructuración del modelo como de sus posibles aplicaciones. Como criterio de optimalidad se considera la maximización de la utilidad operacional y como plan de frecuencias se entiende el tipo de aviones a usar y los itinerarios en sus rutas. Finalmente, se analiza la potencialidad del modelo en aplicaciones para planes de mediano plazo, como una herramienta de apoyo a la gestión de una línea aérea pequeña.

1. Características principales del negocio del transporte aéreo

El negocio del transporte aéreo comercial se compone de dos segmentos: transporte de pasajeros y transporte de carga. Estos a su vez se subdividen en productos-mercado, que corresponden a transporte de carga y pasajeros entre cada par de ciudades.

Una característica importante es la existencia de altas barreras de entrada y salida a los distintos productos-mercado. Las primeras derivan principalmente de los derechos existentes para la operación de cada mercado, como así también de las importantes inversiones requeridas para integrarse a un nuevo mercado. En cuanto a las barreras de salida, cabe destacar la pérdida de prestigio que esto involucra para la empresa que lo realiza y la subutilización del equipo.

Si bien, en un principio, todas las líneas aéreas ofrecen un producto comparable, las empresas de transporte aéreo disponen de ciertos elementos que les permiten obtener ventajas competitivas, entre éstas cabe destacar la atención a bordo, las tarifas especiales, el prestigio de la empresa y la calidad del servicio.

Conociendo las características generales del negocio, y las particulares de los mercados en que opera, una aerolínea está en condiciones de realizar un análisis de sus fortalezas y debilidades, y de acuerdo a este análisis determinar la estrategia competitiva que le permita enfrentar en la mejor forma posible las cambiantes amenazas del medio externo. La estrategia competitiva mencionada y la planificación estratégica en general de la aerolínea, son las que rigen el continuo proceso de gestión que ésta debe llevar a cabo.

2. Plan de frecuencias. Definición e importancia

Toda línea aérea debe decidir, como parte de su planificación estratégica, la escala en que va a operar en los años futuros, para adquirir, por medio de compra o arriendo, la flota necesaria y espacio físico como oficinas y otros. Asimismo, debe definir las rutas en que operará y otros planes de largo plazo. Aparte de los planes de largo plazo, existen también planes de mediano y corto plazo. En el mediano plazo los planes son más específicos y surgen restricciones que no existen en el largo plazo. Planes de mediano plazo típicos son algunos cambios en las rutas, arriendo de aviones, planes de mantenimiento, planes de tripulación, estrategias de marketing, planes financieros, adquisición de repuestos (1).

Los planes de corto plazo se caracterizan por ser aún más específicos que los de mediano plazo. El plan más importante de corto plazo es el plan de frecuencias, que consiste en la asignación de tipos de aviones e itinerarios a las distintas rutas, en un ambiente usualmente muy competitivo (1). La importancia de este plan radica en que influye fuertemente en los ingresos y costos operacionales, y por lo tanto, en la utilidad operacional. De esta forma el plan de frecuencias junto con otros factores determina la capacidad de la aerolínea para cubrir sus costos fijos y entregar utilidades netas. Así, una línea aérea no podrá sobrevivir si no tiene un plan de frecuencias apropiado que le permita adaptarse a las cambiantes condiciones del medio.

Si bien el plan de frecuencias se utiliza preferentemente en el corto plazo, es importante al tomar las decisiones dentro de un contexto de mediano plazo. En efecto, factores que son fijos en el corto plazo, pasan a ser controlables o semicontrolables en el mediano plazo. De esta manera, es importante cuantificar la forma en que se ven afectadas las alternativas del plan de frecuencias ante variaciones de estos factores dentro de los rangos permisibles de control de que se dispone.

3. Presentación del modelo general

La determinación de un plan de frecuencias apropiado puede ser enfocado como un problema de optimización. Como criterio de optimalidad parece razonable considerar la maximización de la utilidad operacional esperada en un cierto período de tiempo. A su vez, las variables de decisión correspondientes a este problema son los vuelos del plan de frecuencias.

De esta manera, el modelo tendría la siguiente estructura general:

Maximizar (Iop - Cop)

sujeto a:

$$Iop = f(F_k)$$

$$Cop = g(F_k)$$

$$F_k \in A$$

en que:

- Iop son los ingresos operacionales dependientes del plan de frecuencias.
- Cop son los costos operacionales dependientes del plan de frecuencias.
- F_k son los vuelos que componen al plan de frecuencias.
- f y g son las funciones que relacionan al plan de frecuencias con los ingresos y costos operacionales respectivamente.

Todas las variables y funciones se entienden definidas para un período de tiempo determinado.

En esta formulación, la mayor dificultad estriba en estimar las funciones "f" y "g". Esto es debido a que los ingresos y costos operacionales dependen de muchos otros factores ajenos al plan de frecuencias, y de esta manera, resulta difícil estimar la forma en que cambian los ingresos y costos al variar el plan de frecuencias, manteniendo constantes todos los demás factores. Es también, por la existencia de estos factores ajenos al plan de frecuencias, que las funciones "f" y "g" deben ser parametrizadas en términos de ingresos y costos medios, tamaños de mercado, competencia y posición competitiva, para poder cuantificar la posible incidencia de variaciones de estos factores.

4. Características principales de LAN Chile y de su ruta Nor-Sudamérica^(*)

LAN Chile es una línea aérea estatal con 54 años de existencia lo que le da una gran experiencia y prestigio, manteniendo también una fuerte presencia en la mayoría de sus rutas. Sin embargo, es una aerolínea de tamaño pequeño, dispone de 8 aviones, de los cuales sólo 2 son de fuselaje ancho.

Las rutas de LAN Chile a mediados de 1983 eran las siguientes: Pacífico Sur, Regional Sudamericana, Nor-Sudamérica, Nacional.

En la ruta Pacífico Sur el único operador es LAN, y en la Nacional, los operadores son fundamentalmente LAN y LADECO, por lo que estas rutas no representan un buen ejemplo de una ruta con mercados competitivos. Por otra parte, en la ruta regional, la presencia de LAN es débil en los pocos mercados que la componen. La ruta Nor-Sudamérica en cambio, es la más importante para LAN en lo que se refiere a pasajeros-kilómetro y toneladas-kilómetro transportados, siendo también la más rentable. Además en esta ruta están operando aerolíneas de diversos países, existiendo una importante competencia entre ellas.

