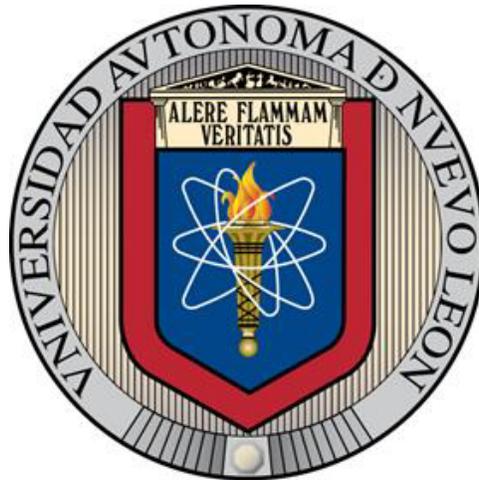


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



TESIS

**OPTIMIZACIÓN EN LA ASIGNACIÓN DE
AERONAVES PARA RUTAS AÉREAS: CASO DE UNA
AEROLÍNEA COMERCIAL MEXICANA**

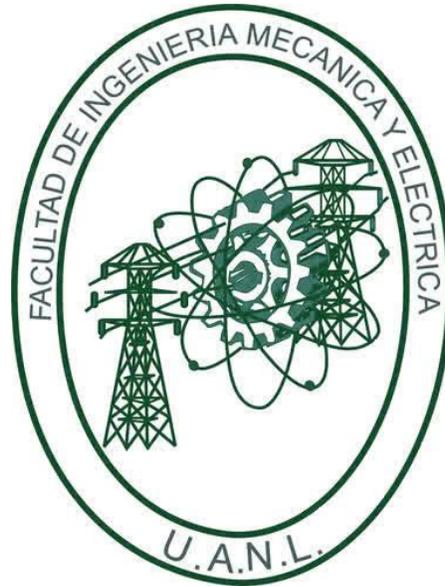
POR

LUIS DANIEL PRIEGO CABRERA

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO**

MAYO, 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



TESIS

**OPTIMIZACIÓN EN LA ASIGNACIÓN DE
AERONAVES PARA RUTAS AÉREAS: CASO DE UNA
AEROLÍNEA COMERCIAL MEXICANA**

POR

LUIS DANIEL PRIEGO CABRERA

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO**

MAYO, 2018

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Optimización en la asignación de aeronaves para rutas aéreas: caso de una aerolínea comercial mexicana», realizada por el alumno Luis Daniel Priego Cabrera, con número de matrícula 1837262, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

El Comité de Tesis



Dr. Miguel Mata Pérez

Asesor



Dra. Jania Astrid Saucedo Martínez

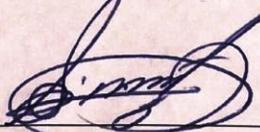
Revisor



Mtro. Jose Roberto Vasquez Ruiz

Revisor

Vp. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirección de Estudios de Posgrado



San Nicolás de los Garza, Nuevo León, mayo 2018

DEDICATORIA

Principalmente le dedico este trabajo a Dios, por darme la capacidad y oportunidad de superarme y cumplir mis objetivos.

A mi mamá Areli por su amor, por su apoyo incondicional y por creer en mí toda la vida.

A mi abuelita Mirely porque ha sido un pilar fundamental mi vida y una fuente de motivación.

A mi novia Yissel que a pesar de la distancia siempre estuvo acompañandome y apoyandome en esta etapa de mi vida.

A mis tíos Pedro y Beatriz que en todo momento se preocuparon mí y tuvieron la disposición de apoyarme.

A mis amigos que siempre me acompañaron y estuvieron al pendiente de mí.

ÍNDICE GENERAL

Dedicatoria	IV
Agradecimientos	x
Resumen	xii
1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	3
1.1.1. Situación actual	4
1.2. Objetivo	4
1.3. Justificación	4
1.4. Hipótesis	5
1.5. Estructura de la tesis	6
2. Antecedentes	7
2.1. Problema de asignación de flota	7
2.1.1. Características del problema de asignación de flota	8

2.1.2. Problema de asignación de tripulación	11
2.2. Modelos de asignación de flota	11
2.3. Conclusión del capítulo	22
3. Metodología	23
3.1. Planteamiento del problema	24
3.2. Revisión de la literatura	25
3.3. Modelación del problema	25
3.3.1. Supuestos del modelo	26
3.3.2. Conjuntos	27
3.3.3. Parámetros	27
3.3.4. Variables	28
3.3.5. El modelo	28
3.3.6. Restricciones	29
3.3.7. Particularidades del modelo	30
3.4. Programación del modelo	31
3.5. Validación del programa	31
3.6. Implementación del programa	31
3.7. Análisis de resultados	31
4. Resultados	33
4.1. Validación del programa	33

4.2. Resultados del caso de estudio	36
5. Conclusiones	38
5.1. Interpretación de resultados	38
5.2. Contribuciones a la logística	39
5.3. Trabajos a futuro	40

ÍNDICE DE FIGURAS

3.1. Metodología propuesta	24
4.1. Ubicación de los aviones durante la ejecución del modelo	34

ÍNDICE DE TABLAS

4.1. Resultados de la validación	35
4.2. Resultados del caso de estudio	37

AGRADECIMIENTOS

Principalmente le doy gracias a Dios por darme la vida, y con ella, la oportunidad de haber vivido esta gran etapa en mi vida.

A mi mamá por su apoyo constante e incondicional durante todo momento en mi vida.

A mi abuelita y mis tíos por darme su apoyo como familia.

A mi novia Yissel por su amor, su apoyo y la motivación para lograr este objetivo.

A mi tutor de tesis el Dr. Miguel Mata Pérez por la confianza que me tuvo para realizar este proyecto, por el tiempo dedicado al desarrollo de esta obra y por aportar su gran experiencia para que se pudieran alcanzar los objetivos.

A la Dra. Jania Astrid Saucedo Martínez por su apoyo durante toda mi estancia en el posgrado.

A mi compañero y amigo Roberto, por compartir su experiencia, aconsejarme y aceptar formar parte de este proyecto.

A todos mis profesores por sus enseñanzas y su disposición de contribuir a mi formación.

A la FIME apoyarme con una beca, por brindarme todas las facilidades y hacer más grata mi experiencia durante el transcurso del posgrado.

Un agradecimiento especial al CONACYT por brindarme una beca, sin ellos no hubiera sido posible llegar hasta aquí y cumplir este reto.

A la UANL por la beca ofrecida y por ser la institución que hizo posible cumplir este sueño.

A mis compañeros que en todo momento me apoyaron e hicieron más agradable mi estancia en la maestría.

Y por último, un agradecimiento a todas aquellas personas que en algún momento pusieron su granito de arena para apoyarme y hacer esto posible.

RESUMEN

Luis Daniel Priego Cabrera.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: OPTIMIZACIÓN EN LA ASIGNACIÓN DE AERONAVES PARA RUTAS
AÉREAS: CASO DE UNA AEROLÍNEA COMERCIAL MEXICANA.

Número de páginas: 43.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: Los costos de operar una aerolínea tradicional son muy elevados, uno de los costos que generan un mayor impacto y que representa aproximadamente una tercera parte del total de los costos, es el combustible, el cual está estrechamente ligado a los costos operativos de flota, y a su vez, la actividad que está fuertemente relacionada a estos costos, es el proceso de asignación de flota, es decir, el proceso en el cual se determina qué aeronave va a cubrir cada ruta.

En la etapa de asignación, al ser una actividad operativa, cualquier desviación en su planificación puede afectar la eficiencia de las operaciones, tanto en términos operacionales como en términos económicos. Es importante entender que la asignación de flota también puede llegar a depender de factores relacionados con el marco

legal de la aviación comercial, a su misma vez, depende de las características naturales de las rutas que se tengan planificadas en el itinerario.

En México las aerolíneas de bajo costo representan un mercado muy importante para la transportación de pasajeros y además, es un sector que se encuentra en constante crecimiento. Para este proyecto se tomará como caso de estudio a una aerolínea comercial mexicana de bajo costo con base de sus operaciones en el Aeropuerto Internacional de Monterrey.

Este trabajo busca optimizar el proceso de asignación de la flota de aeronaves con las que cuenta una línea aérea para llevar a cabo los vuelos marcados en su itinerario a través de una herramienta cuantitativa que garantice el servicio, un mejor uso de los recursos y minimice los costos.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: El principal aporte de este proyecto a la logística parte de la importancia de entender la manera en que impacta el hecho de tener el mejor recurso disponible, en el momento adecuado y en el lugar correcto. La herramienta utilizada en este proyecto garantiza ofrecer el servicio al asignar la mejor aeronave a cada uno de los vuelos marcados en el itinerario y al mismo tiempo garantizando que la operación se lleve a cabo con el menor costo posible. A su vez, al encontrar vuelos de relocalización dentro de la solución óptima, representa una oportunidad económica si se considera que estos vuelos podrían incorporarse al itinerario habitual dentro de las operaciones futuras de la empresa.

Se formuló un modelo matemático que ayuda a optimizar el proceso de asignación de las aeronaves. Este trabajo puede ser aplicado en cualquier aerolínea que tenga distintos tipos de flota y que desee asignarlas de manera óptima para cubrir sus itinerarios. El modelo garantiza que se se cumpla el servicio planeado en el itinerario. De igual forma, al ser programada computacionalmente para su cálculo, tuvo unos tiempos de ejecución lo suficientemente rápidos como ser una herramienta de reacción ante una eventualidad que impida el uso de los recursos planeados y exista la necesidad de asignar nuevamente los aviones que estén disponibles.

