UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Tesis USM TESIS de Pregrado de acceso ABIERTO

2016

"FORMULACIÓN DE UN MODELO DE PROGRAMACION LINEAL PARA EL CÁLCULO DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA EFECIVA DE UNA EMPRESA AEROCOMERCIAL".

HERRERA MORENO, GUILLERMO ORLANDO

http://hdl.handle.net/11673/22109

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
SANTIAGO – CHILE

FORMULACIÓN DE UN MODELO DE PROGRAMACIÓN LINEAL PARA EL CÁLCULO DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA EFECTIVA DE UNA EMPRESA AEROCOMERCIAL

GUILLERMO ORLANDO HERRERA MORENO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA : SR. VÍCTOR ALBORNOZ S.
PROFESOR CORREFERENTE : SR. LUIS YÁÑEZ S.

NOVIEMBRE 2016

AGRADECIMIENTOS

Es un ejercicio exigente el pensar en todas las personas que han estado a mi lado en este largo proceso que ha sido terminar este trabajo de título.

En primer lugar, agradecer a mi profesor guía Víctor Albornoz, por su apoyo y disponibilidad a toda prueba, aceptando retomar este proyecto cuando parecía difícil finalizarlo.

También darle las gracias a Aerocardal Limitada, en especial a Manuel Acosta, quien además de proponer el tema y permitirme desarrollarlo en la empresa, su apoyo y consejos durante el tiempo que estuve ahí me ayudaron a sacar adelante la tarea.

A mis abuelos y tíos, los Herrera y los Moreno, mi completo agradecimiento por acompañarme en todo momento. A los amigos, cuya pregunta "¿y la memoria?" no será más una molestia.

Y finalmente a Mary, Guillermo y Salvador, por absolutamente TODO.

RESUMEN EJECUTIVO

El presente proyecto nace de la necesidad por parte Aerocardal Limitada, empresa experta en el mercado de los vuelos ejecutivos, aeromédico y chárter, por conocer la capacidad productiva alcanzable, de acuerdo a la flota de aviones disponible, capacidad humana y respetando la normativa vigente. Así es como, basado en los conceptos de la Investigación de Operaciones, se diseñó un modelo de Programación Lineal y una herramienta computacional que resuelva el problema de maximización, siendo capaz de determinar la cantidad de vuelos que se pueden efectuar al mes, las tripulaciones disponibles para cada aeronave y las variables asociadas a los pilotos y sus tiempos de vuelo.

La investigación realizada concluyó con la clasificación de las causas que limitan la capacidad en cinco categorías, que incluye el número de pilotos y sus habilitaciones de tipo; disponibilidad mensual por mantenimiento; la normativa aeronáutica que regula los tiempos de vuelo y asigna periodos de descanso; vuelos itinerantes cuyas características difieren de los vuelos no regulares; y la repartición homogénea de los contratos de trabajo entre las tripulaciones y aeronaves para evitar la sobreutilización de recursos.

Usando como base una flota de 11 aeronaves y 12 pilotos, el modelo asignó una capacidad efectiva de 385,4 [h/mes], siendo el periodo de servicio de vuelo de los pilotos, asociado al descanso legal que deben cumplir, el principal factor limitante. Con esta capacidad efectiva, la empresa alcanza una eficiencia del 65,5% con respecto a los datos de operación del último año analizado, llegando al 82,1% de utilización de flota durante el mes de mayor actividad. Además, se analizó la posibilidad de reducir el número de pilotos disponibles con el fin de acercar la capacidad efectiva con la demandada, logrando una caída del 3% en el valor óptimo obtenido inicialmente. Luego, se hizo el análisis contrario, aumentando en tres los pilotos habilitados para un tipo de aeronave que hace vuelos itinerantes, logrando un aumento del 10% en la capacidad efectiva de la empresa. Así, la herramienta diseñada muestra un buen comportamiento analizando los cambios en las variables que afectan directamente a la capacidad de la flota, con el objetivo en que preste utilidad en el área de Operaciones de la empresa.

ABSTRACT

This Project has born from the need of Aerocardal Limitada, leader company in executive, aeromedical and charter flights, to determine its productive capacity, per its aircraft fleet, human resources and respecting the current regulations. Therefore, a Linear Programming model and a computational tool were designed, based in Operations Research concepts, to resolve the maximization problem, being able to determine the number of flights in a monthly basis, available flight crews to each aircraft, and variables associated to pilots and their flight time.

The initial investigation concluded with the classification of the causes that restrict the capacity. The five categories include: number of pilots and aircraft type ratings; aircrafts monthly availability; aeronautical regulation which controls maximum flight times and assigns rest periods; scheduled flights, which features differ from non-scheduled flights; and the uniform distribution of flight contracts among crews and aircrafts, avoiding the overuse of the flight resources.

Using as base a 11-aircraft fleet and 12 pilots, the model assigned 385,4 [h/month] Aerocardal Effective Capacity, with the Flight Service Period, linked to legal rest period, as the main constraint factor. With this Effective Capacity, the Company reaches 65,5% efficiency, according to operation data from the last analyzed year, reaching 82,1% fleet utilization during the busiest month of that year. Additionally, the possibility of reducing the number of available pilots was analyzed, in order to reduce the gap between effective capacity and the demanded one, achieving a 3% fall in the optimal value initially measured. Subsequently, the opposite analysis was made, increasing by three the number of type rated pilots in one of the aircrafts which does scheduled flights, achieving a 10% increase in the company effective capacity. Thereby, the designed tool shows a good performance analyzing the variables changes which impact directly to the fleet capacity, in order to be useful in the company.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS 1

RESUMEN EJECUTIVO 2

ABSTRACT 3

CAPÍTULO I: ANTECEDENTES GENERALES 9

1.1. Introducción 9

1.2. Antecedentes de la Empresa 10

1.3. Problema de la Investigación 12

1.4. Objetivos 14

1.4.1. Objetivo General 14

1.4.2. Objetivos Específicos 14

1.5. Alcance 15

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO 16

2.1. Mercado del Transporte Aéreo 16

2.1.1. Demanda del Transporte Aéreo 18

2.1.2. Vuelos Regulares y No Regulares 22

2.2. Capacidad de Flotas 24

2.2.1. Planificación de las Necesidades de Capacidad 25

2.2.2. Conceptos de Capacidad y Medidas de Desempeño 27

2.3. Investigación de Operaciones 28

2.3.1. Etapas Asociadas al Desarrollo de un Modelo de Optimización 29

2.3.2. Tipos de Modelos en Investigación de Operaciones 33

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA 35

3.1. Definición del Problema y Recolección de Datos 35

3.1.1. Aspectos que restringen la Capacidad Efectiva 36
3.2. Formulación del Modelo Matemático 46
3.2.1. Índices y Conjuntos 46
3.2.2. Parámetros 47
3.2.3. Variables de Decisión 47
3.2.4. Función Objetivo 47
3.2.5. Restricciones del Problema 48
CAPÍTULO IV: RESULTADOS E IMPLEMENTACIÓN 55
4.1. Modelo Computacional Diseñado 55
4.2. Análisis de Resultados Obtenidos por Modelo 56
4.2.1. Parámetros ingresados. 57
4.2.2. Resultados entregados por Modelo 59
4.2.3. Comparación entre Resultados de Modelo y Situación Analizada 69
4.2.4. Análisis de Sensibilidad 77
4.3. Implementación 86
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES 87
CAPÍTULO VI: LIMITACIONES 90
BIBLIOGRAFÍA 91
ANEXOS 93
Anexo 1 93
Anexo 2 93
Anexo 3 99
Anexo 4 99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Crecimiento del Transporte Aéreo desde 1950 17
Figura 2: Estacionalidad de la Demanda de Transporte Aéreo en Chile 19
Figura 3: Tipos de Modelos de Optimización 33
Figura 4: Restricciones que afectan la Capacidad Efectiva de Aerocardal 37
Figura 5: Calendario Mensual de Vuelos Itinerantes, empresa Aerocardal 43
Figura 6: Distribución de las Horas de Vuelo en la Flota 61
Figura 7: Síntesis de Parámetros Relativos a Pilotos 67
Figura 8: Comparación entre Capacidad de Modelo y Vuelos Analizados 70
Figura 9: Comparación entre Horas de Vuelo asignadas y las ejecutadas 72
Figura 10: Cambios en la Capacidad de la Flota al quitar un Piloto 75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tiempos de Vuelo Máximos por Tripulación 40