Es por todo lo anterior que la ruta Nor-Sudamérica fue escogida como ejemplo para desarrollar el modelo. Considerando las ciudades que componen esta ruta y las restricciones de tráfico, que exigen incluir Santiago en los vuelos de LAN, los vuelos posibles resultan ser los siguientes:

SCL-MIA-SCL	SCL: Santiago
SCL-MIA-NYC-MIA-SCL	LIM: Lima
SCL-LIM-MIA-LIM-SCL	COS: Caracas
SCL-LIM-MIA-NYC-MIA-LIM-SCL	MIA: Miami
SCL-COS-MIA-COS-SCL	NYC: Nueva York
SCL-COS-MIA-NYC-MIA-COS-SCL	

No se incluyen Montevideo ni Buenos Aires en estos vuelos, ya que LAN ha perdido sus derechos al transporte de pasajeros entre estas ciudades y Estados Unidos. En cuanto a Panamá, LAN no tiene derechos para transportar pasajeros entre esta ciudad y Miami, y el mercado Panamá-Santiago se ha reducido mucho, por lo que LAN ha dejado de volar a esa ciudad. En todo caso, éstas y otras ciudades podrían ser fácilmente incluidas en el modelo si fuera necesario.

Por otra parte, dada la flota actual de LAN y las restricciones de polución y ruidos que comenzarán a regir en 1985, los únicos aviones de su flota que LAN pueda usar en esta ruta son los dos DC-10 que actualmente arrienda a Air New Zealand.

Veamos ahora cómo estructurar, para este ejemplo particular, el modelo general presentado anteriormente. Para esto analizaremos primero los ingresos y costos de operar en estas rutas y la forma en que estos dependen del plan de frecuencias.

(*) Los autores desean expresar sus agradecimientos a LAN Chile por los antecedentes aportados y las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.

5. Ingresos

Los ingresos típicos de una línea aérea derivan fundamentalmente de:

- Transporte de pasajeros.
- Transporte de carga.
- Transporte de correo.
- Exceso de equipaje.
- Servicios de mantenimiento y atención en aeropuerto a otras aerolíneas.

De éstos, sólo los 4 primeros se ven influenciados por el plan de frecuencias, siendo el más importante el de pasajeros y luego el de carga, que para el caso considerado, representan cerca del 98% de los ingresos del vuelo. Además, por falta de información, debieron agregarse a los ingresos por carga los correspondientes a exceso de equipaje y correo. Consideramos ahora los ingresos por pasajeros y carga en forma separada.

5.1 Ingresos por transporte de pasajeros

Existe una gran variedad de tarifas que las aerolíneas ofrecen al mercado. Es por esto, que resulta muy engoroso, y a veces imposible, realizar el cálculo de ingresos en función de las tarifas, por lo que suele utilizarse más comúnmente el ingreso medio por pasajero para cada par de ciudades.

De esta manera, los ingresos por transporte de pasajeros (I_p), pueden representarse por:

$$I_p = \sum_i \sum_j r_{ij} x_{ij}$$

en que:

i, j : son los distintos pares de ciudades de cada ruta.

r_{ij} : es el ingreso medio por pasajero para el par de ciudades i, j .

x_{ij} : es el número de pasajeros transportados entre las ciudades i, j en un determinado período.

Aunque r_{ij} es variable en el tiempo y es marcadamente estacional, en un mercado estable es independiente del plan de frecuencias, por lo cual corresponde a un parámetro para el modelo, el que puede obtenerse de la información histórica disponible.

Es conveniente separar los pasajeros transportados entre cada par de ciudades (x_{ij}) en dos componentes: una formada por una proporción del mercado regular total del par de ciudades, y otra formada por los pasajeros que pertenecen a otros mercados regulares y que ocasionalmente, por medio de conexiones, viajan a través del par de ciudades considerado debido a tarifas menores. Un ejemplo de este último tipo de pasajeros lo constituyen aquéllos que viajan de Buenos Aires a Miami. Parte de éstos, si bien tienen vuelos directos, prefieren hacer cambio de avión en Santiago debido a menores tarifas. En cambio, los pasajeros que viajan de Santiago a Chicago, y hacen conexión en Nueva York, pertenecen al mercado regular Santiago-Nueva York, ya que no existen vuelos directos entre Santiago y Chicago.

De esta manera, se tiene que:

$$x_{ij} = N_{ij} + P_{ij} M_{ij}$$

en que:

N_{ij} : es el número de pasajeros transportados entre i , j y que corresponden a otros mercados, en un determinado período.

P_{ij} : es la participación del operador en el mercado regular.

M_{ij} : es el tamaño del mercado regular en un determinado período.

Los N_{ij} dependen del plan de frecuencias, pero también, y en forma importante, de las diferencias entre las tarifas en vuelo directo y las de conexiones. De esta manera la definición de los N_{ij} como función sólo del plan de frecuencias no será muy precisa.

Para el caso de la ruta en estudio, los N_{ij} pertinentes son pequeños, en comparación al transporte del mercado regular, por lo que las imprecisiones en sus estimaciones no son de importancia. En este caso los N_{ij} reflejan el número de pasajeros transportados entre Santiago y Lima, Santiago y Miami, y Santiago y Nueva York, que corresponden a mercados de Buenos Aires o Montevideo.

Así, si se adopta la siguiente nomenclatura: Santiago: 1, Lima: 2, Caracas: 3, Miami: 4, Nueva York: 5, es posible obtener los valores estimados de: N_{12} , N_{14} , N_{15} , en base a la información histórica disponible, asumiendo proporcionalidad en los vuelos de conexiones. Como dijimos esta relación dependería también de las diferencias de tarifas, pero dada su poca importancia en los x_{ij} , no consideramos aquí este aspecto.

Por otra parte, los M_{ij} , son variables en el tiempo y estacionales, pero independientes del plan de frecuencias si el mercado está bien servido. Por lo cual estos M_{ij} son parámetros del modelo.