Firma del asesor: _____
Dr. Miguel Mata Pérez

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La presente tesis aborda el problema de la asignación de aeronaves a las rutas aéreas. En la actualidad, por las condiciones de la industria aeronáutica es muy difícil que las aerolíneas comerciales puedan conformar su flota de manera homogénea, cada avión tiene características muy particulares, dentro de ellas podemos destacar su capacidad, su alcance y su costo operativo. El problema de asignación se centra en la ponderación de qué tipo de aeronave debe ser designada para cubrir cada ruta para garantizar que se están disminuyendo los costos operativos.

La aviación comercial constituye uno de los principales medios de transporte en México y se destaca principalmente por su rapidez. Las líneas aéreas comerciales llevan a cabo rigurosos análisis multidisciplinarios para determinar las rutas aéreas que van a operar, donde toman en cuenta la capacidad y alcance de su flota. Una vez que se definen las rutas que se van a operar, la planificación no termina ahí, el siguiente paso es la organización de actividades relacionadas a la asignación de aeronaves. En esta etapa se define qué tipo de aeronave cubrirá los vuelos que se planificaron. Este proceso es de vital importancia para cualquier aerolínea debido a que su correcta asignación y ejecución impacta directamente en el desempeño de toda la empresa.

La cadena de suministro de una aerolínea puede ser vista desde su horizonte

de planeación donde en el plano estratégico una aerolínea tiene que establecer donde podrá la base de sus operaciones, el tipo de servicio que va a ofrecer, los destinos a donde desea ofrecer su servicio y sobre todo la cantidad y tipo de flota con la que debe contar para llevar a cabo sus operaciones. En etapa táctica la aerolínea debe programar su itinerario, realizar las actividades relacionadas con la promoción y venta del servicio así como también programar los suministros para llevar a cabo los mantenimientos de la flota. Por último en el horizonte operativo, es donde se llevan a cabo las actividades del día, es decir, donde se efectúan todos los vuelos programados en el itinerario, es aquí, donde entra el proceso de asignación que es donde se decide qué aeronave cubrirá cada ruta marcada en el itinerario.

En la etapa de asignación, al ser una actividad operativa, cualquier desviación en su planificación puede afectar la eficiencia de las operaciones, tanto en términos operacionales como en términos económicos. Es importante entender que la asignación de flota también puede llegar a depender de factores relacionados con el marco legal de la aviación comercial, a su misma vez, depende de las características naturales de las rutas que se tengan planificadas en el itinerario.

En México las aerolíneas de bajo costo representan un mercado muy importante para la transportación de pasajeros y además, es un sector que se encuentra en constante crecimiento. Para este proyecto se tomará como caso de estudio a una aerolínea comercial mexicana de bajo costo con base de sus operaciones en el Aeropuerto Internacional de Monterrey.

En el presente trabajo se planteará un modelo matemático a través del cual se buscará encontrar la forma óptima de asignar la flota disponible, compuesta por las aeronaves descritas anteriormente, para cubrir las rutas que se operan actualmente, buscando en primera instancia reducir los costos operativos mejorando el rendimiento de dichos recursos.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los costos de operar una aerolínea tradicional son muy elevados, uno de los costos que generan un mayor impacto y que representa aproximadamente una tercera parte del total de los costos, es el combustible, el cual está estrechamente ligado a los costos operativos de flota, y a su vez, la actividad que está fuertemente relacionada a estos costos, es el proceso de asignación de flota, es decir, el proceso en el cual se determina qué aeronave va a cubrir cada ruta.

La decisión de asignar una aeronave a una ruta es demasiado compleja, porque se tienen que tomar en cuenta muchos factores. Inicialmente la cantidad de combinaciones que pueden ser posibles es cada vez mayor entre más rutas y más destinos se tengan, es decir las múltiples combinaciones incrementan el grado de dificultad para realizar un plan de vuelo. Los tiempos de vuelos tienen que ser tomados en cuenta de la manera más precisa posible y sin dejar atrás los tiempos que una aeronave debe pasar en tierra para realizar carga de combustible, desembarco y abordaje de pasajeros. Otro factor muy importante es que las horas para operar los vuelos están condicionadas a los horarios de operación de cada aeropuerto así como a la disponibilidad y a los permisos para efectuar despegues o aterrizajes conocidos como *slots*.

Entonces tenemos que el proceso de asignación es una actividad clave que si no se realiza de una manera adecuada provoca un incremento en los costos operativos, por lo que para realizar este tipo de actividad se necesita una herramienta que brinde la mejor solución posible para este proceso y que respalde el proceso de toma de decisión en la asignación de cada aeronave de la flota.

1.1.1 SITUACIÓN ACTUAL

El caso de estudio es una aerolínea comercial mexicana de bajo costo con base de sus operaciones en el Aeropuerto Internacional de Monterrey, y que adicionalmente tiene cuatro bases secundarias ubicadas en la Ciudad de México, Guadalajara, Cancún y Tijuana. La empresa actualmente cuenta con una flota de 24 aeronaves del fabricante europeo Airbus modelo 320, 22 de ellas en su modelo tradicional CEO (que por siglas en inglés significa *Classic Engine Option*) y 2 en la versión más eficiente NEO (*New Engine Option*). Las segundas ofrecen un costo operativo del 8 % menor con respecto a las primeras. Con esta flota se ofrece servicio a un total de 30 destinos nacionales y 5 destinos internacionales para operar un total de 97 rutas comerciales. Desde su principal base de operaciones en el Aeropuerto Internacional de Monterrey se operan un total de 23 rutas que representan el 23.71 % del total de rutas de la aerolínea.

1.2 OBJETIVO

Optimizar el proceso de asignación de flota para operar un conjunto de rutas definidas por un caso de estudio, teniendo como principal objetivo la minimización de los costos operativos. Se utilizarán los conceptos de investigación de operaciones y se evaluarán los resultados a través de una herramienta cuantitativa que permita determinar la asignación.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El establecimiento de rutas aéreas comerciales requiere de rigurosos análisis multidisciplinarios que engloban diversos factores. Una vez que una aerolínea ha definido una ruta, el siguiente proceso es la planificación de las aeronaves que cubrirán

cada ruta, es decir, el proceso de asignación de flota. Mercier *et al.* (2005), mencionan que el costo del combustible representa el 33 % de los costos totales de una aerolínea tradicional, dentro de este contexto, la correcta planificación táctica del proceso de asignación de flota, impacta directamente en la eficiencia operacional de toda la empresa, es por esto que la correcta gestión de esta etapa es un factor clave para el buen desempeño. Para poder planificar adecuadamente el proceso de asignación, es necesario tomar en cuenta las características de las rutas que se desean operar y de la flota con la que se pretende volar, también es necesario evaluar condiciones como los tiempos de recorrido y otras particularidades que podrían afectar la asignación, como por ejemplo; los aeropuertos donde se requiere de un mayor tiempo para la ruta debido al tránsito aéreo y/o acuerdos de horarios para volar.

La asignación de aeronaves es un proceso clave dentro de cualquier aerolínea debido a que en esta fase se gestionan los activos más valiosos de una empresa, conformados por sus aviones. Por tanto este proceso no puede ser designado deliberadamente, en esta etapa cualquier desviación en su planificación puede afectar directamente la eficiencia de las operaciones, tanto en términos logísticos como en términos económicos. El correcto establecimiento de un proceso de asignación puede minimizar los costos operativos y mejorar el desempeño operacional de una aerolínea.

1.4 HIPÓTESIS

Mediante los conceptos de investigación de operaciones que permiten evaluar los resultados de una herramienta cuantitativa y tomando en cuenta los factores que influyen en el proceso de asignación de flotas dentro de las líneas aéreas comerciales, se podrá determinar la asignación óptima de una flota a un conjunto de rutas garantizando que se minimicen sus costos operativos

1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS

La presente tesis se presenta de la siguiente forma: El capítulo 1 está compuesto por la introducción, en ella se visualizarán la descripción del problema, el objetivo, la justificación y la hipótesis, explicando brevemente en que consiste el proceso de asignación de aeronaves.

En el capítulo 2, se presentarán los antecedentes y el marco teórico detallando la manera en que se ha planteado el problema de asignación de flota y la manera a través de la cual han logrado resolverlo, también se introducirá la situación actual de la aerolínea que se tomará como caso de estudio para efectos de análisis.

En el capítulo 3, se detallará la metodología que se seguirá para poder alcanzar los objetivos planteados.

En el capítulo 4, se explicará la manera en que se aplicó el modelo al caso de estudio, se visualizarán los resultados obtenidos y se dará una reseña explicando los mismos.

Por último, en el capítulo 5, se definirán las conclusiones, se mencionarán las aportaciones y el posible trabajo a futuro.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

En este capítulo se hablará de uno de los problemas fundamentales de la optimización combinatoria, el problema de asignación. Este trata de asignar, para cada caso concreto, la mejor persona o recurso para realizar un trabajo determinado con el menor costo posible.

Este problema se traslada a la industria aérea con el problema de asignación de flota. La asignación de flota supone una tarea muy importante en las líneas aéreas, ya que si se gestiona de una forma eficiente, se pueden reducir los costos asociados a las operaciones y así conseguir aumentar los beneficios de una aerolínea tradicional.