Tabla 2: Períodos de Descanso por Tripulación 41

Tabla 3: Rango de Utilización por Aeronave 57

Tabla 4: Disponibilidad Mensual por Mantenimiento 58

Tabla 5: Parámetros de Operación para Tripulaciones 59

Tabla 6: Tiempos de Vuelo Asignados a Pilotos 63

Tabla 7: Periodos de Servicio de Vuelo Mensual asignado a Pilotos 64

Tabla 8: Períodos de Descanso asociados a Pilotos 66

Tabla 9: Eficiencia de Pilotos con respecto a Capacidad Asignada 73

Tabla 10: Cambios en Asignación de Horas de Vuelo de Pilotos 76

Tabla 11: Variación de Capacidad de la Flota al Incorporar un Piloto 77

Tabla 12: Variación en Tiempos de Vuelo al Incorporar un piloto 78

Tabla 13: Variación de Capacidad de la Flota al Incorporar dos pilotos 79

Tabla 14: Variación en Tiempos de Vuelo al Incorporar dos pilotos 80

Tabla 15: Variación en Tiempos de Vuelo al Incorporar tres pilotos 82

Tabla 16: Variación de Capacidad al incorporar tres pilotos en modelo modificado 83

Tabla 17: Variación en Tiempos de Vuelo al Incorporar tres pilotos en modelo modificado (Fuente: Elaboración Propia) 84

Tabla 18: Habilitaciones de Tipo 93

Tabla 19: Dornier D-228 (CC-AAQ) 93

Tabla 20: Dornier D-228 (CC-CWC) 94

Tabla 21: Dornier D-228 (CC-CWX) 94

Tabla 22: Dornier D-328 (CC-ACG) 95

Tabla 23: Dornier D-328 (CC-AEY) 95
Tabla 24: Cessna Citation S-550 (CC-CWW) 96
Tabla 25: Cessna Citation S-550 (CC-CWZ) 96
Tabla 26: Cessna 421 (CC-CWE) 97
Tabla 27: Piper PA-31T Cheyenne I (CC-CWD) 97
Tabla 28: Piper PA-31 Navajo Panther (CC-CWB) 98
Tabla 29: Gulfstream G-150 (CC-CWK) 98
Tabla 30: Resumen de Vuelos Realizados durante Periodo Analizado 99
Tabla 31: Parámetros de pilotos en Modelo Base 99
Tabla 32: Parámetros de pilotos al incorporar un nuevo Piloto 100
Tabla 33: Parámetros de pilotos al incorporar dos Pilotos 100
Tabla 34: Parámetros de pilotos al incorporar tres Pilotos 101
Tabla 35: Parámetros de pilotos en Modelo modificado con tres pilotos nuevos 101

CAPÍTULO I: ANTECEDENTES GENERALES

1.1. Introducción

La investigación de Operaciones nace ante la necesidad por parte de las empresas, a medida que se especializan y crecen, de tener un método que los ayude a resolver los crecientes problemas que presentan en la asignación de los recursos disponibles hacia las actividades que desempeñan, de una manera que sea más eficaz para la organización. “La IO se ha aplicado de manera extensa en áreas tan diversas como manufactura, transporte, construcción, telecomunicaciones, planeación financiera, cuidado de la salud, milicia y servicios públicos, entre otros. Así, la gama de aplicaciones es extraordinariamente amplia” (Hillier & Lieberman, 2002).

En la industria del transporte aéreo, las aplicaciones de la investigación de operaciones también son muchas y diversas. Suelen usarse modelos de programación para optimizar los itinerarios de vuelo de las aerolíneas, en base a la mayor utilización de sus aeronaves y tripulaciones. Otro uso es en la optimización de modelos de tarificación para maximizar la tasa de ocupación de la flota de una empresa aérea. El punto en común entre los dos ejemplos mencionados es que estos modelos funcionan solamente para líneas aéreas que realizan vuelos itinerantes, con la posibilidad de planificar sus operaciones a mediano y largo plazo.

En este informe de título, se utilizan las herramientas de la Investigación de Operaciones para formular un modelo de programación lineal que permita conocer la capacidad efectiva de Aerocardal, empresa aérea que se especializa en la operación de vuelos ejecutivos, ambulancia y chárter, es decir, vuelos catalogados como no regulares y que no siguen una serie sistemática, por lo que la variabilidad en los contratos de vuelo dificulta la planificación. El objetivo es que, a través del modelo diseñado, sea posible calcular la cantidad máxima de horas de vuelo con que la empresa cuenta para operar, de acuerdo a una serie de factores que actúan como restricciones al problema de maximización, tales como la flota de aeronaves existente, los recursos humanos disponibles, la normativa aeronáutica vigente, y cualquier otro factor que pueda restringir la capacidad efectiva de la empresa.

1.2. Antecedentes de la Empresa

Aerocardal es una compañía que nace el año 1991, de la mano de la familia Kaufmann, prestando servicios de Chárter, es decir, vuelos contratados particularmente para llevar a una determinada cantidad de pasajeros a un destino convenido. Con el tiempo, la empresa ha logrado expandirse, ofreciendo servicios de evacuación aeromédica, conocido también como vuelos ambulancia, vuelos de tipo ejecutivos, y a partir del año 2012 definió sus primeros vuelos privados regulares, determinados por itinerarios fijos, hacia la comuna de Vallenar (región de Atacama) así como a la Minera Los Pelambres (Salamanca, región de Coquimbo). Además, posee un terminal de pasajeros propio y con prestación de servicios aeronáuticos (Operador de Base Fija, FBO en inglés).

Al ser una empresa pionera en el mercado de los vuelos no regulares, es además la líder en este ámbito en el país. Sin embargo, según Acosta (2012), Aerocardal ha ido perdiendo su posición de privilegio en los últimos diez años. Las razones que expone el autor son la fuerte rivalidad existente en el mercado, donde los competidores han aumentado en el tiempo, con materiales de vuelo más modernos y eficientes, además de nuevos agentes que buscan posicionarse con estrategias de bajos precios, saturando el mercado de vuelos generales, así como de ambulancias y servicios FBO. En cambio, la demanda por estos servicios se mantiene en general constante, sumado a que el nivel de fidelidad del cliente es bajo.

Las áreas de negocio que Aerocardal maneja son seis (Acosta, 2012):

- Vuelos Ejecutivos: Servicio que suele ser ofrecido para ejecutivos de empresas así como para realizar viajes de placer, cuyos vuelos se desarrollan dentro como fuera del país, alcanzando una cobertura superior a 2700 millas náuticas.
- Vuelos Ambulancia: Servicios de traslado de pacientes estables, es decir, sin peligro de muerte. Además de los pilotos, existe una tripulación médica formada por un médico y un enfermero universitario. Una variación de esto es el servicio de rescate aeromédico, el cual se efectúa con helicópteros.

- Vuelos Itinerantes: La empresa opera dos contratos de este tipo, garantizando vuelos a Los Pelambres los días lunes y jueves, así como a Vallenar los lunes, miércoles y viernes. Los clientes de esta modalidad son principalmente mineras.
- Soporte y Apoyo Terrestre a Aeronaves: Línea de negocio conocida como FBO, su actividad es prestar soporte terrestre y servicios de terminal aéreo a aeronaves ejecutivas que operen en Chile.
- Servicio de Mantenimiento: Principalmente prestan servicios a sus propias aeronaves, no obstante, han comenzado a operar para terceros debido a la representación y venta de aeronaves que la empresa también realiza.
- Representante Oficial y Venta de Aviones: Desde el año 2008, Aerocardal representa a la empresa Cirrus en el país, al igual que desde el 2010 a Embraer.

Hasta el momento de realización de este proyecto, Aerocardal cuenta con una flota de 16 aeronaves, de los cuales 3 corresponden a helicópteros. El más utilizado es el Gulftream G150 (matrícula CC-CWK), avión con capacidad para 8 pasajeros, el cual presta servicios de vuelos ejecutivos y ambulancia aérea. Del total de horas de vuelo realizadas en el año estudiado en este informe, el 25% corresponde a esta aeronave. Les sigue en importancia los dos Cessna Citation S-550 (CWW y CWZ), aviones con capacidad para 7 pasajeros y cuya función en la empresa es análoga al G150. Entre ambos hicieron el 28% del total de HV anual.

Los tres Dornier D-228, los cuales realizaron el 23% de las horas de vuelo, son aviones de 14 (D228-100; AAQ) y 19 pasajeros (D228-200; CWC y CWX), los cuales se encuentran realizando los vuelos itinerantes a Los Pelambres, además de realizar vuelos ocasionales de tipo chárter. Les siguen los dos Dornier D-328 (ACG y AEY), las aeronaves de mayor capacidad de la empresa (31 pasajeros). Actualmente son los que hacen los vuelos a Vallenar, aportando un 15% al total de horas de vuelo del último año. El Piper PA-31 Cheyenne I (CWD), con capacidad para 5 pasajeros, es utilizado para transporte ejecutivo y ambulancia, habiendo volado un 8% del total. Finalmente, los aviones Cessna 421 (CWE) y el Piper PA-31 Navajo Panther (CWB) completan la flota operativa, volando entre ellos un 1% del total. El Cirrus SR22 (ABL) no se explota

comercialmente, ya que es parte del programa de venta de aviones Cirrus, del cual Aerocardal tiene la representación.