En cuanto a los P_{ij} , éstos sí dependen en forma importante del plan de frecuencias, pero también de la posición competitiva de la aerolínea y de los planes de frecuencia de las líneas aéreas competidoras. En la práctica, para estimar estos P_{ij} , las empresas aéreas suelen usar índices de calidad de servicio, que se basan en factores como frecuencia de los vuelos, tipo de avión y número de paradas intermedias, los cuales quedan determinados por el plan de frecuencias. En nuestro caso se consideraron dos posibles índices de calidad de servicio diferentes, éstos son: QSI (Quality of Service Index) desarrollado por el Civil Aeronautic Board de los Estados Unidos, y el LI (LAN Index) adaptado por LAN Chile a partir de un estudio de Air France (2). Ambos índices son empíricos y suponen que existe una fuerte correlación entre la participación que un operador tenga en el índice de calidad de servicio total de mercado y su participación en el número de pasajeros transportados en ese mercado en un determinado período. De hecho la participación en el nivel de servicio puede usarse como estimador de la participación que se tendrá en el mercado. El QSI ha sido probado por muchos años, en los mercados domésticos americanos, con resultados satisfactorios. El LI en cambio se ha usado muy poco, por lo que se desconoce su bondad como estimador.

Para escoger el índice más apropiado, estudiamos el comportamiento de ambos índices como estimadores de la participación de mercado, durante los años 1980, 81 y 82, en los diversos pares de ciudades que componen la ruta, llegándose a la conclusión de que el OSI se comportaba claramente mejor en todos los casos.

El QSI tiene además la ventaja de ser lineal en el plan de frecuencias. Así por ejemplo, los factores OSI correspondientes a los aviones DC-10 (200 asientos) que usa LAN, son:

Vuelo sin escalas: 1,4
Vuelo con una escala: 0,79
Vuelo con dos escalas: 0,56

Luego si consideramos que se ofrece el siguiente servicio en un mercado dado: un vuelo sin escalas y dos vuelos con dos escalas, entonces el OSI de LAN en ese mercado es $1 \times 1,4 + 2 \times 0,56 = 2,52$.

Si bien el QSI es lineal en el plan de frecuencias, la participación en el nivel de servicio no es lineal, ya que, para cada par de ciudades se tendrá que:

$$\text{PART}_{\text{LAN}} \text{ en OSI} = \frac{\text{OSI}_{\text{LAN}}}{\text{OSI}_{\text{LAN}} + \text{OSI}_{\text{competencia}}}$$

o bien:

$$\text{PART}_{\text{LAN}} \text{ en OSI} = \frac{\frac{\text{OSI}_{\text{LAN}}}{\text{OSI}_{\text{competencia}}}}{\frac{\text{OSI}_{\text{LAN}}}{\text{OSI}_{\text{competencia}}}} + 1$$

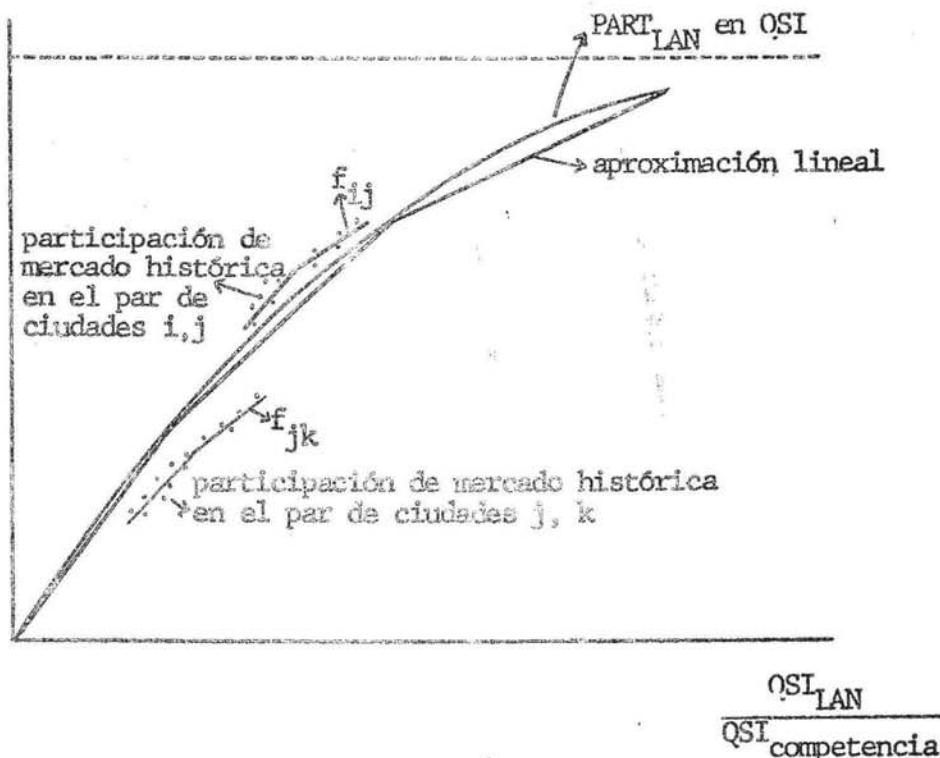
en que OSI_{LAN} es una función lineal de la variable plan de frecuencias y $\text{OSI}_{\text{competencia}}$ es independiente del plan y, por lo tanto, un parámetro de nuestro modelo. Luego, la variable $\text{OSI}_{\text{LAN}}/\text{OSI}_{\text{competencia}}$ sigue siendo una función lineal del plan de frecuencias.

Si bien PART_{LAN} en OSI es una función no lineal en $\text{OSI}_{\text{LAN}}/\text{OSI}_{\text{competencia}}$ esta función es estrictamente cóncava y puede ser razonablemente aproximada por trazos lineales (ver figura N°1).