2.1 PROBLEMA DE ASIGNACIÓN DE FLOTA

El problema de asignación de la flota, denominado FAP (por sus siglas en inglés *Fleet Assignment Problem*) se refiere a la asignación de tipos de aeronave, cada uno con una capacidad y características diferentes, a los vuelos programados, en función de las facultades y disponibilidades del equipo, los costos operativos y los ingresos potenciales (Sherali *et al.*, 2006).

El problema de asignación de flota es precisamente complejo por el hecho de que debe tener en cuenta muchas variables y también porque debe ser lo suficientemente

dinámico y rápido para adaptarse al tiempo real. Se trata básicamente de, una vez determinados los horarios de los vuelos, ver qué aeronaves asignamos a cada uno de los vuelos, teniendo en cuenta las limitaciones de cada tipo de avión (capacidad de pasajeros, alcance, límites operacionales, límites de mantenimiento, etc.) y tratando de encontrar la mejor solución posible.

De esta forma, vemos que los modelos de asignación de flota que están destinados a resolver este problema buscan resolverse de forma relativamente rápida, ya que de lo contrario su efectividad para la aplicación operacional sería nula. Dentro de la literatura algunos autores mencionan que podría ser interesante contar con un algoritmo para medio plazo y método exacto para el corto plazo para cuando se requiera una solución al momento, que está sea óptima.

Por consiguiente, la importancia de la Investigación Operativa aplicada a este tema es atenuar y minimizar estos factores que causan los retrasos en los vuelos por medio de la implementación de modelos que buscan lograr la mejor toma de decisiones.

2.1.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROBLEMA DE ASIGNACIÓN DE FLOTA

Para entender realmente el problema de asignación de flota se debe establecer un marco conceptual que describa en qué consiste este proceso y qué actividades tiene asociadas. El conjunto de actividades que componen el proceso de planificación operacional de una compañía aérea generan la base central de su estrategia, al fijar el conjunto de mercados a los que se dirige, con qué frecuencia operarlos y en qué horarios hacerlo. Por supuesto, todo esto contempla una serie de restricciones tanto internas como externas que tiene una aerolínea.

La bibliografía revisada se basa en artículos de asignación de flotas aéreas. En

estos artículos se menciona que se desconoce algún estudio que haya planteado el problema asignación de flotas aportando una mejora a las fases previas de este proceso. De hecho, algunos autores consideran que el problema completo de planificación operacional de una aerolínea es computacionalmente intratable y que por tanto debe descomponerse en varios problemas para poder resolverse, uno de estos problemas es precisamente el problema de asignación de flotas.

Abara (1989); Allung *et al.* (2014); Barnhart y Smith (2012); Belanger *et al.* (2003); Cheng *et al.* (2014); Ioachim *et al.* (1999); Li y Tan (2013); Martín *et al.* (2008); Rosenberg (2004); Sherali *et al.* (2006); Lohatepanont (2002); Venkata *et al.* (2005); Sherali y Zhu (2006); Toth y Vigo (2014); Lohatepanont y Barnhart (2004); Hane *et al.* (1995) han ayudado a entender las metodologías, modelos y aproximaciones usadas, consiguiendo así dar un nuevo enfoque al problema. Estos autores parten de los siguientes datos: análisis histórico de rutas, cambios en el entorno competitivo, la capacidad de los mercados, los planes de crecimiento de las compañías aéreas, previsiones estratégicas y los procesos de definición de itinerarios a operar. Esto implica definir los aeropuertos que una aerolínea está interesada a cubrir además de posteriormente, establecer las horas de salida, llegada y frecuencias de vuelos. El resultado de esta actividad marca el plan comercial de la aerolínea, por lo que es el pilar donde se basan los principales ingresos de la aerolínea y, además, permite la competitividad de la empresa. Esta es una actividad que se lleva a cabo con una antelación de entre 12 y 18 meses antes de la salida de los vuelos. Como se ha mencionado anteriormente, tanta antelación en las previsiones hacen que, en el día de operaciones, la demanda real difiera mucho de la prevista, por lo que puede provocar que un vuelo que era óptimo operacional y económicamente para la empresa, ahora no lo sea.

Una vez que se ha definido el conjunto de vuelos a operar, hay que asignar un tipo de avión a cada vuelo. El objetivo del problema, parte de la idea de maximizar los ingresos de la aerolínea, aunque esta idea se trabaja bajo una concepción diferente, la de minimizar los costos a través de la maximización del uso de aeronaves.

Entonces, objetivo real es buscar una asignación óptima de la flota que cubrirá las rutas programadas minimizando el uso de la misma.

Desde un punto de vista conceptual, los asientos de avión son el producto de una aerolínea. Al igual que cualquier otro producto, una mayor cantidad asegura las ventas, mientras que el inventario adicional incurre en costos. Para las compañías aéreas, la provisión de mayores capacidades implica mayores costos operativos. Por otro lado, los asientos de avión son «percederos», es decir, los asientos no vendidos en la salida de un vuelo se desperdician. Por lo tanto, la estrategia ideal es proporcionar sólo el «número correcto» de asientos a los pasajeros al «precio justo» (Sherali *et al.*, 2006). El primero de estos dos ideales es abordado por el proceso de asignación de la flota, que es el tema del presente documento, mientras que el segundo cae en el ámbito de la gestión del rendimiento de los ingresos.

El problema de asignación de flota real contempla diversas restricciones, por ejemplo, la flota está limitada a los tipos de aeronave de que dispone la compañía y a la necesidad de conservar un balance de cada tipo de avión en cada aeropuerto base. Este último, es un factor muy relevante de cara a garantizar que el programa de vuelos sea operativamente factible, ya que permite satisfacer la disponibilidad de la misma cantidad de cada tipo de avión en cada uno de los aeropuertos en los que una compañía aérea tiene una base.

Una vez que ya se ha asignado el tipo de avión que debe operar cada vuelo, se debe asignar qué avión exactamente operará cada vuelo. De esta manera, se contemplan restricciones como las necesidades de mantenimiento y revisiones obligatorias para cada avión, así como los tiempos de escala necesarios. En esta fase se consigue determinar qué avión vuela cada ruta, cumpliendo con las restricciones mencionadas. Esta es la última fase del proceso, y a menudo se realiza una semana antes del vuelo.

2.1.2 PROBLEMA DE ASIGNACIÓN DE TRIPULACIÓN

Un problema subsecuente de la asignación de flotas es la asignación de tripulación, esta actividad tiene por objetivo asignar las tripulaciones (tanto auxiliares como técnicos) que han de operar cada uno de los vuelos planificados en la etapa de programación de vuelos, de forma que se minimicen los costos. A la asignación de flota le afectan una gran cantidad de restricciones, tanto operacionales como legales, que dificultan realmente una solución óptima y por lo cual muchos investigadores han trabajado en este problema. Para llevar a cabo esta actividad se deben tener en cuenta aspectos como los períodos máximos de actividad que regulan los organismos oficiales, los descansos obligatorios, periodos no lectivos o de formación, certificaciones de tipo de aeronave, etc.

Cuando se trabaja con flotas heterogéneas, la asignación de tripulación se vuelve un proceso más complejo debido a la restricción de que no todas las tripulaciones pueden operar todas las aeronaves, lo que significa un grado de dificultad más elevado y mayores tiempos de cálculo computacional.

En el caso de estudio analizado en el presente proyecto no se llegará hasta este proceso debido que la flota con la que se trabajará permite que cualquier tripulación pueda ser asignada a todas las aeronaves y la única restricción que posiblemente se pueda aplicar sería la cantidad de tiempo que una tripulación puede operar.

2.2 MODELOS DE ASIGNACIÓN DE FLOTA

El autor Abara (1989), en su artículo denominado «*Applying integer linear programming to the Fleet Assignment Model (FAM)*» evalúa por primera vez el problema desde un punto de vista matemático y puramente computacional. Para ello usa técnicas de programación entera mixta (MIP, por sus siglas en inglés, *mixed integer programming*) con el fin de asignar únicamente un avión a cada ruta y eva-

luando restricciones en el modelo matemático como son, el número total de aviones disponibles, capacidad, demanda, y otros factores relevantes. Además, es el primer autor que empezó a contemplar en sus restricciones las políticas de mantenimiento de las aerolíneas.

Se puede decir que Abara fue el precursor de tratar el problema computacionalmente y muchos investigadores posteriores han seguido optimizando el modelo y metodología presentada por él. Vemos pues, que este autor trabajó puramente el problema de asignación de aeronaves, sin contemplar fases previas. De modo que, intentaba solucionar el problema sin intentar optimizar las fases anteriores. Aun así, es importante mencionar que en la en la mayoría de la literatura revisada para este trabajo, los autores parten de su formulación para el desarrollo de nuevos modelos más completos y de mayor complejidad.

La tendencia de este modelo es asignar aeronaves con el menor costo operativo a las rutas más largas. Esto se logra estableciendo penalidades para la asignación de aviones pequeños a las rutas con el mayor porcentaje de tráfico. Esta característica ha ahorrado a las aerolíneas estadounidenses millones de dólares. La herramienta descrita ha sido utilizada por las aerolíneas para decisiones únicas que involucran asignación de la flota, planificación de la tripulación y desarrollo del cronograma. Esta formulación ha permitido el desarrollo de un sistema de planificación que analiza el costo de un gran número de escenarios. Los FAM son utilizados con éxito para aumentar la utilización media diaria de la flota de aeronaves. Se han reducido los costos operativos y se han incrementado los márgenes operativos. Una vez hecho esto, este tipo de herramientas pasan a ser clave para la toma de decisiones a llegan a ser utilizadas diariamente para desarrollar los programas actuales y futuros (Abara, 1989).