1.3. Problema de la Investigación

Tal como se ha mencionado en los antecedentes de la empresa, las principales líneas de negocio de Aerocardal corresponden a vuelos ejecutivos, de ambulancia y chárter, conocido también como no regulares. Los vuelos que son considerados no regulares son, por su naturaleza, contratos que responden principalmente a una mayor variabilidad de la demanda. Si bien, "los dos elementos básicos que afectan la demanda aérea son la actividad económica de un país o zona y las tarifas ofrecidas" (Benito, 2009), el tráfico no regular además responde a características de estacionalidad (períodos de vacaciones o festividades) y a situaciones puntuales (como el servicio de ambulancia). El tráfico regular es permanente y constante, por ende, responde a otros estudios de demanda para la determinación de sus itinerarios.

Es por esto que, para cumplir con los requerimientos propios de los vuelos no regulares, la empresa debe contar siempre con tripulaciones preparadas para tomar los contratos que surjan, en cuanto a cantidad de pilotos y sus habilitaciones para volar los distintos materiales de vuelo, tanto como que éstos permanezcan dentro de los rangos permitidos de períodos de servicio y de descansos, según la normativa aeronáutica. Además de las aeronaves con sus mantenimientos programados al día y en condiciones para ser utilizados.

Intentando reducir esta incertidumbre relativa al tráfico no regular es que Aerocardal realiza los mencionados vuelos a Vallenar y a Los Pelambres, tres veces por semana y cuya principal motivación es el transporte de personas vinculadas al área de la minería. Si bien estos vuelos se realizan en base a itinerarios, son privados en el sentido que son acordados directamente con las mineras involucradas. Así, la empresa asegura un coeficiente de ocupación máximo y logra mantener sus aeronaves más tiempo en el aire.

La programación de todos los vuelos recae sobre el área de Operaciones de la empresa, quienes deben además lidiar con los problemas que conlleva el recibir un nuevo

contrato en momentos donde la tripulación se encuentra haciendo los vuelos a las mineras (con particulares características, como se demostrará más adelante) o cubriendo otros viajes. Esto lleva en ocasiones a recurrir a pilotos extras, traídos desde fuera para cumplir de manera extraordinaria con los requerimientos de vuelo.

Además, debido a las características de los vuelos que deben realizar, existe una mayor utilización de algunos tipos de aviones de la flota por sobre otros, por lo que estos últimos pasan más tiempo en tierra del deseado.

Por todo esto es que, en el ámbito de operaciones, una de las grandes interrogantes al momento de hacer gestión y planificación de nuevos negocios, es la de conocer la real capacidad operativa de la flota de aeronaves, así como los motivos por la cual ésta puede llegar a restringirse.

Si bien la empresa tiene conocimiento aproximado de los niveles máximos de horas de vuelo que su flota de aviones puede dar, estas estimaciones, así como las decisiones operacionales, se basan básicamente en la experiencia de la gente de operaciones, de sus mayores ejecutivos y de sus pilotos más importantes y con mayor recorrido, además de la información histórica con la que cuentan en el departamento.

En razón de lo expuesto es que se toma la decisión de desarrollar un método eficiente, que pueda ser utilizado y modificado por la misma gente de la compañía, que permita conocer la real capacidad operativa de la empresa, en horas de vuelo. Esto, de acuerdo a la flota de aviones existente, los recursos humanos disponibles, la normativa aeronáutica vigente, y cualquier otro factor que pueda restringir la capacidad.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Determinar la capacidad productiva efectiva de la empresa Aerocardal, a través de un Modelo de Programación Lineal que entregue el valor óptimo de las horas de vuelo disponibles de acuerdo a su flota, tripulación, mantenimiento y el cumplimiento de las normativas, con el fin de que sea una herramienta de ayuda para la gestión y planificación de la compañía.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Determinar y documentar las distintas causas que afectan o restringen la capacidad de la flota actual.

- Generar un modelo de programación lineal, de tipo maximización de la función objetivo, sujeto a las restricciones determinadas.

- Desarrollar un método computacional que resuelva el modelo de programación lineal, cuyo entregable sea el valor de la capacidad productiva efectiva de la empresa, y que permita la modificación de sus variables a futuro.

- Elaborar un análisis de la situación actual de la capacidad de la flota obtenida con el modelo, comparándolo con información histórica y estableciendo casos, para así determinar los cambios que se han producido.

1.5. Alcance

El análisis a realizar se enfoca en las aeronaves y en la tripulación con las que cuenta Aerocardal, en específico los aviones, dejando fuera del modelo a los helicópteros, ya que representan un porcentaje menor del total de operaciones de la empresa. Además, se ha acotado la investigación de las tripulaciones sólo a los pilotos, separando del problema a auxiliares de vuelo, considerando que, por normativa, el uso de tripulación de cabina se exige en aviones de 20 asientos en adelante (DAN 121, DGAC, 2015) siendo el caso de sólo dos aviones de la flota.

La investigación es de tipo Exploratoria, ya que la obtención de la capacidad real de la empresa es un dato que hasta el momento no se conoce con exactitud, por lo que el análisis entregará nueva información de utilidad para Aerocardal en áreas de planificación. También tiene un alcance Correlacional en el sentido de que se requiere de distintas variables que se mezclan para obtener el resultado final, tales como el número de aviones, su disponibilidad, las habilitaciones de los pilotos, normativas, entre otras.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Mercado del Transporte Aéreo

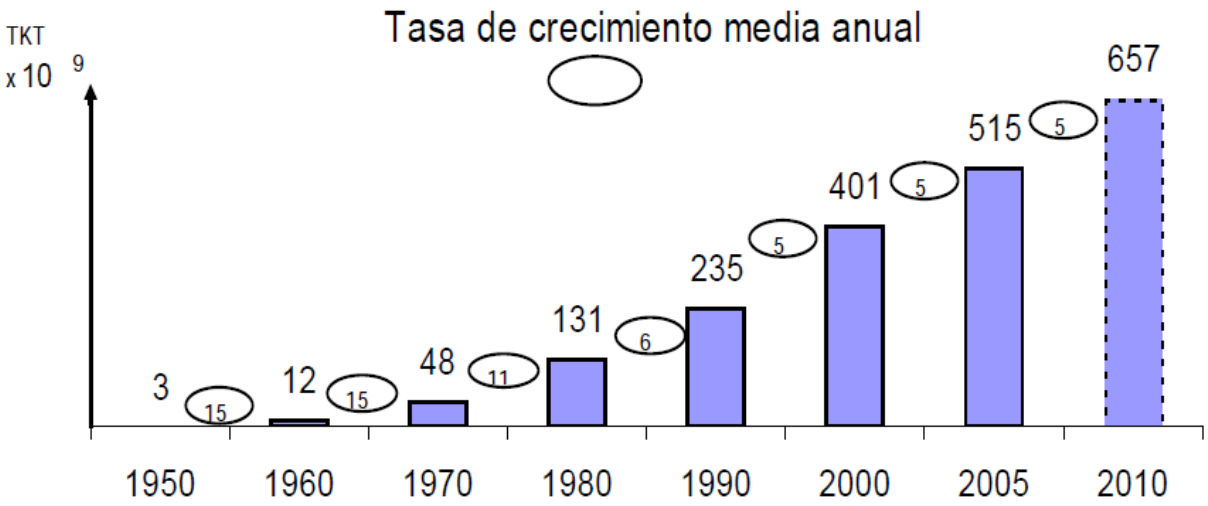
Los inicios de la aviación comercial se remontan al año 1910, cuando la compañía alemana DELAG comienza a ofrecer servicios aéreos regulares entre ocho ciudades germanas usando dirigibles. Posterior a la Segunda Guerra Mundial viene la consolidación del transporte aéreo como un modo fiable de desplazamiento, impulsado por los avances en tecnología en el material de vuelo así como en infraestructura aeroportuaria, mejorando aspectos como la seguridad, rapidez y alcance de las operaciones.

La tónica de la economía mundial era favorable. Se había conseguido la superación de la crisis de la posguerra. El mundo de los negocios impulsó el desarrollo del intercambio comercial. Las actividades internacionales aumentaron y se produjo una relación y una comunicación entre países, empresas e individuos en constante crecimiento. El intercambio, la interrelación y la intercomunicación se realizan en una gran parte mediante el transporte. La atención preferente al factor tiempo en la actividad comercial contribuye a la utilización cada vez más frecuente de la moderna forma de transporte, el aéreo (Loustan Ferrán, 1977). Exceptuando las fluctuaciones de tipo económico que generan las crisis y los conflictos bélicos en el planeta (las consecuencias de la Guerra del Golfo en 1991 y atentados del 11 de septiembre de 2001 en Estados Unidos, por citar algunos casos), "el transporte aéreo mundial ha crecido de manera ininterrumpida en todos y cada uno de los años transcurridos desde 1946, multiplicando por 200 su volumen de actividad" (Benito, 2009).