Para ver la racionalidad de estas suposiciones graficamos, para cada par de ciudades, en base a la información histórica, la participación de mercado y $\text{OSI}_{\text{LAN}}/\text{OSI}_{\text{competencia}}$. De esto pudimos observar que, dependiendo de cada

par de ciudades, la participación en el QSI sobre o subestima la participación de mercado. Por lo tanto, nos pareció razonable, en lugar de la aproximación lineal de la participación en el QSI, introducir otro estimador de la participación de mercado, que sea distinto para cada par de ciudades, y que se ajuste mejor a la participación obtenida históricamente. Para esto consideraremos una "función de participación" f_{ij} , para el par de ciudades i, j que corresponda a regresiones lineales por tramos de la participación en el mercado como función de $\frac{QSI_{LAN}}{QSI_{competencia}}$, según lo obtenido históricamente. Lo anterior puede representarse, en forma gráfica, en la figura N°1.

FIGURA N°1



Con estas consideraciones podemos obtener la relación:

$$P_{ij} = f_{ij} (F_K, Q_{ij})$$

en que:

f_{ij} : es la función de participación en i, j .

F_K : son los vuelos del plan de frecuencias.

Q_{ij} : es el QSI de la competencia en el mercado i, j , independiente del plan de frecuencias y, por lo tanto, un parámetro del modelo.

Esto se hizo en todos los mercados que componen la ruta con excepción de Miami-Nueva York, Caracas-Miami, Caracas-Nueva York, pues LAN no tiene derecho a transportar pasajeros en ellos. Tampoco se hizo esto en el mercado Santiago-Caracas, ya que éste está deficientemente servido y el tamaño de mercado sí depende del número de vuelos, por lo que no puede usarse la relación $x_{ij} = P_{ij} \cdot M_{ij}$. Para ese mercado se estimaron números medios de pasajeros al hacer un vuelo semanal, para las distintas estaciones del año, en base a información histórica.

5.2 Ingresos por carga

Para el transporte carga, las líneas aéreas típicamente utilizan aviones cargueros y la capacidad de carga de sus aviones de pasajeros. En el caso de LAN se dispone de un avión carguero para este fin.

Para optimizar el uso del carguero parece conveniente utilizar éste sólo para transportar el exceso de carga que los aviones de pasajeros no pueden llevar (por problemas de capacidad). Sin embargo, la empresa tiene dos frecuencias fijas del carguero a EEUU. La distribución óptima de la carga entre los distintos aviones es un problema aparte del plan de frecuencias y debería ser tratado en un estudio diferente, lo cual escapa al objetivo de éste y por lo tanto no se hará aquí.

Para nuestro caso se optimizará el plan de frecuencias de aviones de pasajeros, suponiendo que el avión carguero se usa sólo cuando se ha copado la capacidad de carga de los aviones de pasajeros. Como históricamente la demanda por transporte de carga que ha enfrentado LAN en la ruta Nor-Sudamérica ha sido sustancialmente mayor que su capacidad de carga en aviones de pasajeros, parece razonable asignar un monto fijo de ingresos por transporte de carga para los distintos tipos de vuelo, en base a lo obtenido durante el año 1982.

6. Costos

Los costos asociados a la explotación de una empresa de transporte aéreo pueden ser agrupados en tres categorías (3):

- Costos relacionados con los aviones.
- Costos relacionados con el tráfico.
- Costos relacionados con el sistema.

Los costos relacionados con el sistema comprenden fundamentalmente aquéllos originados por las oficinas y la publicidad. Estos costos son fijos en relación al plan de frecuencias, por lo tanto, son irrelevantes en el contexto de este estudio. A continuación se tratarán los dos primeros puntos en forma detallada.

6.1 Costos relacionados con el avión

Estos costos son los más importantes entre los operacionales, ya que son veinti veces mayores que los relacionados con el tráfico. Puede desagregarse así:

~ Combustible (kerosene)

Es el más importante de todos y obviamente está determinado por el volumen consumido y el precio. El precio varía de posta a posta y suele estar sujeto a acuerdos entre la aerolínea y las empresas de combustibles.

El consumo depende de varios factores, entre ellos destacan: la distancia recorrida, el tipo de avión y las condiciones en que éste se encuentra, el peso de despegue, los vientos y las condiciones geográficas y climáticas.

Tomando en cuenta lo anterior, no parece adecuado calcular un consumo medio por hora o por kilómetro de vuelo. Resulta más conveniente estimar el consumo para cada par de ciudades y dirección en función del peso de despegue y la duración del vuelo (que refleja los vientos y las condiciones climáticas variables en el tiempo). De esta forma se evita mezclar condiciones climáticas y geográficas diferentes y se tiene el consumo en función de variables fácilmente medibles, y cuya información histórica está disponible para los aviones que LAN usa actualmente en su ruta Nor-Sudamérica. En base a estos antecedentes, se pudo concluir que una relación adecuada era la siguiente:

$$\text{CONS}_{ij} = A_{ij} \cdot T^{B_{ij}} \cdot P^{C_{ij}}$$

en que CONS_{ij} es el consumo de combustible para ir de la ciudad i a la j , T es el tiempo de vuelo y P es el peso de despegue. A_{ij} , B_{ij} y C_{ij} son parámetros cuyos valores se obtuvieron en base a regresiones realizadas a partir de la información histórica para cada par de ciudades de la ruta. Todas estas regresiones presentaron una alta bondad de ajuste y se verificó la independencia estadística de P y T .

Conocida la función de consumo, se pudo estimar un consumo fijo por vuelo y un consumo marginal de combustible variable con el número de pasajeros (peso).

El costo del aceite es de muy poca importancia y se calcula por hora de vuelo.

~ Mantención

La mantención de los aviones DC-10 que arrienda LAN, está contratada por hora de vuelo a Air New Zealand, por lo cual es directamente proporcional a la duración del vuelo.

~ Otros costos

Las tasas aeronáuticas corresponden a los impuestos aéreos y derechos de vuelo. El handling corresponde a la atención en tierra del avión. El seguro del avión se contrata por hora de vuelo. Los costos de arriendo son fijos en el corto plazo y por lo tanto independientes del plan de frecuencias. Por último los costos de tripulación comprenden los sueldos, viáticos y hoteles. Los sueldos son fijos e independientes del plan de frecuencias en el corto plazo. Los viáticos y hoteles en cambio, varían directamente con el plan de frecuencias.