El primer cambio sustancial en el planteamiento de la problemática se produjo diez años después, planteado por Ioachim *et al.* (1999), el cual enfocaba el problema de la asignación de flota con ventanas de tiempo. Básicamente, este enfoque añadía

restricciones al modelo para sincronizar los tiempos de salida de un vuelo en distintos días de la semana. El propósito de estas restricciones era el de facilitar las tareas del enrutamiento de aeronaves. El cambio viene en que Ioachim, empieza a retroceder a fases anteriores de la asignación de vuelos. Entonces bien, se da cuenta que para asegurar una buena asignación de aeronaves es importante hacer una buena planificación de rutas, aunque no trabaja por completo esta fase. Simplemente manipula los horarios creados en esta fase.

Belanger *et al.* (2003), mejoraron un poco más este modelo, ya que además de evaluar ventanas de tiempo, tomaban en cuenta que los ingresos dependían del tiempo, por lo tanto, el ingreso de un vuelo depende de la hora en la que vuela. Además, cambió la metodología usada de categoría y límite, a un algoritmo de categoría y precio, demostrando que esta metodología era óptima, ya que consiguió reducir el número de aeronaves usadas.

Rosenberg (2004), planteó un modelo totalmente distinto a lo visto hasta el momento. Las aerolíneas siempre se basan en el escenario más optimista, y el que rara vez ocurre. El problema de esa concepción es que si se cancela un vuelo, también se cancela el circuito completo que lo conlleva. Por ejemplo, si se vuela de Monterrey a la Ciudad de México, de la Ciudad de México a Guadalajara y de Guadalajara a Monterrey, pero se cancela el primero de ellos, los otros tres también se cancelan. Esto afecta a todo el sistema, pues no solo se deben recolocar los pasajeros del primer vuelo, sino también los de los otros. Por supuesto, se aprecia que también se rompe la asignación de la flota de las tres rutas. El trabajo desarrollado por este autor, se basa en realizar ciclos cortos de vuelos. Esto permite minimizar las interrupciones. No es lo mismo tener que cancelar un circuito de 3 vuelos que un circuito de 8 vuelos. Los afectados serán muchos más y, consecuentemente, la aerolínea y su planificación se ve más afectada.

Por otra parte, otro detalle que se contempla es la conectividad de aeropuertos, si un circuito empieza en uno y termina en otro, y otro circuito es inverso a este,

cuando uno de esos vuelos falle, la disrupción alterará ambos circuitos. Para evitar eso, el autor presenta la idea de que los circuitos deben empezar y terminar en el mismo aeropuerto, esto ayuda a mantener el equilibrio de la red y, consecuentemente, si falta un vuelo de un circuito, ese aeropuerto puede cubrir los otros vuelos, por lo que minimiza el impacto y da alternativas. Estas ideas han sido aplicadas en el trabajo de este autor, dando pauta al término de aeropuerto aislado. Este término se basa en que, cada circuito debería empezar y finalizar en un mismo punto, aislando así los circuitos entre aeropuertos y evitando interdependencia entre circuitos aparentemente independientes. Por lo tanto, se puede afirmar que el cambio de concepción que plantea este autor, es el de que si se quiere solucionar el problema no siempre debe trabajarse sobre el escenario optimista.

En el mismo año Lohatepanont y Barnhart (2004), plantearon el problema de la programación de vuelos y la asignación de flota conjuntamente. Aquí se ve la relevancia que tuvo el modelo de Belanger *et al.* (2003), ya que demostraba que no se podía tratar la asignación sin evaluar fases anteriores, como los horarios e itinerarios que se ejecutaban, pues afectaban la demanda e incluso otros factores. Es importante resaltar, que en la literatura, ésta ha sido la única vez en la que se han tratado las dos fases conjuntamente. Su hipótesis era que si se quitaba un vuelo en la programación de vuelos, la demanda de los vuelos restantes programados cambiaba.

El punto más importante a considerar y que iba más allá respecto el modelo de Belanger *et al.* (2003), era que la demanda de pasajeros no solo se veía afectada por un simple vuelo, sino que también por el conjunto de vuelos que debía tomar ese pasajero hasta llegar a su destino final. Por lo tanto, puede pasar que, para la demanda de cada pasajero, un simple cambio en uno de los vuelos que debe tomar para llegar hasta su destino afecte a los vuelos restantes.

Por lo general, el problema de la programación de vuelos ha sido solucionado por un período de 90 días. En este proceso tan largo, un gran conjunto de eventos inesperados pueden ocurrir (retrasos, congestión de aeropuertos, dificultades técni-

cas) y la demanda puede cambiar. Por lo tanto, una programación que es óptima bajo unos ciertos supuestos puede transformarse en subóptima en frente de otro escenario o incluso no factible operacionalmente.

Venkata *et al.* (2005), ejecutaron un experimento basado en computación estadística, con el fin de acercarse a una solución realista del problema de asignación de flota. Para ello, desarrollaron el concepto de despacho impulsado por la demanda D3 (por sus siglas en inglés, *Demand Driven Dispatch*) con el fin de cuadrar la demanda de un avión cerca de la fecha de salida del vuelo. Este proceso usaba dos fases de toma de decisiones:

- La primera se desarrollaba 90 días antes del día de salida, justamente cuando la programación de vuelos se publica. En esta fecha se asignaban los aviones que poseían un mismo modelo de cabina a la tabla de tiempo de la aerolínea, ya que estos eran los que podían ser manipulados por una misma tripulación.
- La segunda fase se lleva a cabo 2 semanas antes del vuelo, cuando un alto porcentaje de la demanda se ha realizado. En esta fase se usan técnicas de intercambio.

Un ejemplo de este proceso sería que para un vuelo en la fase 1 le asignamos el Airbus 320 y el Airbus 321, que tienen la misma cabina y, por eso cualquier tripulación que sea apta para uno de los dos podrá llevar el otro. Posteriormente, en la segunda fase donde la demanda realizada puede llegar a ser más elevada que la esperada, se procede a asignar la aeronave Airbus 321, ya que presenta una mayor capacidad. De esta manera se facilitan las tareas de asignación y podemos ajustar cerca del día de operación, minimizando el efecto de la incertidumbre que todos los otros modelos no evaluaban de ninguna manera. Este planteamiento otorga una buena idea de lo que puede hacerse posteriormente con un algoritmo de estas características.

Belanger *et al.* (2006), nuevamente utilizó un modelo matemático de estructura de red multiartículo no lineal y un concepto de homogeneidad para aproximación

heurística. En este modelo se plantea una solución del problema tomando como condición que se asignará el tipo de avión del que se consiga el mayor beneficio por vuelo. En esta ocasión se reforzó el planteamiento realizado por Venkata *et al.* (2005), además de considerar los siguientes factores: ventanas de tiempo de salida, trayectos cuya duración dependa del tipo de avión asignado y el principio de homogeneidad, aplicado para asignar siempre el mismo tipo de avión para cada trayecto concreto, independientemente de su fecha de realización.

En ese mismo año, Sherali y Zhu (2006), añadieron un grado más de dificultad en la resolución del problema. Ellos enfocaron su trabajo en un entorno aún más realista, incorporando a su modelo la demanda estocástica de pasajeros. Para ello, utilizan el conocido efecto de la red, éste básicamente indica que dependiendo de la conectividad entre diferentes vuelos, la demanda varía. Esta idea se basa en que la demanda real se ve afectada por el conjunto de los vuelos y no sólo por el vuelo que tomará el pasajero en cuestión. Por ejemplo, si hay 5 vuelos que se dirigen a nuestro depósito, los cuales presentan un factor de carga del 50 %, no se puede suponer que el vuelo que sale del depósito hacia otro aeropuerto llegará a tener un 100 % de *load factor* aunque nuestras previsiones así lo indiquen. En otras palabras, hay interdependencia entre las diferentes rutas y eso afecta al conjunto de la demanda de cada vuelo. Por eso no se puede trabajar con valores esperados de demanda, sino que se debe trabajar con valores próximos y, por lo tanto, en los cálculos se debe poder demostrar la variabilidad de ese valor. Para representar todas estas observaciones en su modelo, los autores consideraron varios mercados potenciales, es decir, escenarios, para dar la mayor flexibilidad posible al proceso de asignación de aeronaves. Así pues, siguieron un proceso parecido al ya existente hasta el momento, pero aportando una mayor flexibilidad al modelo a través de la contemplación estocástica de la demanda. Para ello usaban dos fases, la primera contemplaba diferentes escenarios y los solucionaba. La segunda fase, era una fase de optimización para cada escenario en la que se llevaba la solución hasta sus límites, cada escenario contemplaba la asignación de una flota. En su caso de estudio mejoraron un 1.7 % los beneficios,

lo que se tradujo en 120 millones de dólares al año. Los tiempos de computación también fueron razonables por los equipos informáticos de aquel entonces. Tardaban entre 4 y 12 horas para solucionarlo. Lógicamente, el modelo presentaba muchas restricciones y un volumen de información muy grande, por lo que el tiempo de ejecución no fue razonable, más si se contempla la mejora económica producida.