La figura 1 esquematiza el mencionado crecimiento que ha experimentado el transporte aéreo mundial post Segunda Guerra Mundial. La unidad de medida es la TKT: Toneladas-Kilómetros Transportados, en este caso de pasajeros y carga. Los valores encerrados en círculos corresponden a la tasa de crecimiento de la industria entre décadas, demostrando lo citado anteriormente con respecto a que la recuperación económica después de la guerra llevó al desarrollo del comercio internacional y a la mayor necesidad de transporte, en este caso el aéreo. Se observa tasas de crecimiento del 15% hasta el

comienzo de la década de 1970, reduciéndose posteriormente a niveles cercanos al 5% en los últimos años.

Figura 1: *Crecimiento del Transporte Aéreo desde 1950*
(Fuente: OACI)



De acuerdo a Loustan Ferrán (1977), además de los factores económicos que llevaron al incremento de la demanda, el progreso tecnológico en la industria llevó a lo que el autor llama una "euforia de crecimiento", provocando un rápido aumento de la oferta de transporte aéreo a través de encargos masivos de material, cada vez más grandes y eficientes. Al llegar a los años 70, la caída en la economía llevó al mercado aeronáutico a enfrentar problemas nuevos en una industria reciente, limitando su crecimiento.

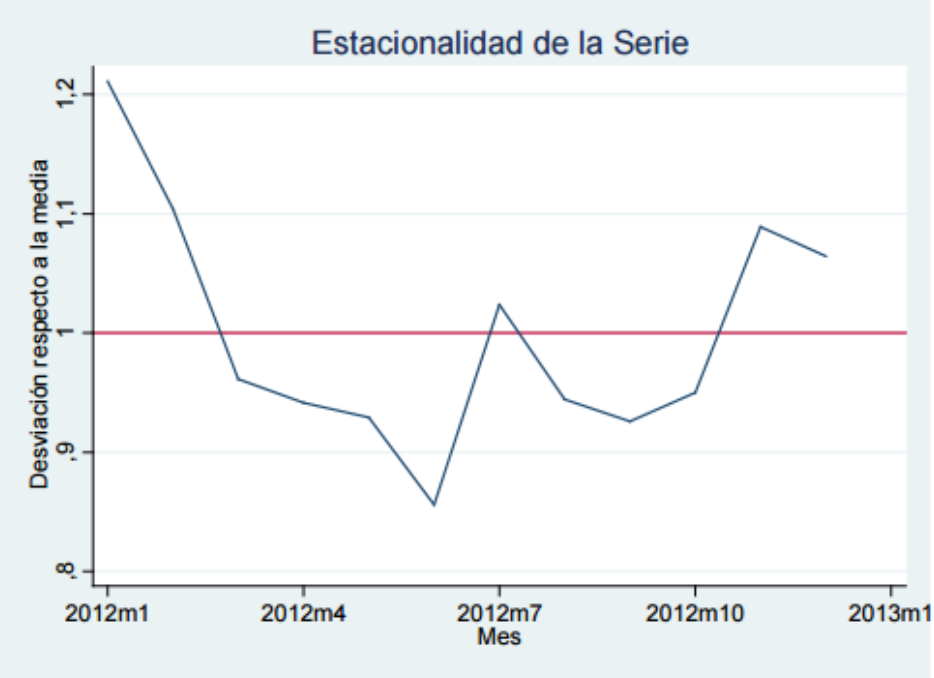
A la subida del precio del petróleo, la construcción y financiación de nuevos aviones además de la elaboración de tarifas, se suman problemas de reglamentación entre los denominados transporte Regular y No Regular (ante la fuerte entrada de la modalidad Chárter y que fue vista como competencia directa) vigente desde el Convenio sobre Aviación Civil Internacional de 1944; y la creciente dificultad para lograr un equilibrio entre la capacidad ofrecida y la demanda de tráfico, bajando las tasas de ocupación y generando alzas de costos operacionales en general. Problema que persiste hasta el día de hoy, extrapolándose desde capacidad por número de asientos no utilizada hasta horas de vuelo que una flota de aviones no explota.

A raíz de lo anterior, la determinación de una correcta oferta de servicios de transporte aéreo, como en cualquier mercado al que se quiera penetrar, conlleva la necesidad de conocer y de valorar las distintas variables que condicionan la demanda. Según Benito (2009), en el caso particular de esta industria, el servicio demandado no es un fin en sí mismo, sino que constituye un elemento necesario para la consecución de otros fines: realizar un negocio, salir de vacaciones, visitar familiares o cualquier otro. La demanda de transporte entonces depende de la demanda de todas estas finalidades y será tanto mayor en cuanto crezca la demanda de las actividades a las que colabora, fenómeno conocido como Demanda Derivada.

2.1.1. Demanda del Transporte Aéreo

El tráfico de pasajeros, como ya se ha mencionado anteriormente, ha registrado un crecimiento sostenido en el tiempo desde los años 50. Además, la demanda por transporte aéreo posee un marcado componente de estacionalidad. En un estudio realizado por la empresa Qualimet Limitada (2013), se determinó que la tendencia sigue siendo al alza tanto a nivel chileno como internacional, a través de un análisis que considera el período desde 2006 al 2012. Además, han logrado demostrar el mencionado componente estacional de la demanda, la que en el caso de Chile es positiva en meses de verano y negativa en invierno, con excepción de julio, justificando el mayor tráfico de pasajeros en las épocas de vacaciones. Como se puede observar en la figura 2, la serie analizada (la demanda aérea en Chile) escapa de la media en su punto máximo positivo en el mes de enero, mientras que en el período entre abril y julio del 2012 se registró la mayor caída en el tráfico de pasajeros.

***Figura 2**: Estacionalidad de la Demanda de Transporte Aéreo en Chile*
(Fuente: Qualimet Limitada, 2013)



Los factores determinantes de la formación de la demanda del transporte aéreo son varios y dependen en algunos casos de la orientación que los autores les dan a sus investigaciones. Sin embargo, distintos estudios coinciden en que los más importantes son, en primer lugar, factores de tipo macroeconómicos (actividad económica, renta y precios); variables estructurales (población, distancias, transportes alternativos); demanda turística y competencia en el modo aéreo.

Factores Macroeconómicos

El primer factor a considerar es la actividad económica de un país, región o global. El crecimiento de la economía genera mayores desplazamientos por motivos de negocio y además aumenta la renta disponible de los ciudadanos, permitiéndoles disfrutar de mayores oportunidades de movilidad y ocio.

Otro factor importante para la formación de la demanda son los precios cobrados. La política tarifaria es el instrumento que tienen las líneas aéreas para ajustar la oferta y

la demanda. Según Benito (2009), en períodos de recesión y cuando la gente vuela menos, la reacción de las compañías es reducir oferta y bajar precios. Lo primero se refiere a reducir capacidad (material de vuelo), lo que es complejo y costoso a corto plazo, pero recomendable en crisis profundas y a mediano plazo. Bajar precios apunta a mantener la liquidez de la empresa, aunque no es sostenible a mediano plazo.

Sumado a lo anterior, se ha demostrado la relativa inelasticidad de los viajes de negocios respecto a los precios, además de ser menos sensibles a las variaciones de estos con respecto a quienes viajan por placer, por lo que se hace fundamental para las líneas aéreas segmentar el mercado para maximizar sus ingresos (Benítez Rochel, 2000). Se menciona que el turista puede asumir más limitaciones que un pasajero de negocios si el precio es suficientemente atractivo, algo que queda en manifiesto ante la proliferación de los vuelos Chárter, donde se manejan grupos de pasajeros que van a destinos normalmente turísticos y con precios más económicos que en vuelos regulares.

Factores Estructurales

En este ámbito, se considera en primera instancia el tamaño y la composición de la población de una determinada región. A mayor cantidad de personas existe una mayor demanda de transporte; sin embargo, si se trata de una población excesivamente joven, en el corto plazo no parece ser un buen estímulo para la demanda de transporte aéreo (Benítez Rochel, 2000). En cambio, una población envejecida y con suficiente poder adquisitivo, como el caso europeo, tiene más potencial para el mercado aéreo.

Otra variable que se suele mencionar es la distancia a recorrer. La demanda aérea crece con la distancia que se deba transportar al pasajero. Pero por otro lado, “el distanciamiento físico entre regiones conlleva un menor grado de integración económica y social y, en consecuencia, una menor necesidad de comunicación” (Russon y Hollingshead, 1989).

Dentro de lo estructural, se considera también a los modos de transporte alternativos, que actúan como medios sustitutos. En el caso de Chile, las mejoras en el sistema de carreteras de norte a sur, además de los precios asociados, hacen que el transporte por bus siga siendo altamente utilizado.