Resumiendo, si consideramos la siguiente nomenclatura:

Vuelo	Ciudades
F1	SCL-MIA-SCL
F2	SCL-MIA-NYC-MIA-SCL
F3	SCL-LIM-MIA-LIM-SCL
F4	SCL-LIM-MIA-NYC-MIA-LIM-SCL
F5	SCL-CCS-MIA-CCS-SCL
F6	SCL-CCS-MIA-NYC-MIA-CCS-SCL

a enero de 1983, los costos directos variables con el plan de frecuencias eran aproximadamente los siguientes para cada vuelo y por cada concepto para el avión DC-10/30 (en USD de enero de 1983).

ITEM	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Kerosene	52640	65230	54290	66890	58510	71100
Axente	60	80	60	80	70	90
Mantenimiento	19420	25990	20560	27130	22550	29120
Tasas aeronáuticas y handling	11030	13840	11030	13840	14390	17200
Seguros avión	1370	1840	1450	1920	1590	2060
Tripulación	5980	5980	5980	5980	5980	5980
Total	90500	112960	93370	115840	103090	125550

6.2 Costos relacionados con el tráfico

Los costos relacionados con el tráfico corresponden a la atención y seguro de pasajeros, y consumo marginal de combustible. A enero de 1983 éstos eran aproximadamente los siguientes por par de puntos:

	Costo variable (USD/pasajero)
SCL-LIM	20
SCL-MIA	54
SCL-NYC	68
LIM-MIA	33
LIM-NYC	47
SCL-CCS	46

7. Valores de parámetros

Como se indicara en la presentación del modelo general, los ingresos y costos operacionales dependen no sólo del plan de frecuencias sino que también de muchos factores ajenos a éste. Es por esto que los ingresos y costos deben parametrizarse en términos de estos factores, de modo de poder representarse como funciones del plan de frecuencias.

En lo que se refiere a ingresos, los parámetros requeridos son: los ingresos medios por transporte de pasajeros entre los diversos pares de ciudades (r_{ij}), los tamaños de mercado de cada par de ciudades (M_{ij}), y la calidad de servicio de la competencia (Q_{ij}). Para los ingresos por carga se asignó, como ya se dijo, un ingreso medio por vuelo.

En cuanto a los costos, dependientes e independientes del tráfico, se consideraron los valores presentados en la sección anterior, para cualquier época del año ya que no presentan tendencias estacionales.

Para los parámetros r_{ij} y M_{ij} se consideraron los promedios de los valores reales de los años 1980, 81 y 82 para cada trimestre. La división trimestral se debe a la marcada estacionalidad que afecta a estos parámetros. Para el OSI de la competencia (Q_{ij}), en cambio, se consideraron los valores de los últimos meses de 1982, debido a que éstos han presentado muchas variaciones en los últimos años, aunque sin una estacionalidad clara.

En resumen, los valores de parámetros que se utilizaron se presentan en la tabla N°1.

Q_{ij} (OSI semanal)

$Q_{12} : 10$

$Q_{14} : 10$

$Q_{15} : 2$

$Q_{24} : 19$

$Q_{25} : 4,8$

8. El modelo para la ruta Nor-Sudamérica

De acuerdo a las características propias de la ruta Nor-Sudamérica, se aplicó el modelo general presentado en la sección 3, para esta ruta y buscando maximizar las utilidades operacionales de LAN Chile. Este objetivo se sintetiza en el siguiente criterio:

$$\begin{aligned} & \max (r_{12}-20) X_{12} + (r_{14}-54) X_{14} + (r_{15}-68) X_{15} + (r_{24}+33) X_{24} + (r_{25}-47) X_{25} - \\ & - 64500F1 - 81400F2 - 67400F3 - 84200F4 - (77100 - \alpha(r_{13}-46))F5 - (93900 - \\ & - \alpha(r_{13}-46))F6 - 0,5 \alpha(r_{13}-46) \cdot L \end{aligned}$$

TABLA N°1

PARAMETRO	TRIMESTRE	I	II	III	IV
r_{ij} (en USD de enero 1983)					
r_{12}		223	223	226	217
r_{14}		583	630	563	517
r_{15}		640	736	660	591
r_{24}		371	382	371	365
r_{25}		416	396	350	363
r_{13}		549	524	545	517
M_{ij} (pasajeros por semana)					
M_{12}		1415	897	1126	1225
M_{14}		1739	1076	1461	1914
M_{15}		565	365	491	498
M_{24}		1790	1639	2130	1805
M_{25}		689	497	735	774

Fuente: Elaboración propia a partir de información proporcionada por LAN Chile y el boletín de la Junta de Aeronáutica Civil.

en que:

r_{ij} : son los ingresos medios por pasajero por par de ciudades.

x_{ij} : el número de pasajeros transportados por par de ciudades.

α : 120 (2º trimestre), 200 (otros trimestres) corresponden al número de pasajeros SCL-CCS por vuelo.

L : variable auxiliar binaria, igual a 0 si se hace 1 vuelo semanal a Caracas o ninguno, igual a 1 si se hacen 2 vuelos semanales a Caracas.

F_K : frecuencias semanales de vuelo K (variable entera).

Los ponderadores de los F_K corresponden a los ingresos por carga, menos los costos del vuelo independientes del tráfico.

Restricciones generales:

$\sum_1^6 F_K \leq 6$ (disponibilidad de aviones, cada avión puede hacer hasta 3 vuelos semanales, considerando 2 días de viaje por vuelo y 1 día por semana para mantenimiento).