También Sherali *et al.* (2006), nos proporcionan la siguiente terminología usada en el planteamiento de los problemas de asignación de flota como lo son:

- *Fleet type* (tipo de avión): Un cierto modelo de avión, como los Airbus 320 NEO y 320 CEO. Todas las aeronaves del mismo tipo, tienen la misma configuración de cabina, requisitos de calificación de la tripulación, y requisitos de mantenimiento.
- *Fleet family* (familia de aviones): Un conjunto de tipos de aeronave, cada uno con la misma configuración de cabina y requisitos de calificación de tripulación. Por lo tanto, la misma tripulación puede volar cualquier tipo de avión de la misma familia. Un ejemplo de una familia de aviones es la familia Boeing 757/767, que consta de varios tipos de aeronaves, como el B757-200 y el B767-300, con rangos de capacidad entre 186 y 255 pasajeros.
- *Leg* (trayectoria de vuelo): Un segmento de ruta de un aeropuerto de salida a aeropuerto de destino que comienza en una hora específica y conecta dos puntos de una ruta, es decir, abarca el viaje desde el momento en que una aeronave despegue hasta que aterriza.
- *Path* (itinerario): Secuencia de una o más rutas de vuelo entre un origen y un destino específicos, comenzando en una hora de salida específica. Por lo tanto, puede haber múltiples itinerarios entre cada par origen-destino.
- *Through flight* (vuelo de paso): Dos o más trayectorias de vuelo que son capaces de ser operadas por el mismo avión. A través de los vuelos son atractivos para los clientes que vuelan múltiples rutas entre sus orígenes y destinos, porque, a

pesar de que los aviones hacen escalas, pueden permanecer en el mismo avión hasta que lleguen a su destino final.

- *O-D*: Un par origen-destino que corresponde a una trayectoria.
- *Fare class* (clase tarifaria): Un tipo particular de restricción de tarifa. Por ejemplo, una tarifa Y es la tarifa sin restricciones (es decir, después de la compra, el día de salida se puede cambiar sin penalización), mientras que una tarifa W es más restringida (es decir, el día de salida sólo se puede cambiar incurriendo en una penalización y el boleto debe ser comprado por lo menos dos semanas antes de la salida del vuelo).
- *Turn-time* (tiempo en turno): El tiempo mínimo que necesita un avión entre su hora de aterrizaje y el siguiente tiempo de despegue. Esto incluye el tiempo para algunas inspecciones menores, preparación de la aeronave para su próximo viaje, y su movimiento en la pista. El tiempo en turno depende de las aeronaves y aeropuertos, y típicamente es aproximadamente entre treinta y cuarenta minutos para vuelos domésticos.

Posteriormente Martín *et al.* (2008), consiguieron una solución al problema de asignación utilizando un algoritmo de optimización por colonia de hormigas, en este caso tomaron en cuenta como objetivos principales el conseguir modelar el problema de asignación de flotas de forma que se puedan introducir todos aquellos eventos y requerimientos que puedan surgir en una situación en tiempo real. Adicionalmente, plantearon resolver el problema obteniendo soluciones óptimas o cercanas a la mejor solución en un tiempo razonablemente pequeño. Así pues, modelaron el problema tomando en cuenta las siguientes características: se generalizan las ventanas de salida, se permite la modificación de los tiempos de duración de los trayectos para un mismo tipo de aeronave, se permite la introducción de restricciones que simulan las preferencias de salida y se aplican relaciones de precedencia entre los diferentes trayectos. Para demostrar la eficacia de su solución plantearon 3 conjuntos de datos (20

rutas, 106 rutas y 412 rutas) y se resolvieron utilizando su algoritmo y programación lineal.

Según las soluciones obtenidas, en el primer caso (solamente 20 trayectos), la programación lineal es el método más eficiente (encuentra la solución óptima en poco tiempo). Sin embargo, en los otros dos casos, que se aproximan más a una situación real, el algoritmo de colonia de hormigas encuentra soluciones muy próximas a la óptima manteniendo un tiempo de resolución corto, mientras el tiempo de solución de la programación lineal aumenta hasta resultar inútil para su aplicación en casos reales.

Unos años más tarde Barnhart y Smith (2012), realizaron la edición de un libro llamado *Quantitative problem solving methods in the airline industry*. En él se plantea la dificultad real que sostenía la resolución de un problema de estas características, y es que las soluciones rentables requieren previsión de las condiciones generales del mercado: precio del combustible y de las tripulaciones, así como el nivel y la naturaleza de la competencia.

Las aerolíneas abordan muchos temas de programación (asignación de aviones y tripulaciones a un vuelo, enrutamiento de aviones a las bases de mantenimiento) con técnicas de optimización combinatoria a gran escala. El tamaño de las aerolíneas de hoy en día hace que cada vez sea más difícil este problema. Por ejemplo, las grandes compañías nacionales de Estados Unidos operan más de 3.000 vuelos al día con 600 o más aeronaves y pueden incluir más de 300 ciudades, sirviendo a más de 10.000 mercados únicos.

En el libro Barnhart y Smith (2012), se planteaba una solución sólo al problema de la generación de itinerarios, y no evaluaba la flota asignada a cada vuelo. En primer lugar, un algoritmo de generación de itinerarios se utiliza para construir itinerarios entre cada par de aeropuertos, utilizando datos del programa de la compañía aérea.

Para un día determinado, un par de aeropuertos puede tener una alta frecuencia

de vuelos, cada uno de los vuelos ofrece a los pasajeros una posible manera de viajar entre los aeropuertos. Aunque la lógica utilizada para construir itinerarios difiere a través de las líneas aéreas, en los algoritmos generales se incluye la lógica de la distancia para eliminar itinerarios irrazonables y horas de conexión mínimas y máximas, para garantizar que las conexiones no realistas no estén permitidas. Además, los itinerarios suelen ser generados para cada día de la semana, para así evaluar que entre los días de la semana hay diferencias entre los vuelos ofertados. Una vez generado el conjunto de itinerarios que conectan un par de aeropuertos, un algoritmo que evalúa el mercado predice el porcentaje de viajeros que eligen cada itinerario en un par de aeropuertos. A continuación, la demanda en cada itinerario se determina multiplicando el porcentaje de los viajeros que se esperaban en cada itinerario por el tamaño del mercado previsto, o el número de pasajeros que viajan entre un par de aeropuertos. Lo rescatable de este trabajo es la evolución entre metodologías que se ha derivado de los avances científico-tecnológicos, que dotaban de unos mejores conocimientos a los investigadores. Además, desde un inicio se han unificado las problemáticas de generación de itinerarios, es decir, determinación de aeropuertos, frecuencias y horas de salida y llegada, con el problema de la asignación de vuelos. Aunque cómo en este último caso, algunos investigadores han decidido afrontar uno de los problemas para intentar llegar a la solución óptima.

Esto cómo demuestra Barnhart y Smith (2012), es normal, pues debido a el gran tamaño de las aerolíneas de hoy en día, el esfuerzo computacional requerido para resolver el problema es muy grande, por lo que evaluar la solución en un sistema real se hace muy difícil.

Posteriormente Li y Tan (2013), representaron el problema de asignación de flota modelado con datos reales de aerolíneas. Para solucionarlo, utilizaron un algoritmo genético mejorado por ellos mismos, especialmente diseñado para solucionar el problema. Adicionalmente, le asignaron al algoritmo un método heurístico en cada circuito para constatar que la solución obtenida es la más factible. Si el algoritmo detecta que la solución obtenida no es factible, la ajusta, basándose en unas premisas

previamente establecidas.

La importancia de este trabajo, radica en que se obtienen soluciones rápidamente y que, de aplicarse este modelo en el proceso de asignación de flotas en las aerolíneas, esto mejoraría el proceso de automatización y conseguiría reducir sus costos.

Allung *et al.* (2014), evaluaron el problema de asignación de flotas en un caso de estudio real donde se logró una reducción de costos en la aerolínea más grande de Indonesia a través de una correcta asignación de flota y de igual forma nos detalla los escenarios más importantes a considerar en un problema de este tipo:

1. El primer escenario presenta la mejor asignación de flota para cada ruta de vuelo, que da el costo mínimo de la aerolínea.
2. En el segundo escenario, la función objetivo se modifica para minimizar el número total de aeronaves que deben cubrir todos los vuelos en el horario.
3. El tercer escenario presenta la mejor asignación de flota para cada ruta de vuelo que da el costo mínimo de la aerolínea, mientras que se minimiza el número total de aeronaves que cubren todos los vuelos en el calendario.

Finalmente Cheng *et al.* (2014), proponen un nuevo método para la programación de vuelos futuros basados en una solución híbrida de simulación y técnicas de optimización, donde utilizan una técnica de programación entera mixta para maximizar la utilización de la estructura itineraria de los vuelos por parte de los aviones, este trabajo proporciona un análisis cuantitativo para demostrar una compensación entre las estrategias de los modelos asignación de flotas, que minimizan el número de aeronaves en servicio y los modelos de ventanas de tiempos, que ayudan a optimizar la programación de vuelos.

2.3 CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO

Cómo podemos notar en la literatura, la mayoría de los autores parten del modelo de Abara (1989), al cual dependiendo la problemática que cada autor se enfocó, se le han añadido modificaciones tales como restricciones y cambios en la función objetivo para buscar diversos resultados específicos. Los autores mencionados durante de este capítulo, en su mayoría, parten de modelos de programación lineal entera mixta por lo que en este trabajo también se evaluará una herramienta de este tipo.