Demanda Turística

La demanda turística, surgida prácticamente a la par con el desarrollo de la industria del transporte aéreo post Segunda Guerra Mundial, está además directamente ligada a las variables macroeconómicas antes citadas. No obstante, a diferencia de los viajes de negocios, los flujos turísticos dependen en gran manera de las preferencias del público y del atractivo comparado de los distintos destinos posibles, éste último siendo explotado por el mercado de los vuelos Chárter, que entre sus fines busca expandir el abanico de posibilidades de destinos turísticos.

Competencia en el modo aéreo

De acuerdo a Benito (2009), los niveles de competencia en el transporte aéreo han aumentado significativamente en los mercados liberalizados, como es el caso de Norteamérica y el intracomunitario europeo. El sector tiene un gran número de empresas y las barreras de acceso al mercado son bajas, por lo que la creación y desaparición de servicios es común.

A nivel operacional existen dos formas de clasificar los vuelos que abarcan de manera general el universo del transporte aéreo. Estos son los vuelos de tipo Regular, que incluye a todas las líneas aéreas tradicionales y a las Low Cost; y los No Regular, que apuntan al mercado de los vuelos por requerimiento o por contrato, es decir, que se producen de acuerdo a una generación puntual de demanda de transporte aéreo. En este grupo se pueden encontrar los vuelos Chárter ya mencionados, vuelos ejecutivos, rescate aeromédico o con fines particulares.

2.1.2. Vuelos Regulares y No Regulares

A lo largo del presente trabajo se habla en distintas ocasiones acerca de los tipos de vuelos o mercados que existen en la industria de la aviación comercial. En especial se tratan dos áreas: el transporte Regular y el No Regular, con particulares características y marcadas diferencias en lo operacional, reglamentario y en los tipos de demanda que buscan satisfacer, sin querer decir con esto que no exista competencia y rivalidad entre ambas partes al momento de captar la mayor cantidad de pasajeros a trasladar.

Con el paso del tiempo, la evolución de las líneas aéreas y la introducción de políticas más liberales de transporte aéreo han provocado que la diferencia entre servicios aéreos regulares y no regulares sea más difícil de establecer, a tal punto que en el año 1992, en el marco de la aplicación de medidas de liberalización del transporte aéreo en la Unión Europea, por parte de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), se aprobó finalmente el eliminar la distinción entre las dos categorías en cuanto a reglamentación, permitiendo que líneas aéreas no regulares exploten servicios regulares y viceversa. Sin embargo, previamente en el año 1952, la OACI había definido el concepto y requisitos de "Servicio Aéreo Internacional Regular", para que por exclusión quedaran definidos como No Regulares los vuelos que no cumplieran la definición.

A partir de la declaración otorgada por la OACI, un Vuelo Regular es aquel que se realiza entre dos o más puntos, siendo éstos siempre los mismos; en base a itinerarios y horarios establecidos de tal forma que su regularidad constituya una serie que pueda reconocerse como sistemática. Caso opuesto es el que se considera como Vuelo No Regular.

Los vuelos que son considerados no regulares son, por su naturaleza, contratos que responden principalmente a una mayor variabilidad de la demanda. Si bien, "los dos elementos básicos que afectan la demanda aérea son la actividad económica de un país o zona y las tarifas ofrecidas" (Benito, 2009), este tipo de tráfico responde tanto a características de estacionalidad ya mencionados (períodos de vacaciones o festividades) así como esencialmente a situaciones puntuales (como el servicio de ambulancia prestado por Aerocardal). El tráfico regular puede considerarse como permanente y constante, con historiales de demanda conocidos, cuya previsión puede realizarse con menor

incertidumbre, y por ende, es posible la determinación de itinerarios y planificación de recursos.

Aun cuando los vuelos de tipo ocasional o a requerimiento especial han existido desde los inicios de la aviación, se señalan sus inicios como modelo de negocios (chárter) posterior a la Segunda Guerra Mundial. Según Loustau Ferrán (1977), entre las razones que lo motivaron están:

- Exceso de material de vuelo inactivo y en condiciones de ser utilizada, en especial modelos de transporte. En Estados Unidos era posible comprar a precios económicos, permitiendo iniciar operaciones a bajos costos.
- Tripulaciones licenciadas de la guerra con la suficiente experiencia y veteranía para operar los aviones en sus nuevos usos.
- Imposibilidad de las líneas aéreas regulares de atender la creciente demanda de transporte aéreo. Luego de la guerra, estas compañías aún no tenían gran expansión, las rutas eran limitadas y las tarifas muy altas.
- Relacionada al punto anterior, el progreso del comercio mundial junto con la elevación del nivel de vida, provocando el desarrollo del turismo y la necesidad de nuevos destinos.

El crecimiento de los vuelos chárter se produjo gracias a los bajos precios que ofrecen al operar generalmente a máxima ocupación, cuyos pasajes se venden en paquetes turísticos a veces a través de agencias de viajes. En el tráfico regular es más difícil alcanzar tasas de ocupación elevadas, sus costos de operación son mayores y por lo tanto sus precios son en teoría más altos. Como se observará más adelante, la empresa Aerocardal ofrece un servicio de vuelos a Vallenar y a Los Pelambres, en el que se mezclan conceptos en el sentido de que éstos son de carácter privado (llevan personas vinculadas a la minería), pero a la vez son regulares al salir tres veces por semana, intentando disminuir así la incertidumbre relativa al tráfico no regular, asegurando un coeficiente de ocupación máximo y manteniendo sus aeronaves más tiempo en el aire.

El alcance de este informe se desenvuelve en el mercado del transporte no regular, buscando un método que permita conocer la capacidad de la flota de aviones de la empresa mencionada para atender vuelos a requerimiento mientras realiza otros a itinerario fijo.

2.2. Capacidad de Flotas

El concepto de Capacidad puede definirse como “el volumen de producción o número de unidades que puede almacenar o producir una instalación en un período de tiempo específico” (Heizer y Render, 2009). Esta definición es bastante amplia en el sentido que habla de una instalación que puede generar o almacenar elementos, siendo la capacidad lo más que esta unidad pueda abarcar. También se le conoce a la capacidad como la máxima cantidad de un producto o servicio que puede ser obtenido en una determinada unidad productiva durante un cierto período de tiempo, apuntando en este caso a la realización misma del elemento, e incluyendo que puede ser tanto físico como un servicio intangible.

De cualquier forma, la capacidad en cuanto a su medición, se expresa como una tasa. En el caso de plantas productivas, la capacidad se calcula como el número de unidades producidas en un tiempo específico. En el caso estudiado en esta memoria, se usa como medida de capacidad la cantidad de Horas de Vuelo (HV) máxima que la flota de aeronaves en la empresa analizada puede operar en un mes.

De acuerdo a Heizer y Render (2009), el tema de la capacidad para una empresa es una decisión estratégica compleja, que apunta principalmente a la alta dirección en el sentido que construir o generar capacidad requiere de altas inversiones en el marco de un plan coordinado para colocar a la empresa en una posición ventajosa. Dentro de esto último, el autor cita ventajas competitivas que pueden lograrse al modificar capacidad, como flexibilidad de los procesos, mayor velocidad de entrega, mejoramiento de calidad, modernización de flotas. Dada la importancia de este ítem en una firma es que, entonces, las decisiones relativas a la capacidad deben estar integradas en la misión y estrategia de la misma.

En relación con lo ya señalado, las decisiones de capacidad que se tomen dependen del horizonte de planeación que se considere. En ese sentido, Heizer y Render (2009) señalan que las decisiones de capacidad a largo plazo, sobre un año, recaen en los altos ejecutivos de una empresa, y apunta a modificaciones estructurales de tipo expansión de instalaciones, nuevos equipos y altas inversiones. A mediano plazo, la planeación depende de las áreas intermedias de jefatura, en la que pueden modificar capacidad agregando

equipos, turnos o subcontratar. A corto plazo, la planeación se trata más de programación y asignación de trabajos, maquinaria y personal, siendo difícil modificar la capacidad dada. Estas decisiones están en manos de supervisores, capataces o jefes de sección.

2.2.1. Planificación de las Necesidades de Capacidad

El cálculo de la capacidad, como ya se ha mencionado, es un tema que atañe a la alta dirección, con el que buscan obtener ventajas competitivas, lograr satisfacer las necesidades del cliente y combatir el tiempo ocioso o la sobreutilización de sus recursos. Existen ciertas preguntas que deben hacerse al momento de planificar las necesidades de capacidad de una empresa. Estas son:

- ¿Cuánta capacidad se necesita?
- ¿Cuándo se necesita?
- ¿Qué tipo de capacidad se necesita? (Blanco Callejo, 2012).

Esto en función de los productos y servicios que la empresa defina. En lo referente a este trabajo de memoria, y como se verá en el desarrollo del problema, el tipo de capacidad apuntará a modificaciones de corto plazo, que se referirá a tripulación de vuelo, o a cambios a mayor plazo, que sería una variación en el tamaño de la flota de aeronaves.