$F_3 + F_4 \leq 3$ (paradas en Lima)

$F_5 + F_6 - L \leq 1$ (pasajeros SCL - CCS)

Restricciones relativas a la composición del tráfico:

$X_{12} - P_{12} + M_{12} - N_{12} = 0$

$X_{14} - P_{14} + M_{14} - N_{14} = 0$

$X_{15} - P_{15} + M_{15} - N_{15} = 0$

$X_{24} - P_{24} + M_{24} = 0$

$X_{25} - P_{25} + M_{25} = 0$

Restricciones de participación:

a) Cálculo de los OSI para cada par de ciudades:

$QSI_{112} - 1,4F_3 - 1,4F_4 = 0$

$QSI_{114} - 1,4F_1 - 1,4F_2 - 0,79F_3 - 0,79F_4 - 0,79F_6 = 0$

$QSI_{115} - 0,79F_2 - 0,56F_4 - 0,56F_6 = 0$

$QSI_{214} - 1,4F_3 - 1,4F_4 = 0$

$QSI_{215} - 0,79F_4 = 0$

b) Definición de los tramos de validez de las funciones de participación

$$QSI121 - QSI12 + 0,28012 > 0$$

$$QSI122 - QSI12 + 0,54Q12 > 0$$

$$QSI141 - QSI14 + 0,34014 > 0$$

$$QSI142 - QSI14 + 0,87Q14 > 0$$

$$QSI151 - QSI15 + 0,94Q15 > 0$$

$$QSI152 - QSI15 + 2,8015 > 0$$

$$QSI241 - QSI24 + 0,24024 > 0$$

$$QSI242 - QSI24 + 0,42Q24 > 0$$

$$QSI251 - QSI25 + 0,11Q25 > 0$$

$$QSI252 - QSI25 + 0,54Q25 > 0$$

$$QSI120 - QSI12 + 0,05Q12 \cdot R12 > 0$$

$$0,05Q12 \cdot R12 - QSI12 > 0$$

$$QSI140 - QSI14 + 0,05Q14 \cdot R14 > 0$$

$$0,05Q14 \cdot R14 - QSI14 > 0$$

$$QSI150 - QSI15 + 0,05Q15 \cdot R15 > 0$$

$$0,05Q15 \cdot R15 - QSI15 > 0$$

$$QSI240 - QSI24 + 0,05Q24 \cdot R24 > 0$$

$$0,05Q24 \cdot R24 - QSI24 > 0$$

$$QSI250 - QSI25 + 0,05Q25 \cdot R25 > 0$$

$$0,05Q25 \cdot R25 - QSI25 > 0$$

en que:

$$R_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } R_{ij} \geq 5 \\ 0 & \text{si } R_{ij} < 5 \end{cases}$$

c) Cálculo de las funciones participación (corresponden a participación: P_{ij})

$$Q12 \cdot P12 - 0,816 QSI120 + 0,4486 QSI121 + 0,187 QSI122 = 0$$

$$Q14 \cdot P14 - 1,0234 QSI140 + 0,7509 QSI141 + 0,1363 QSI142 = 0$$

$$Q15 \cdot P15 - 0,5683 QSI150 + 0,4879 QSI151 + 0,0402 QSI152 = 0$$

$$Q24 \cdot P24 - 0,6952 QSI240 + 0,2611 QSI241 + 0,2171 QSI242 = 0$$

Restricciones relativas a pasajeros de conexiones

$$N12 - N17 U12 - 11 V12 = 0$$

$$N14 - 3,4 U14 - 10,8 V14 = 0$$

$$N15 - 5 U15 - 13,8 V15 = 0$$

$$U12 - F3 - F4 \leq 0$$

$$U14 - F1 - F2 - F3 - F4 - F5 - F6 \leq 0$$

$$U15 - F2 - F4 - F6 \leq 0$$

$$V12 - U12 \leq 0$$

$$V14 - U14 \leq 0$$

$$V15 - U15 \leq 0$$

V12 < 3
V14 < 3
V15 < 3

Todas las variables son nonnegativas y los F_K son enteros.

9. Solución del modelo en el corto plazo

La solución del modelo presentado en la sección anterior, utilizando el programa LINDO* en un DIGITAL, dio los siguientes resultados:

Trimestres 1, 3 y 4: $F4=3$, $F5=1$, $F6=1$
Trimestre 2 : $F4=3$, $F6=1$

Trimestre	Utilidades operacionales (miles de USD/semana)
1	588
2	328
3	510
4	492

En relación a estos resultados cabe hacer los siguientes comentarios:

- La solución óptima resulta bastante parecida en los 4 trimestres, lo cual hace pensar que este resultado es poco sensible a variaciones en los parámetros.
- Los aviones no se están ocupando al máximo, ya que se dispone de seis frecuencias semanales y en ningún semestre se observan más de cinco.
- En todos los trimestres se está realizando el número máximo de paradas en Lima, tres por semana, vale decir la restricción podría ser activa.
- El segundo trimestre presenta ingresos particularmente bajos.

Adicionalmente se estudió el efecto que tendría el disminuir a la mitad los ingresos por carga, comprobándose que el plan de frecuencias óptimo no se ve alterado para ningún trimestre, viéndose disminuida por cierto la utilidad semanal.

Para obtener una estimación de la utilidad marginal de una parada en Lima, se probó el modelo considerando como cuatro el número máximo de paradas semanales en dicha ciudad, obteniéndose los siguientes resultados:

Trimestres 1, 3 y 4: $F4=4$, $F5=2$
Trimestre 2 : $F4=4$, $F5=1$

* LINDO: Linear Interactive and Discrete Optimizer. GSB, University of Chicago, USA.

Trimestre	Utilidades operacionales (miles USD/semana)	Utilidad marginal 4a. parada en Lima (miles de USD/semana)
1	623	35
2	391	13
3	592	32
4	528	36

Puede apreciarse que el plan de frecuencias sigue siendo bastante estable a lo largo del año, y los tres trimestres que antes presentaban idénticos planes siguen mostrando igual comportamiento. La diferencia con el plan anterior radica en que se agrega un vuelo F4 y se cambia un F6 por un F5. Esto indica que el mercado Santiago-Nueva York, se satura para cuatro vuelos. Por otra parte, la parada adicional en Lima conviene aprovecharla con un vuelo hasta Nueva York, ya que así se aumenta la participación en dos mercados SCL-NYC y LIM-NYC.

La utilidad marginal de la 4a. parada, sin cambiar en forma radical el resultado, no deja de ser significativa, alcanzando un promedio de USD 29.000 semanales lo que corresponde a un 6% de la utilidad total.