De acuerdo a las características de nuestro caso de estudio, donde se tiene una aerolínea que opera con 2 tipos de flotas y que cada una de ellas tiene un costo operativo distinto, se partirá un modelo propuesto por Hane *et al.* (1995), el cual mediante unas modificaciones a el modelo original de Abara (1989), se enfoca en la reducción de costos a travez la asignación de flota. En el presente trabajo se aplicará el modelo mediante el uso del lenguaje GAMS a el caso de estudio de una aerolínea mexicana para analizar los resultados.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

En este capítulo abordaremos la metodología a seguir para solucionar el problema planteado anteriormente, con el fin de cumplir con el objetivo de optimizar el proceso de asignación de flotas en líneas aéreas comerciales. En este problema se buscará encontrar la mejor asignación de recursos, en este caso, de una flota determinada por aeronaves para cubrir el itinerario establecido por el caso de estudio, para esto se tendrá que tomar en cuenta variables como el tipo y cantidad de flota, rutas, itinerario, tiempos, etc. Este problema viene siendo estudiado por las compañías aéreas desde hace décadas y se han empleado múltiples técnicas para resolverlo. Uno de los primeros trabajos enfocados a resolver este problema de forma efectiva, fue hecho por Abara (1989), con el objetivo de optimizar el proceso de asignación de flota. A partir de este modelo, se han hecho modificaciones buscando alcanzar objetivos específicos de acuerdo a diversas problemáticas que se presentan en este sector, cada una de ellas optimizando principalmente a través la programación lineal entera mixta.

Se considera optimización a aquel proceso que persigue encontrar la mejor solución existente para un problema dado. En un problema de optimización, en general, existe un número finito de variables que pueden tomar determinados valores, unas restricciones que limitan los posibles valores que tomarán las variables, y una función objetivo. La función de las herramientas de optimización, como la programación

entera mixta; que consiste en encontrar valores para las variables que consigan que la función objetivo alcance su valor máximo o mínimo.

Entonces, como se muestra en la siguiente gráfica, la metodología se llevará a cabo en 3 fases donde partirá por definir el problema, se revisará la literatura pertinente, se identificará una herramienta cuantitativa que ayude a obtener los resultados esperados, posteriormente se programará esta herramienta, después se validará la herramienta concluyendo con su implementación y con el análisis de los resultados obtenidos.

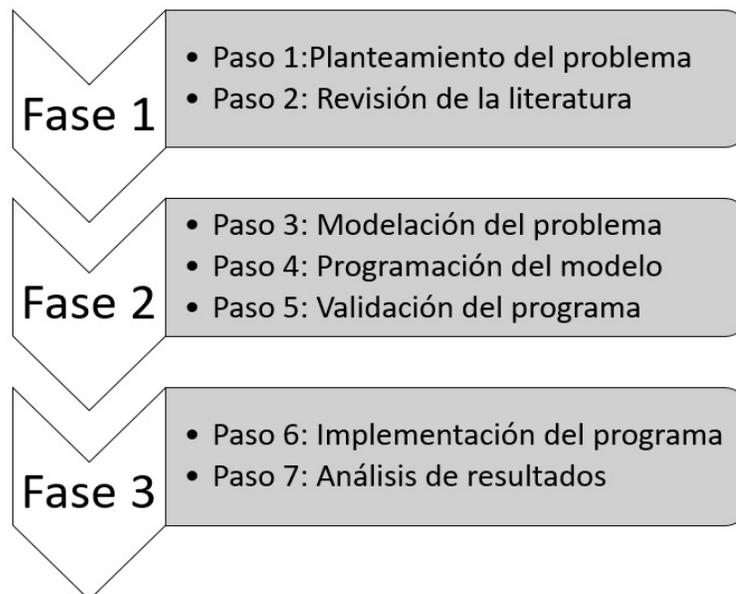


Figura 3.1: Metodología propuesta

3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El primer paso de la metodología será definir nuestro caso de estudio, el cual será una aerolínea comercial mexicana, la cual contempla un calendario con itinerarios y patrones de vuelos establecidos por el número de vuelos diarios, el número de destinos a los que se vuela, la cantidad de rutas, así como la cantidad y tipo flota que se dispone para cubrir lo anterior mencionado. A continuación se planteará la

situación que se desea resolver, en este caso se trata de disminuir los costos asociados a la operación de la flota de la línea aérea en cuestión.

3.2 REVISIÓN DE LA LITERATURA

En esta etapa se identificaron artículos, libros, trabajos de tesis, etc. relacionados con el área de interés de nuestro caso de estudio. Una vez que se hayan determinado dichas investigaciones, se analizarán las técnicas, métodos y estrategias que se utilizan en cada uno de ellos para dar solución a la problemática así como sus aportaciones principales al área donde se desea desarrollar el presente trabajo. Se continuará haciendo una clasificación de los elementos analizados que ayuden a establecer el método a través del cual se buscará resolver el problema.

3.3 MODELACIÓN DEL PROBLEMA

La segunda fase de la metodología iniciará con el paso de la modelación, donde se partirá tomando en cuenta el modelo de asignación de flota propuesto por Hane *et al.* (1995), donde el objetivo de este modelo busca asignar tantos segmentos de vuelo como sea posible a una flota optimizando una determinada función objetivo que será el ahorro de costos de operación. El modelo cumplirá ciertas restricciones operacionales, es decir, las restricciones de cobertura, balance, disponibilidad, tiempos y las restricciones lógicas.

La herramienta matemática propuesta, es un modelo de programación entera mixta el cual está conformado por un conjunto de restricciones y una función objetivo. Una vez que el modelo se encuentra establecido nuestro *FAP* se convierte en un *FAM* el cual, una vez resuelto, se convertirá en una herramienta para encontrar la solución óptima al problema seleccionado.

El modelo formulado, al recibir un horario con las horas de salida y llegada indicadas, resolverá el *FAM*, determinando qué vuelos se deben asignar a qué tipos de aeronave, optimizando la función objetivo.

Como ya se ha mencionado anteriormente, se partirá del modelo de Hane *et al.* (1995). La razón de elegir esta formulación es debido a que es un modelo completo y simple, de donde se puede tener una base para atacar un problema de asignación de flotas y buscar el objetivo de disminuir los costos de operación, además cabe mencionar que este trabajo a su vez, parte del modelo propuesto por Abara (1989), del cual también parten varios artículos de la bibliografía revisada.

3.3.1 SUPUESTOS DEL MODELO

Se considerará un entorno basado en los siguientes supuestos para garantizar que los resultados del modelo sean los apropiados.

- Las operaciones del caso de estudio se llevan a cabo como indica el itinerario de vuelos sin tomar en cuenta ninguna eventualidad cómo retrasos, variabilidad de la demanda u otros factores relacionados con las cancelaciones de vuelos.
- Se supondrán tiempos de turno para todas las trayectorias, es decir, se incluirá en los tiempos de cada trayectoria el tiempos que permanece en tierra la aeronave de manera que contribuya a estimar los costos de manera más precisa y de igual forma haciendo más realista el tiempo que dispone el modelo para asignar las aeronaves.
- Debido a que las condiciones de mantenimiento en esta industria son planeadas con anticipación, esto permite conocer la cantidad de aeronaves con las que se contará cada día de operación y por tanto el modelo se implementará con la capacidad de adecuar el parámetro relacionado con la cantidad y ubicación de cada aeronave antes de correr el programa.

- La asignación de aeronaves se hace a nivel abstracto, es decir, en ningún momento se dice qué aeronave exactamente debe cubrir una ruta. Lo que se trabaja es la correcta asignación del tipo de flota usada para garantizar que se logre la minimización de los costos.
- Se discretizarán las 24 horas del itinerario en intervalos de 1 hora para la etapa de validación y de 20 minutos para el caso de estudio.
- El tiempo de vuelo de las aeronaves se considera múltiplo de los segmentos que se definen en el programa. Esto es, la cantidad intervalos que le toma a cada aeronave cubrir un segmento de vuelo.
- El costo de la función objetivo incluye los costos relacionados con el consumo de combustible, tripulación de vuelo, tarifas aeroportuarias, operaciones de mantenimiento. etc.
- Se busca asignar a tantas rutas cómo sea posible, una aeronave, mientras se optimiza su uso y se cumplen algunas restricciones.

3.3.2 CONJUNTOS

Sean:

D : Conjunto de aeropuertos indexados en $o, d = \{1, 2, 3, \dots, n\}$.

F : Conjunto de flotas indexadas en $f = \{A320NEO, A320CEO\}$.

T : Conjunto de tiempos indexados con elementos en $t = \{1, 2, 3, \dots, m\}$.

3.3.3 PARÁMETROS

Sean:

C_{odf} : Costo de asignar la aeronave de tipo $f \in F$ a la ruta desde $o \in D$ hasta $d \in D$.

A_{odt} : Conjunto de rutas establecidas desde un origen $o \in D$ hacia un destino $d \in D$ programada para efectuarse en el tiempo $t \in T$.

B_{od} : Tiempo que se tarda en recorrer una ruta desde un origen $o \in D$ hacia un destino $d \in D$ incluyendo el tiempo de turno.

3.3.4 VARIABLES

X_{fodt} : Variable de decisión binaria que tomará el valor de 1 si la flota $f \in F$ vuela el tramo de vuelo de un origen $o \in D$ a un destino $d \in D$ partiendo en un tiempo $t \in T$ y 0 en el caso contrario.

$Y0_{fd}$: Variable que indica el número de aeronaves de la flota $f \in F$ en el aeropuerto $d \in D$ al inicio del periodo planeado es decir, en el tiempo 0.