Las preguntas descritas apuntan a la toma de decisiones que permitan lograr un balance entre la capacidad disponible y la necesaria. Esta es una adecuación que debe realizarse continuamente en el que, por un lado, debe estimarse cuánta capacidad tiene la empresa a disposición para operar y luego diseñar acciones para alcanzar el mencionado equilibrio con la capacidad necesaria.

La capacidad necesaria se trata de prever la demanda que la empresa desea satisfacer en el futuro y las necesidades de capacidad requeridas. El reto en este momento reside en la medición de la demanda, cuya dificultad varía de acuerdo al mercado que se analice. Como se ha señalado en el capítulo anterior, en el caso de la aviación comercial es difícil establecer patrones de crecimiento de la demanda ya que ésta depende de muchos factores que están en constante cambio, como por ejemplo, la situación económica del momento y los efectos de ésta en las rentas, precio del combustible, tarifas, entre otros.

Sin embargo, hay métodos de previsión que van desde métodos cualitativos hasta modelos probabilísticos que permiten trazar una tendencia con cierta fiabilidad. El caso es más complejo en el mercado de los vuelos no regulares, donde la mayor variabilidad, así como las marcadas características de estacionalidad (vuelo chárter) dificultan una predicción fiable.

Dentro de esta búsqueda por lograr esa adecuación entre la capacidad disponible y la necesaria, el alcance de esta memoria apunta a obtener un método matemático que permita calcular la primera parte de esta igualdad. A partir del conocimiento obtenido del tamaño de la flota de aeronaves de la empresa Aerocardal, el número de pilotos habilitados para volar, las restricciones normativas, técnicas y otras existentes, se genera un modelo de programación lineal que entregue las horas de vuelo máximas que la firma tiene como capacidad operativa.

Conocidas ya la capacidad disponible de las instalaciones o flotas, y la necesaria para satisfacer el nivel de demanda fijado, hay que tomar medidas para llevar la primera al nivel de la segunda. Heizer y Render (2009) definen tres casos: la demanda excede la capacidad instalada, el caso opuesto y el ajuste a demandas estacionales.

Cuando la demanda es mayor a la capacidad, los autores hablan de reprimir la demanda con aumentos de precios y desestimulando algunos negocios redituables, así como mejoras en los procesos para aumentar producción, como medidas de corto plazo. A largo plazo la solución es el aumento de capacidad, al ser las instalaciones inadecuadas.

En el caso que la capacidad resulta ser mayor a la demanda, Heizer y Render apuntan a la baja de precios y mercadotecnia agresiva, adaptación al mercado con cambios al producto, aumento en flexibilidad de los procesos para atender a las cambiantes preferencias de producto. Como última medida deciden el cierre de instalaciones

La última situación expuesta es el ajuste a demandas estacionales, señalando el desarrollo de productos o servicios complementarios, es decir, la demanda para uno es alta cuando es baja para el otro. En estos casos se aprovecha el uso de maquinarias y procesos para fabricar productos que apuntan a periodos distintos. Llevando este punto al caso analizado en este trabajo, Aerocardal desarrolla vuelos itinerantes al norte de Chile en un intento por disminuir la demanda por vuelos no regulares a lo largo del año, y por

mantener más tiempo en el aire su material de vuelo en momentos del año donde el requerimiento por vuelos chárter es menor. El ajuste de capacidad en las líneas aéreas es un factor muy importante y complejo, ya que requiere la modificación de material humano o material de vuelo a largo plazo.

2.2.2. Conceptos de Capacidad y Medidas de Desempeño

Anteriormente se definió Capacidad como la máxima cantidad de un producto o servicio que puede ser obtenido en una determinada unidad productiva durante un cierto período de tiempo, siendo ésta una tasa. Sin embargo, según Heizer y Render (2009), la definición puede dividirse en dos nuevos conceptos que apuntan al alcance de la medición realizada.

- **Capacidad de Diseño**

Corresponde a la "máxima producción teórica de un sistema en un período dado de tiempo bajo condiciones ideales". A este concepto también se le conoce como Capacidad Proyectada.

- **Capacidad Efectiva**

A partir de lo diseñado, la Capacidad Efectiva es la que una empresa espera alcanzar dadas las restricciones operativas actuales, debido a las mezclas de productos existentes, métodos de programación, mantenimiento y estándares de calidad. Este es el tipo de capacidad al que se propone calcular la metodología propuesta en esta memoria, apuntando a que todas las restricciones operativas mencionadas en la definición pueden llevarse a un lenguaje que permita generar un modelo de optimización.

A continuación, se proponen medidas de desempeño asociados a los conceptos de capacidad y que resultan útiles al momento de gestionar los resultados obtenidos.

- **Utilización**: Es el porcentaje de la Capacidad de Diseño que realmente se alcanza.

$$U = \frac{Producción\ Real}{Capacidad\ de\ Diseño} * 100\ [\%] \tag{2.1}$$

- **Eficiencia**: Es la tasa que se mide al calcular la producción real como porcentaje de la capacidad efectiva, es decir, considerando las limitaciones operativas del sistema.

$$E = \frac{Producción\ Real}{Capacidad\ Operativa} * 100\ [\%] \qquad (2.2)$$

De la ecuación (2.2), cuando se conoce la Eficiencia y la Capacidad Efectiva de un sistema, es posible despejar la Producción Real, la cual puede verse como una "Producción Esperada" en el sentido que, al tener un valor de eficiencia previamente establecido, éste se convierte en un valor "meta" que la producción debería alcanzar, de acuerdo a la capacidad efectiva que se posee. En ese sentido, la diferencia que se pueda obtener entre el valor de la Producción Real y la Esperada puede generar políticas de corrección de problemas de operación (calidad, programación, capacitación, mantenimiento efectivo, entre otros) con el fin de alcanzar una eficiencia fijada.

2.3. Investigación de Operaciones

La investigación de Operaciones (IO) nace ante la necesidad por parte de las empresas de tener un método que los ayude a resolver los crecientes problemas que presentan, a medida que se especializan y crecen, en la asignación de los recursos disponibles hacia las actividades que desempeñan, de una manera que sea más eficaz para la organización. "La IO se ha aplicado de manera extensa en áreas tan diversas como manufactura, transporte, construcción, telecomunicaciones, planeación financiera, cuidado de la salud, milicia y servicios públicos, entre otros. Así, la gama de aplicaciones es extraordinariamente amplia" (Hillier & Lieberman, 2002).

El enfoque que se usa en Investigación de Operaciones está basado en el método científico tradicional, en cuanto a la observación y formulación de un problema; generación de un modelo de optimización junto con una hipótesis de que lo representado se ajusta a la situación analizada y que sus conclusiones serán válidas; y la experimentación y modificación de conceptos, de ser necesario. Con esto, el fin es encontrar una solución óptima del problema estudiado y determinar un curso de acción para alcanzarla.

La resolución de los modelos de optimización diseñados para la resolución de problemas se lleva a cabo a través de algoritmos que se ejecutan con programas informáticos especialmente creados para este fin. Existen diversos tipos de optimizadores (solvers) de acuerdo a las características del problema, con modelos que pueden resolverse usando conocidas herramientas como Microsoft Excel y sus complementos, como también aplicando lenguajes de modelación matemática junto con los respectivos programas de resolución.

2.3.1. Etapas Asociadas al Desarrollo de un Modelo de Optimización

De acuerdo a Hillier y Lieberman (2002), las fases que normalmente se siguen en un estudio de Investigación de Operaciones son las que se describen a continuación, basadas en el enfoque del método científico.

- Definición del Problema y Recolección de Datos

Esta primera etapa resulta ser extensa en tiempo pero a la vez crucial, ya que al final de ésta se tiene perfectamente formulado el problema a estudiar y todos los aspectos que lo motivan. En esta fase el estudio del problema a analizar incluye el determinar los objetivos a perseguir, restricciones en lo que se puede hacer, interrelaciones entre áreas, diferentes cursos de acción, límites de tiempos de decisión, entre otras situaciones que permitan una completa definición y entendimiento de la situación a estudiar.

Junto con lo anterior, esta fase comprende la recolección de datos relevantes sobre el problema, que se extiende en tiempo y en cantidad de información a procesar, con el fin de lograr un entendimiento total de la situación, así como para proporcionar el insumo adecuado para el modelo que se formulará en la siguiente etapa. La calidad de la información es un punto que se analiza aquí, ya que puede ocurrir que no existan todos los datos necesarios para cubrir ciertos temas, por lo que el uso de estimaciones puede ser requerido.

- Formulación de un Modelo Matemático

El modelo matemático es una representación idealizada que describe la esencia del problema definido en la fase anterior, formulada de manera tal que permita su análisis, a través de un sistema de ecuaciones y expresiones matemáticas relacionadas. Se compone de variables de decisión y parámetros, los que construyen una función objetivo y las restricciones asociadas al problema.