Por otra parte, el actual plan de frecuencias de LAN para la ruta Nor-Sudamérica es F4=3, F6=2, para todos los trimestres del año. A continuación se muestran las diferencias de ingresos, costos y utilidades esperadas (en base a los supuestos del modelo), del plan de LAN con el óptimo del modelo. Las diferencias presentadas consideran costos, ingresos y utilidades del plan de LAN menos los del plan óptimo.

Trimestre	Ingresos diferenciales (USD/semana)	Costos diferenciales (USD/semana)	Pérdida diferencial (USD/semana)
1	22950	15730	6720
2	125530	101010	29520
3	22950	15100	7350
4	22950	14070	8380

En los trimestres primero, tercero y cuarto, en que la diferencia consiste solamente en proseguir un vuelo desde Miami a Nueva York, la diferencia de utilidades no supera el 3%. Sin embargo, en el segundo trimestre, el más débil en cuanto a utilidades, éstas disminuyen en un 7,5% de su valor esperado. Debe recordarse que aunque las diferencias no son muy importantes en relación a la utilidad operacional, sí pueden serlo con respecto a la utilidad neta.

10. El modelo en el mediano plazo

El mediano plazo se distingue del corto plazo, de modo importante, por el aumento de la incertidumbre en cuanto a los valores de los parámetros relevantes para el modelo. Por otra parte, algunos costos fijos se hacen variables, como por ejemplo el arriendo de los aviones y el costo por sueldos de tripulación. Así también el número de aviones a arrendar pasa a ser una variable de decisión.

Puede decirse que en el mediano plazo son dos las variables operacionales

de mayor importancia para la aerolínea: el tamaño y composición de la flota y un plan de frecuencias agregado que permita planificar en forma gruesa la operación. Sin embargo, es importante mantener desagregado el año en trimestres, dada las estacionalidades de la demanda y de los ingresos medios.

Para el análisis de mediano plazo se supondrá un escenario base (existente a enero de 1983), y variaciones en torno a él. Para el escenario base se supondrán los mismos costos que en el corto plazo, salvo en el caso de los costos de tripulación y arriendo de aviones, los que se harán en parte variable. Para los demás parámetros se supondrán los mismos valores del corto plazo.

Los distintos escenarios considerados fueron los siguientes:

1. Sin cambios en relación al modelo de corto plazo.
2. Sin derechos de tráfico entre Lima y Miami.
3. Sin derecho a paradas en Lima.
4. Disminución de la demanda en un 20%.
5. Aumento de los costos en un 20%.
6. Disminución de los ingresos por carga en un 50%.
7. Aumento de la competencia en un 20%.
8. Paradas ilimitadas en Lima.
9. Aumento de la demanda en 20%.
10. Disminución de los costos en un 20%.
11. Aumento de los ingresos por carga en un 50%.
12. Disminución de la competencia en un 20%.

Se obtuvieron soluciones óptimas para cada uno de estos escenarios considerando arrendar uno o dos aviones DC-10, obteniéndose los resultados presentados en las tablas N° 2 y N° 3.

Puede apreciarse en las tablas N° 2 y N° 3 que la utilidad semanal resulta mejor con 2 aviones para los casos uno y del siete al doce. Estos corresponden a los casos sin cambios, aumento de la competencia, y todos aquellos casos que representan mejoras con respecto al sin cambios.

Los casos en que la diferencia de resultados entre uno y dos aviones son negativas son los casos 6 y 11 que se refieren a disminución y aumento de ingresos por carga respectivamente. Si los ingresos de carga disminuyen un 50%, la utilidad operacional para una flota de un avión es mayor en USD 59.000 semanales que para una flota de dos aviones. Por el contrario, si los ingresos por carga aumentan en un 50% las utilidades operacionales con dos aviones son mayores en USD 135.000 semanales, que en el caso de un avión. Puede notarse que el plan de frecuencias cambia bastante al tener uno o dos aviones para estos casos, es decir, el plan de frecuencias y la flota óptima son muy sensibles a los ingresos por carga. De aquí la importancia de racionalizar al máximo el uso del cargo y el transporte de carga en aviones de pasajeros, tema que por sí solo basta para efectuar un estudio aparte. No es el objeto de este trabajo el realizarlo, pero en la utilización del modelo es importante contar con los mejores estimaciones de los ingresos por carga que sea posible.

Las utilidades extremas, máxima y mínima, se obtienen para la flota de dos aviones, y ocurren en los casos de disminución y aumento de costos respectivamente. Miles son de USD 455.000 y USD 133.000 semanales, vale decir una razón

TABLA N°2. SOLUCIONES OPTIMAS PARA UN AVION DC-10

ESCENARIO	UTILIDAD SEMANAL MEDIA (MILES USD)	PLAN DE FRECUENCIAS TRIMESTRAL			
		I	II	III	IV
1	262	2F4-1F6	3F4	3F4	3F4
2	179	2F4-1F6	2F4-1F6	1F4-2F6	2F4-1F6
3	177	2F2-1F6	2F2-1F6	1F2-2F6	1F2-2F6
4	167	3F4	3F4	3F4	3F4
5	161	3F4	3F4	3F4	3F4
6	223	2F4-1F6	3F4	3F4	3F4
7	192	2F4-1F6	3F4	2F4-1F6	2F4-1F6
8	262	2F4-1F6	3F4	3F4	3F4
9	358	2F4-1F6	3F4	2F4-1F6	3F4
10	356	2F4-1F6	3F4	2F4-1F6	3F4
11	298	2F4-1F6	3F4	3F4	3F4
12	344	3F4	3F4	3F4	3F4