Y_{fdt} : Variable que indica el flujo de las aeronaves tipo $f \in F$ en tierra en el aeropuerto $d \in D$ dentro del intervalo de tiempo $t \in T$. Se define como una variable continua debido a que todas las variables de vuelo son integrales.

3.3.5 EL MODELO

La función objetivo está relacionada con el objetivo que se pretende alcanzar, es decir, la minimización de los costos operativos los cuales incluyen; costo de combustible, tripulación, tarifas aeroportuarias, mantenimiento, etc. a través de la asignación óptima de un tipo de flota a cada trayectoria de vuelo.

$$\min \sum_{o \in D} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \sum_{f \in F} C_{odf} X_{fodt} \quad (3.1)$$

Donde (3.1) representa la función objetivo que busca minimizar los costos si se asigna un tipo flota a una ruta.

3.3.6 RESTRICCIONES

Hay cinco grupos principales de restricciones, de los cuales cuatro son intrínsecos al modelo, mientras que el resto está relacionado con la naturalidad de las variables que se presentan en el mismo.

$$\sum_{f \in F} X_{fodt} \geq A_{odt} \quad \forall o, d \in D, t \in T \quad (3.2)$$

$$\sum_{d \in D} X_{fodt-1} + Y_{fot-1} = \sum_{d \in D} X_{fodt} + Y_{fot} \quad \forall f \in F, o \in D, t \in T \quad (3.3)$$

$$Y_{0fo} = \sum_{d \in D} X_{fodt1} + Y_{fot1} \quad \forall f \in F, o \in D \quad (3.4)$$

$$Y_{fdt} \geq 0 \quad \forall f \in F, d \in D, t \in T \quad (3.5)$$

$$X_{fodt} \in \{0, 1\} \quad \forall o, d \in D, f \in F, t \in T \quad (3.6)$$

Donde (3.2), representa la restricción de cobertura que garantiza que cada trayectoria de vuelo sea operada por un y solo un tipo de aeronave. Cada trayectoria

incluye los tiempos de turno, esto es, el tiempo mínimo que necesita un avión entre su hora de aterrizaje y el siguiente tiempo de despegue. Esto incluye el tiempo para algunas inspecciones menores, preparación de la aeronave para su próximo viaje y su movimiento en la pista. El tiempo en turno depende de aeronaves y aeropuertos, y típicamente es igual a 30-40 minutos para vuelos domésticos (es decir, vuelos nacionales).¹ Además, no puede estar activo más de uno de los posibles turnos de un vuelo, para evitar que un vuelo sea contado dos veces.

Aquí (3.3), es la restricción de balance, aquí se asegura que cada vuelo comience y termine en el mismo tipo de aeronave, incluso cuando hay un turno, para asegurar la integridad de la red. También garantiza la compatibilidad entre el número de aviones en tierra y el número de aviones que se encuentra en el aire, a lo largo de todo el período planeado para cada aeropuerto y para cada tipo de aeronave.

En el caso de (3.4), es la limitación de conteo de aeronaves, con esta restricción se programa la cantidad y el tipo de aeronaves que hay al inicio en cada aeropuerto.

Por último (3.5) y (3.6), corresponden a las restricciones lógicas de las variables de decisión, es decir; aseguran que las variables solo tomen valores binarios y enteros.

3.3.7 PARTICULARIDADES DEL MODELO

La ventaja de usar este modelo es que toma en cuenta una serie de restricciones que se asemejan a los problemas fundamentales del mundo real que deben ser considerados al asignar las flotas a las rutas establecidas en el itinerario. La función objetivo garantiza la minimización de los costos y los tiempos computacionales se consideran alcanzables en una escala de tiempo razonable. Este modelo puede ampliarse aún más para incluir otras cuestiones.

¹En el medio se denomina vuelos domésticos a los vuelos de corto alcance o nacionales.

3.4 PROGRAMACIÓN DEL MODELO

Este paso de la metodología contempla la programación del modelo mediante el lenguaje de programación de *GAMS*. Esta herramienta computacional brinda un soporte para la formulación de modelos de programación lineal entera mixta y el cálculo de resultados. Aquí se realizarán las adaptaciones pertinentes que permitan trasladar el modelo a un ambiente computacional.

3.5 VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Una vez que se haya programado el modelo, se procederá a verificar que este se encuentre satisfaciendo los objetivos descritos en el planteamiento haciendo pruebas preliminares con una cantidad de datos suficientes que permitan analizar rápidamente los resultados. Adicionalmente se medirán los tiempos de cálculo. Durante esta etapa se plantea corregir secciones de la formulación que no se encuentren cumpliendo los objetivos o bien, que no estén mostrando resultados esperados.

3.6 IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA

Iniciando la última fase de la metodología, en este paso procederemos a poner en marcha el programa con datos completos de la aerolínea del caso de estudio, midiendo los tiempos de cálculo y obteniendo los resultados buscados.

3.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Por último, en este paso, con base en los resultados obtenidos en la validación, se mostrarán los resultados obtenidos. Después se llevará a cabo la interpretación

del beneficio alcanzado a través de análisis detallado y por último se desarrollarán las conclusiones pertinentes.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

En este capítulo se hablará de la manera en que se validaron los resultados obtenidos en la primera prueba del programa y de como se ingresaron los datos completos de todo el caso de estudio para obtener los resultados esperados por este proyecto.

4.1 VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Para validar el programa, se procedió a evaluar los resultados que obtiene, para esto, se programó el itinerario de un día de operaciones entre los cuatro aeropuertos más grandes del caso de estudio, estos fueron: Ciudad de México, Monterrey, Guadalajara y Cancún. Las dimensiones de esta evaluación fueron:

- 4 aeropuertos.
- 24 horas del día discretizadas en 24 intervalos.
- 2 tipos de flota.
- 6 aviones.
- 28 vuelos en el itinerario.



(a) Ubicación de los aviones en el tiempo inicial (b) Primer vuelo a efectuarse en el itinerario



(c) Vuelos asignados al avión A320NEO (d) Otros vuelos asignados a la aeronave A320NEO



(e) Vuelo más largo del itinerario (f) Ubicación de los aviones en el tiempo final

Figura 4.1: Ubicación de los aviones durante la ejecución del modelo

En la figura 4.1 se muestran parte de comportamiento del modelo, en la imagen (a) se puede observar la ubicación de cada uno de los 7 aviones al inicio del día, la aeronave tipo A320NEO se encuentra de color verde ubicada en Monterrey mientras que el resto de las aeronaves de tipo A320CEO se encuentran en color gris, seguido de esto, en la imagen (b) se observa con la flecha que el primer vuelo se llevará a cabo con el A320CEO que se encuentra en la Ciudad de México y tendrá como destino Monterrey, asignar esta aeronave para esa ruta es natural debido a que esta se encontraba en ese aeropuerto en el tiempo inicial, si recordamos que el tipo de flota compuesto por la aeronave A320NEO tiene un menor costo operativo, en (c) podemos observar como el modelo asigna a esta aeronave para efectuar algunos de los vuelos programados en el itinerario partiendo desde Monterrey y regresando a la misma ciudad a través de otra ruta, consecuentemente vemos en (d) como el modelo vuelve a hacer uso de la misma aeronave A320NEO para seguir cubriendo más vuelos marcados en el itinerario, mientras que en la imagen (e) podemos notar como el vuelo más largo del itinerario que va desde Cancún a Guadalajara es asignado a uno de los aviones tipo A320CEO, esto comprueba que el programa no necesariamente asigna la aeronave con menor costo operativo a los vuelos más largos para garantizar el costo mínimo, por último en (f) se muestra como quedan ubicadas todas las aeronaves.

Podemos destacar que la herramienta de este proyecto no necesariamente asigna las aeronaves con menor costo operativo a los vuelos más largos, más bien busca aumentar la frecuencia con la que son asignadas para que cubran la mayor cantidad de vuelos posibles del itinerario, incluso haciendo a veces vuelos de recolocación.

Concepto	Valor
Costo operativo de las aeronaves A320CEO	200 unidades
Costo operativo de las aeronaves A320NEO	184 unidades
Tiempo de ejecución	0.014 segundos
Itinerario total	28 vuelos
Valor objetivo	8304 unidades

Tabla 4.1: Resultados de la validación

En la tabla 4.1 se pueden observar los principales datos de la ejecución, donde se estimó un valor operacional para cada tipo de y flota, cabe destacar que el tiempo de ejecución para la validación es muy rápido y además se logró alcanzar un valor óptimo en la asignación y en consecuencia, se tuvo un mejor uso de la flota.

Hay que mencionar que el itinerario de vuelos entre estos aeropuertos fué tomado de un caso de estudio real donde en ese día de operación también existían vuelos a otros destinos desde los mismos aeropuertos, por lo que al momento de encontrar una solución óptima para realizar los 28 vuelos entre ellos, se observaron algunos vuelos de recolocación los cuales no formaban parte del itinerario pero son necesarios para obtener el costo de operación óptimo.

4.2 RESULTADOS DEL CASO DE ESTUDIO

Una vez que los resultados del programa fueron validados a través de un ejemplo más pequeño, se procedió a ingresar los datos reales de un día de operación de la aerolínea que se tiene como caso de estudio. El objetivo del programa es encontrar el costo mínimo al asignar los tipos de flota para cubrir los vuelos en el itinerario planeado para ese día.