Las Variables de Decisión son la representación de distintas decisiones, cuantificables y relacionadas entre sí, que el modelo considera para darle solución al problema y a las que se le asigna un valor respectivo. Luego, la Función Objetivo (FO) es una medida de desempeño que concentra la solución del problema, expresada como una función dada por las variables de decisión. Es en la función objetivo donde se ingresa la decisión de maximizar o minimizar, según sea el caso. Una vez definida la FO, las Restricciones agrupan todas las limitaciones encontradas en la fase anterior, en forma de ecuaciones o desigualdades, impuestas sobre los valores que toman las variables de decisión. Éstas acotan la solución óptima expresada en la función objetivo. Finalmente, los Parámetros del modelo son las constantes o los datos de entrada usados en las restricciones y función objetivo. Con todo esto, el modelo matemático consiste en la determinación de los valores de las variables de decisión que optimicen la función objetivo, según las restricciones impuestas.

- Desarrollo de Procedimiento Computacional para la Búsqueda de Soluciones

Esta etapa apunta a la elección de un mecanismo que permita obtener soluciones a partir del modelo matemático generado en la fase anterior. Generalmente, ésta se lleva a cabo a través de métodos computacionales capaces de operar con altas cantidades de variables y restricciones.

Existen diversos métodos de resolución de modelos matemáticos de manera computacional, en los que básicamente la elección varía dado el tamaño y tipo de modelo que se quiere resolver, lenguaje o plataforma de modelamiento, nivel del usuario en programación y hasta la posibilidad de obtención de los softwares y algoritmos de

resolución. Así, para problemas de pocas variables de decisión y restricciones, normalmente se utiliza Excel Solver, herramienta incorporada en Microsoft Excel. Sin embargo, existen paquetes de software con mayor capacidad y estabilidad para resolver problemas por sobre 200 variables de decisión, como Premium Solver Platform, de la empresa Frontline Systems, el cual permite además agregar optimizadores con mayor capacidad de resolución según sea el caso. Herramientas similares son What'sBest! De Lindo Systems y OpenSolver, los que, al igual que Premium Solver, funcionan como complementos en Excel, por lo que hay que adaptar el modelo matemático a una hoja de cálculo de dicho software. Este último punto es el importante en esta fase, ya que es el traspaso de un modelo bajo una estructura algebraica típica, a otro en el que la interrelación entre las variables, parámetros y el ingreso de restricciones debe ser perfecta.

Para evitar en parte esta dificultad en la adaptación del modelo, existen opciones como LINGO, en el que el lenguaje de modelado es igual a como se tendría escrito el problema en la etapa anterior, para luego ser resuelto por el programa LINDO. Otro lenguaje de modelado es MPL de Maximal Software, el cual luego puede resolverse a través de CPLEX.

- Pruebas y Mejoramiento del Modelo

Para llegar a una versión final del modelo diseñado, ciertamente hay antes un proceso evolutivo, en el que se comienza incorporando pocas variables de decisión y restricciones, para luego ir creciendo a medida que los resultados que se van obteniendo son confiables y no se presentan fallos.

Una vez que el modelo alcanza el tamaño previsto, dados los datos recopilados acerca del problema, comienza una larga fase de ensayo y error para poder conformar una versión final. Todo el proceso de prueba y mejoramiento, Hillier y Lieberman (2002) lo definen como Validación del Modelo, el cual deja atrás exhaustivos ensayos y una larga cantidad de modelos remozados, pero cuyo resultado es una versión madura, que entrega soluciones razonablemente válidas.

Si bien es inevitable obtener un modelo que abarque en su totalidad las situaciones que afecten la situación estudiada, la validación de éste llevará a que las fallas importantes sean definitivamente eliminadas y otorgará confiabilidad al uso del modelo.

También se utiliza el término Refinamiento (Valdés, 2016) para referirse a mejoras finales en las restricciones, parámetros, las ecuaciones mismas, o hasta cambiar el tipo de modelo planteado, con el fin de mejorar la eficiencia del modelo en el sentido de entregar una solución lo más cercana a los objetivos fijados, con el menor número de fallas y en menores tiempos de ejecución.

- Análisis de Resultados Obtenidos y Preparación para la Implementación

Una vez que se ha logrado una versión terminada del modelo matemático y del procedimiento computacional para resolverlo, se procede a obtener los primeros resultados finales y la solución óptima al problema planteado en la fase primera, a través del ingreso de los parámetros de entrada recopilados de la información de la empresa. Junto con lo anterior, se realizan análisis de sensibilidad con el fin de ver la forma en que cambiaría la solución del problema cuando el valor dado a un parámetro es modificado. Con el mencionado análisis, se pueden establecer escenarios, el cual enriquece las posibilidades de tomar decisiones al respecto.

Además del análisis de resultados, el objetivo de este modelo es que pueda seguir usándose en el tiempo cuando alguno de los parámetros es modificado y sea necesario obtener una nueva solución al problema. Es por esto que es necesario la generación de un sistema que incluya el modelo y el método de resolución, además de los procedimientos para su implantación. Este sistema debiese ser abierto, para poder integrar en el tiempo nuevos programas, bases de datos, sistemas de información o nuevas interfaces, según sean las necesidades.

- Implantación

Dependiendo del alcance que tenga la herramienta diseñada en la operación de la empresa, es que se requiere de una fase de implementación, la cual debe ser apoyada tanto por la alta administración y gerencias, como por parte del equipo de IO, el cual debe estar

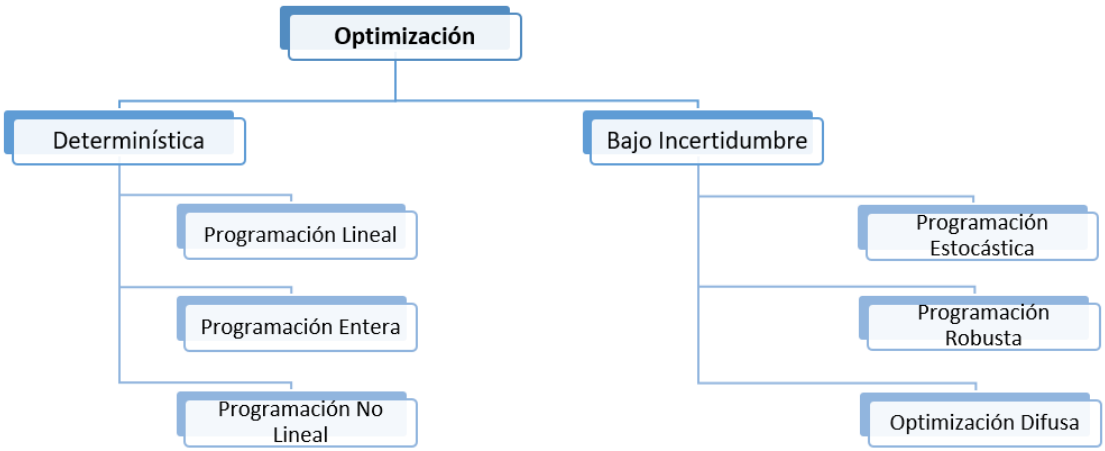
presente para asegurar el funcionamiento del modelo así como para actuar en caso de que aparezcan errores en el sistema.

El proceso de implantación tiene varias etapas, desde la explicación por parte del equipo de IO a la gerencia operativa acerca del sistema propuesto, la capacitación del personal participante, un período de marcha blanca y determinación del éxito o no de la herramienta. En todo el proceso es importante tener una retroalimentación sobre el funcionamiento del sistema.

2.3.2. Tipos de Modelos en Investigación de Operaciones

Los tipos de problemas que pueden resolverse a través de métodos de optimización son diversos, pero se clasifican, en primera instancia, en dos grupos: modelos de Programación Determinística y Bajo Incertidumbre. La siguiente figura muestra la clasificación de los tipos de programación según su naturaleza.

Figura 3: *Tipos de Modelos de Optimización*
(Fuente: Elaboración Propia según Hillier y Lieberman)



Los modelos de tipo Determinísticos son aquellos en los que se obtiene siempre el mismo resultado al mantener las mismas condiciones iniciales. La relación causa-efecto se conoce en su totalidad y la teoría de probabilidades no aplica en estos casos (Peña,

2007). Como se observa en la figura 3, dentro de los modelos determinísticos se encuentran:

- Programación Lineal, en las que la función objetivo y restricciones se encuentran dadas por funciones lineales de variables reales (García, 2011).
- Programación Entera, en el que el domino de las variables de decisión no es real, sino que discreto en su totalidad (Entera Pura) o parte de ellas lo son (Entera Mixta). También pueden ser binarias.
- Programación No Lineal, donde el objetivo y las restricciones se generan a partir de funciones no lineales.