TABLA N°3. SOLUCIONES OPTIMAS PARA DOS AVIONES DC-10

ESCENARIO	UTILIDAD MEDIA SEMANAL (MILES DE USD)	PLAN DE FRECUENCIAS TRIMESTRAL			
		I	II	III	IV
1	291	2F2-3F4-1F6	2F2-3F4-1F5	1F2-3F4-2F6	1F2-3F4-1F5-1F6
2	179	2F2-3F4-1F6	2F2-3F4-1F5	1F2-3F4-2F6	1F2-3F4-1F5-1F6
3	137	2F2-3F2-2F6	3F2-1F6	1F1-3F2-2F6	3F2-1F5-1F6
4	137	2F2-3F4-1F5	3F4	2F2-3F4-1F5	3F4-1F6
5	133	2F2-3F4-1F5	3F4	3F4-2F6	3F4-1F6
6	164	2F2-3F4-1F5	3F4-1F6	3F4-2F6	3F4-1F6
7	195	1F2-3F4-2F6	1F2-3F4-1F6	1F2-3F4-2F6	3F2-3F4-2F6
8	376	5F4-1F6	6F4	5F4-1F6	5F4-1F5
9	455	1F2-3F4-2F6	2F2-3F4-1F6	1F2-3F4-2F6	1F2-3F4-2F6
10	465	2F2-3F4-1F6	2F2-3F4-1F6	1F2-3F4-2F6	1F2-3F4-2F6
11	433	2F2-3F4-1F6	2F2-3F4-1F6	1F2-3F4-2F6	1F2-3F4-2F6
12	410	2F2-3F4-1F6	2F2-3F4-1F5	1F2-3F4-1F5-1F6	1F2-3F4-2F6

de 3.42 entre ambas cifras, lo que envuelve un importante riesgo. Sin embargo, estos casos son los más improbables. Para el caso de un avión, la utilidad máxima se da para aumento de demanda, y la mínima para aumento de costos. Los valores son de USD 358.000 y USD 161.000 semanales respectivamente, siendo la razón entre ambas de 2.22. Evidentemente el riesgo es menor que si se tienen 2 aviones.

Es importante destacar que todos los vuelos de los planes óptimos llegan hasta Nueva York para la flota de un avión, y casi todos para la flota de dos aviones. Esto se debe a que en los mercados con dicha ciudad, LAN enfrenta una menor competencia, y así, a pesar de no tener derecho a tráfico entre Miami y Nueva York, resulta conveniente continuar el vuelo aprovechando los pasajeros con destino a Nueva York que embarcan más al Sur (Lima y Santiago).

Por otra parte, se aprecia que los planes óptimos de frecuencia con dos aviones incluyen todos aquellos vuelos contemplados para la flota de un avión, limitándose solamente a aumentar algunas frecuencias. Como un plan incluye al otro, en caso de devolución o falla de un avión, se puede pasar de una solución óptima a la otra disminuyendo las frecuencias correspondientes según el escenario. Lo anterior representa ciertamente una ventaja pues asegura la estabilidad del plan de frecuencias, y por lo tanto de los mercados involucrados. También puede calcularse la pérdida o beneficio asociado a la devolución de un avión para un determinado escenario.

Para el caso de un avión, el plan óptimo es relativamente constante a lo largo del año, en cada escenario. Los planes para cada trimestre, o constan de tres F4, o bien de dos F4 y un F6, salvo el caso de no poder aterrizar en Lima, o no poder llevar pasajeros entre Lima y Miami. Sin embargo, conviene que el itinerario sea muy estable, para que la presencia en el mercado también lo sea, por lo que será preferible contar con tres F4 todo el año, o dos F4 y un F6 antes que alternarlos. De esta manera se evitará tener un servicio intermitente a Caracas.

En el caso de dos aviones, el plan de frecuencias es también relativamente estable para todos los escenarios, salvo en algunos casos el segundo trimestre (escenarios cuatro y cinco). También se aprecia que siempre hay vuelos a Caracas, con excepción del segundo trimestre en los escenarios mencionados. Al igual que en el caso de un avión, es conveniente mantener estables los vuelos a Caracas durante todo el año. Cabe destacar también que en el caso de dos aviones no figuran vuelos del tipo F3, lo que indica que conviene, al igual que en corto plazo, aprovechar todas las paradas en Lima con vuelos hasta Nueva York.

Por otra parte, también para una flota de dos aviones, existen siempre tres vuelos F4, salvo en el caso en que no se pueda parar en Lima o que el número de paradas sea ilimitado. A este respecto se aprecia que la restricción de paradas en Lima es activa, ya que al quitarla, se realizan seis vuelos F4 el segundo trimestre y cinco, en los otros. Nuevamente cabe destacar que bajo este escenario se descontinúan los vuelos a Caracas el segundo trimestre lo cual no es conveniente en términos de mercado, siendo preferible mantener cinco vuelos F4, y uno por Caracas todo el año (alterando sólo el segundo trimestre). Este vuelo por Caracas puede ser alternadamente del tipo F6 o F6, según el trimestre.

Finalmente, cabe destacar que se realizan más vuelos en el plan óptimo de mediano plazo, que en el de corto plazo, para dos aviones, a pesar de que en el mediano plazo los costos variables son mayores. Esto obedece a que en el mediano plazo la función de participación tiene una mayor pendiente en la región de operación y así el beneficio marginal de nuevos vuelos es también mayor.

Los casos presentados anteriormente consideran la variación de un solo parámetro a la vez y además dicha variación se realiza por igual en todos los mercados, e en todos los vuelos según sea el caso. Sin embargo, el modelo sirve como base para estudiar situaciones en que varían dos o más parámetros simultáneamente, y en distinta forma para cada mercado o cada vuelo. Asimismo permite analizar la influencia que tendrían en los planes óptimos, variaciones en la función de participación. Esto es importante puesto que esta función puede ser cambiada por medio de un esfuerzo de marketing. Así el modelo, para el mediano plazo, puede servir de apoyo a la toma de decisiones como son flota óptima, plan de frecuencias, contrato de tripulación, programas de mantenimiento y estrategias de marketing. Para ello deberá estudiarse los planes de frecuencia óptimos correspondientes a las expectativas del momento y asignar las probabilidades pertinentes a los escenarios de interés.

REFERENCIAS

1. Maurice Pollak: "Some Elements of the Airline Fleet Planning Problem", Transportation Research Vol. 11, 1977.
2. Simat-Helliesen & Eichner, Inc.: "Long Range Fleet Planning Study" (estudio realizado para LAN Chile en 1980).
3. Staff LAN Chile: "Optimización del Uso de la Flota Boeing 707 de LAN Chile, 1979.

Nota: Toda la información referente a costos e ingresos de la empresa LAN Chile, ha sido modificada de modo de preservar su confidencialidad, pero sin alterar los planes óptimos de frecuencia que entrega el modelo.