A pesar de que la aerolínea del caso de estudio opera en 36 aeropuertos un total de 192 trayectorias de vuelo, no todos los días se realizan todas las trayectorias de vuelo y no siempre se tiene la misma frecuencia, es por esto que para poder realizar un cálculo realista, el programa se basó en el itinerario de un día de operaciones.

Dentro del itinerario mencionado los datos y parámetros que se consideraron para la ejecución del programa son los siguientes:

- 29 aeropuertos.
- 24 horas del día discretizadas en 72 intervalos de 20 minutos.

- 2 tipos de flota.
- 25 aviones.
- 177 vuelos en el itinerario.

Se procedió a ejecutar el programa obteniendo los siguientes resultados:

Concepto	Valor
Costo operativo de las aeronaves A320CEO	\$2,270.00 USD
Costo operativo de las aeronaves A320NEO	\$2,088.40 USD
Tiempo de ejecución	5 segundos
Itinerario total	177 vuelos
Valor objetivo	\$1,693,792.00 USD

Tabla 4.2: Resultados del caso de estudio

Cómo vemos en la tabla 4.2 el tiempo de ejecución del programa es corto y se sigue considerando rápido. Dentro de los resultados se puede observar que el modelo garantiza el servicio al asignar una aeronave para cada vuelo programado a su vez que minimiza los costos haciendo el mejor uso posible del tipo de flota que tiene un menor costo operativo, arrojando un resultado de \$1,693,792.00 USD, otra manera de interpretar esto es, que el programa aumenta la frecuencia en que son asignados los aviones que con costo operativo más bajo garantizando que el costo total de la operación disminuya.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Dentro de este capítulo se hará referencia a los resultados obtenidos en el programa, haciendo primero una interpretación de lo que éstos significan y de qué manera impactan en la operación de la empresa tomada como caso de estudio. Posteriormente se mencionará la aportación que tiene este proyecto en la logística y por último se mencionaran los posibles trabajos a futuro en aspectos que no se encontraban contemplados en esta investigación pero que podrían servir como pauta para nuevas investigaciones.

5.1 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La herramienta cuantitativa propuesta en este proyecto esta formulada para poder ser aplicada en cualquier aerolínea que este compuesta por flotas con distintos costos operativos. La función objetivo busca minimizar el costo total de la operación de los vuelos marcados en itinerario haciendo un uso eficiente de los recursos con los que se cuenta. En caso de ser implementada, esta herramienta garantiza que para cada vuelo se utilice el mejor recurso disponible a la vez que se optimizan los costos.

Al momento de evaluar los resultados obtenidos por el programa se pudieron ver algunos vuelos de recolocación, es decir, para que siga garantizando el mejor

costo operativo, algunos aviones tienen que volar trayectos que se encuentran fuera del itinerario, de manera que, si este itinerario se vuela constantemente, los vuelos de recolocación podrían representar una posibilidad económica para ser vendidos por la empresa y así evitar que estos vuelos se lleven a cabo con aviones vacíos.

5.2 CONTRIBUCIONES A LA LOGÍSTICA

El principal aporte de este proyecto a la logística parte de la importancia de entender la manera en que impacta el hecho de tener el mejor recurso disponible, en el momento adecuado y en el lugar correcto. La herramienta utilizada en este proyecto garantiza ofrecer el servicio al asignar la mejor aeronave a cada uno de los vuelos marcados en el itinerario y al mismo tiempo garantizando que la operación se lleve a cabo con el menor costo posible. A su vez, al encontrar vuelos de recolocación dentro de la solución óptima, representa una oportunidad económica si se considera que estos vuelos podrían incorporarse al itinerario habitual dentro de las operaciones futuras de la empresa.

La aviación comercial es un sector que constantemente se ve afectado por diversas situaciones propias de su entorno como por ejemplo: los cambios climáticos, cancelaciones, demoras, etc., por lo que otro de los beneficios que se pueden señalar después de las evaluaciones realizadas al programa, es que los tiempos de cálculo son considerablemente rápidos, por lo que el programa no solo sería utilizado como una herramienta de planeación operativa sino también como una herramienta de reacción ante eventualidades permitiendo volver a calcular la asignación de las aeronaves disponibles en ese instante, a los vuelos que faltan por efectuarse en el itinerario al momento de la eventualidad.

5.3 TRABAJOS A FUTURO

Dentro del horizonte de planeación táctica de las aerolíneas se encuentra la programación de los itinerarios de vuelo, es decir, la frecuencia y tiempos en que se desean operar las rutas planificadas, en ese rubro, a pesar de que la generación de itinerarios no es un objetivo del programa, se podría utilizar como una herramienta para evaluar posibles imprecisiones u oportunidades de los itinerarios ya establecidos, esto a través de la detección de los vuelos de recolocación o a través de un análisis de los tiempos que pasan las aeronaves en tierra.

Otra área de oportunidad en la que se podría realizar un trabajo a futuro es para el horizonte estratégico, o sea, la etapa donde se decide la cantidad y el tipo de flota con la que se quiere operar, a lo mencionado, los resultados que brinda el programa permitirían hacer un análisis de las horas de vuelo sobre el número de aviones de cada tipo de flota, donde los datos obtenidos serían de utilidad si se está buscando tomar una decisión relacionada a estos factores.

BIBLIOGRAFÍA

- ABARA, J. (1989), «Applying integer linear programming to the fleet assignment model», *The institute of management sciences*, **19**(4), págs. 20–28.
- ALLUNG, B. F., T. BAKHTIAT y A. AMAN (2014), «Scenarios for Fleet Assignment: A Case Study at Lion Air», *IOSR Journal of Mathematics*, **10**(5), págs. 64–68.
- BARNHART, C. y B. SMITH (2012), *Quantitative Problem Solving Methods in the Airline Industry*, primera edición, Springer, New York, NY.
- BELANGER, N., G. DESAULNIERS, F. SOUMIS y J. DESROSIERS (2003), «Periodic Airline Fleet Assignment with Time Windows, Spacing Constraints, and Time Dependent Revenues», *Les Cahiers du GERAD*, 1-41.
- BELANGER, N., G. DESAULNIERS, F. SOUMIS y J. DESROSIERS (2006), «Periodic airline fleet assignment with time windows, spacing constraints, and time dependent revenues», *European Journal of Operational Research*, **175**(3), págs. 1754–1766.
- CHENG, F., B. BASZCZEWSKI y J. GULDING (2014), «A Hybrid Optimization-Simulation Approach for Itinerary Generation», *Winter Simulation Conference*, 1885-1896.
- HANE, C., C. BARNHART, E. JOHNSON, R. MARSTEN, G. NEMHAUSER y G. SIGISMONTI (1995), «The fleet assignment problem: solving a large-scale integer program», *Mathematical Programming*, **70**(1), págs. 211–232.

- IOACHIM, I., J. DESROSIERS, F. SOUMIS y N. BÉLANGER (1999), «Fleet Assignment and Routing with Schedule Synchronization Constraints», *European Journal of Operational Research*, **119**(1), págs. 75–90.
- LI, Y. y N. TAN (2013), «Study on Fleet Assignment Problem Model and Algorithm», *Mathematical Problems in Engineering*, **2013**(1), págs. 1–5.
- LOHATEPANONT, M. (2002), «Airline fleet assignment and schedule design. Models and algorithms», Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- LOHATEPANONT, M. y C. BARNHART (2004), «Airline schedule planning: Integrated models and algorithms for schedule design and fleet assignment», *Transportation Science*, **38**(1), págs. 19–32.
- MARTÍN, F., J. A. MANTECA y J. C. ARIAS (2008), «Análisis del problema de asignación de flotas flexible con ventanas de tiempo discretas, duración variable, preferencias de salida y relaciones de precedencia», *Dirección y organización*, **35**(1), págs. 61–68.
- MERCIER, A., J. F. CORDEAU y F. SUOMIS (2005), «A computational study of benders decomposition for the integrated aircraft routing and crew scheduling problem», *Computers and Operations Research*, **32**(1), págs. 1451–1476.
- ROSENBERG, J. (2004), «A robust fleet-assignment model with hub isolation and short cycles», *Transportation Science*, **38**(3), págs. 357–368.
- SHERALI, H., E. BISH y X. ZHU (2006), «Airline fleet assignment concepts, models, and algorithms», *European Journal of Operational Research*, **172**(1), págs. 1–30.
- SHERALI, H. D. y X. ZHU (2006), «Two-Stage Fleet Assignment Model Considering Stochastic Passenger Demands», *Operations Research*, **56**(2), págs. 383–399.
- TOTH, P. y D. VIGO (2014), *Vehicle routing: problems, methods, and applications*, segunda edición, SIAM, Philadelphia, PA.

VENKATA, L. P., J. M. ROSENBERG, V. CHEN y B. C. SMITH (2005), «A statistical computer experiments approach to airline fleet assignment», University of Texas, 2005.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Luis Daniel Priego Cabrera

Candidato para obtener el grado de
Maestría en Logística y Cadena de Suministro

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

OPTIMIZACIÓN EN LA ASIGNACIÓN DE AERONAVES PARA RUTAS
AÉREAS: CASO DE UNA AEROLÍNEA COMERCIAL MEXICANA

Nació en el estado de Tabasco el día 20 de Agosto de 1989, hijo de Areli del Carmen Cabrera Lanz y Jose Luis Priego Domínguez. Graduado en 2011 de la carrera de Ingeniería en Sistemas y Tecnologías Industriales por la Universidad Politécnica del Golfo de México.