Los modelos Bajo Incertidumbre son aquellos sistemas que funcionan básicamente bajo el azar, sin que exista una relación causa – efecto que pueda explicar el fenómeno que se presenta, por lo que la búsqueda de una solución se da en función de probabilidades (Peña, 2007). De este grupo, los modelos más representativos son la Programación Estocástica, Programación Robusta y la Optimización Difusa.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

La estructura metodológica seguida en la investigación realizada está basada en las etapas asociadas al desarrollo de modelos de optimización, descritas por Hillier y Lieberman (2002) como de uso común para la solución de problemas de este tipo, y que a su vez se apoya en el enfoque del método científico.

3.1. Definición del Problema y Recolección de Datos

El problema que se busca solucionar con esta investigación es la no existencia de un método que permita a la empresa Aerocardal, en específico a su área de Operaciones, conocer la real capacidad productiva que pueden alcanzar, de acuerdo a la flota de aviones que poseen, recursos humanos y respetando la normativa vigente. Esto dificulta, en algunos casos, la posibilidad de gestionar eficientemente los contratos por vuelos que reciben, dada la naturaleza del negocio en el que Aerocardal participa. Este corresponde al mercado de vuelos no regulares, donde pueden existir períodos de máxima utilización de los recursos disponibles, con vuelos de distintas características y requerimientos de tripulación, así como momentos de baja en la demanda, obligando a tener aviones en tierra más tiempo del deseado.

Si bien en Operaciones se conoce de manera aproximada los niveles máximos de horas de vuelo que la flota de aviones puede ser explotada, estos son estimaciones basadas principalmente en la experiencia de sus pilotos y ejecutivos, además de la información histórica con la que cuentan. Por esto es que se toma la decisión de medir la capacidad productiva de la empresa, generando un procedimiento que sea eficiente, reutilizable y modificable en el tiempo.

El enfoque que se le da a esta tarea es el de un problema de Optimización, determinando que lo que se busca es maximizar la cantidad de horas de vuelo que la empresa puede operar, y en el que todos los aspectos que actúen como limitantes son considerados como restricciones al modelo. Conceptualmente, lo que se busca optimizar es la Capacidad Efectiva, ya que esta es la que “una empresa espera alcanzar dadas las restricciones operativas actuales, debido a las mezclas de productos existentes, métodos

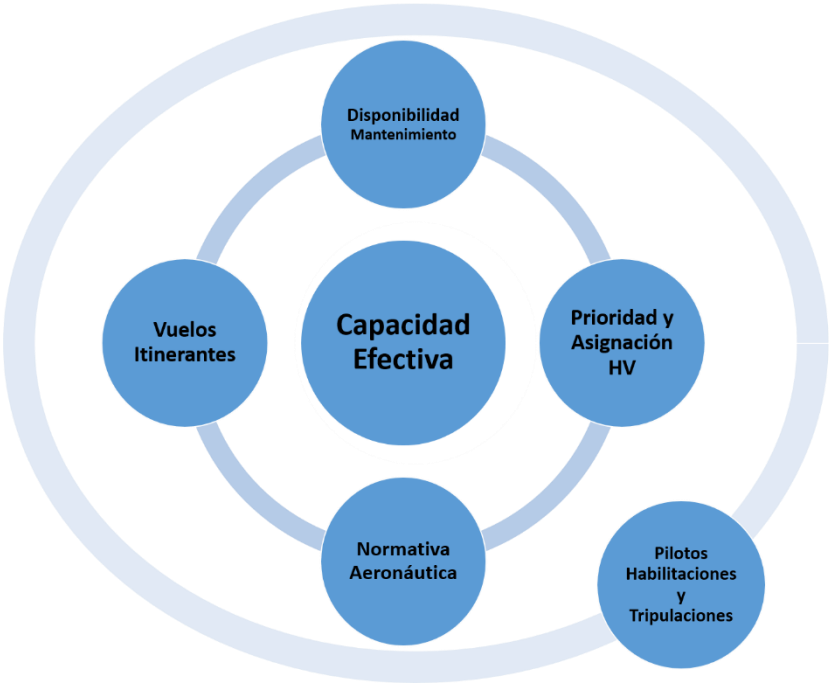
de programación, mantenimiento y estándares de calidad" (Heizer & Render, 2009), apuntando a que lo anterior puede llevarse a un lenguaje matemático que permita generar un modelo de optimización. Entonces, la Capacidad Efectiva corresponde a la cantidad máxima de horas de vuelo que Aerocardal puede llegar a explotar, dadas todas las limitaciones operacionales, de mantenimiento y otras relacionadas, y la cual el modelo que se desarrolla busca maximizar.

El levantamiento de la información, entonces, apunta principalmente a encontrar cuáles son los factores que pueden restringir la capacidad efectiva. Esta fue llevada a cabo a través de entrevistas, en primera instancia con la gente de la gerencia de Operaciones, quienes además proporcionaron toda la información relativa al historial de vuelos de la flota, la cartera de pilotos y sus habilitaciones e historial de vuelo en la empresa, así como otros datos técnicos. También se trató con la gerencia de Mantenimiento, proporcionando información útil sobre la disponibilidad de la flota, así como con Control de Calidad y Gestión y el área de Tecnologías de la Información (IT), quienes entregaron las herramientas para acceder a información interna relevante de la empresa, además de la orientación necesaria.

3.1.1. Aspectos que restringen la Capacidad Efectiva

A partir del levantamiento de información realizado en la empresa con el fin de documentar el problema a estudiar y los aspectos que la motivan, es que se han categorizado en cuatro grupos los principales motivos que normalmente restringen las operaciones y, por ende, la capacidad de la flota. Estos se muestran en la siguiente figura.

Figura 4: *Restricciones que afectan la Capacidad Efectiva de Aerocardal (Fuente: Elaboración Propia)*



Se observa que las cuatro categorías cubren aspectos operacionales, de mantenimiento y de normativa aeronáutica. Además, dentro de cada una existen otras restricciones individuales que serán detalladas más adelante. Puede notarse también que existe un quinto grupo que orbita a los otros conjuntos, referente a los pilotos, sus habilitaciones y las tripulaciones. Estos no se consideran como restricciones propiamente tales (si bien una modificación en alguno de éstos limita la capacidad operativa) ya que sirven en el modelo en forma de parámetros de entrada. Aun así, fueron un importante aspecto en el levantamiento de datos y se les considera clave en la formulación del modelo.

- **Pilotos, Habilitaciones y Formación de Tripulaciones**

Como se acaba de mencionar, esta información no es una restricción directa del modelo, pero es un primer dato básico que comienza por limitar las posibilidades operativas de la empresa.

Al momento del levantamiento de la información y de realización de este proyecto, Aerocardal cuenta con una cartera de 12 pilotos, los cuales cuentan con las habilitaciones de tipo necesarias para poder operar los diversos materiales de vuelo que componen la flota de la empresa (Ver Anexo 1: Habilitaciones de Tipo). De acuerdo al tipo de avión, motores y número de pilotos requeridos es que se determina la habilitación de tipo para cada miembro, la cual es otorgada por la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC). Así, el tamaño de la tripulación de cada avión de la flota analizada en este trabajo debe constar de 2 pilotos, debidamente habilitados para operar en dicho modelo.

Los pilotos y sus habilitaciones son un recurso cuya variabilidad afecta directamente las operaciones, ya que su escasez impide la realización de vuelos, a su vez que a mayor número de pilotos o habilitaciones, se permite más combinaciones de tripulaciones disponibles y en definitiva aumenta la capacidad de operación de la empresa. Una de las tareas del modelo propuesto es la de determinar las combinaciones posibles y maximizar la utilización de éstas.

- **Disponibilidad por Mantenimiento**

La disponibilidad por mantenimiento es un indicador que Aerocardal maneja a través de su software de gestión, el cual se actualiza con una frecuencia mensual, cuyos datos son alimentados desde el área de Mantenimiento. El análisis y medición de este indicador es llevado por el jefe de Control y Planificación Estratégica de la empresa y el objetivo del mismo es evaluar el nivel de disponibilidad de operación de la empresa de acuerdo a los requerimientos de los clientes. Es calculado de la siguiente manera:

$$A_k = \frac{Vuelos\ Realizados_k}{Vuelos\ Realizados_k + NO\ Realizados\ por\ Mantenimiento_k}\ x\ 100 \qquad (3.1)$$

Se le ha llamado A_k a la disponibilidad por mantenimiento para mantener la nomenclatura a lo largo de este informe. El subíndice k es un contador que recorre las aeronaves de la flota. Como se ve en la ecuación (3.1), se obtiene un porcentaje a partir de los vuelos realizados por un avión dado y los que no fue posible efectuar debido a

mantenimientos correctivos. Con esto, es posible decir que, para un mes determinado, tal avión estará disponible en el porcentaje que este indicador señale, siendo esto una restricción que impide que éste pueda volar más, incluso si otras condiciones se cumplen. Si bien se considera como restricción del problema, el dato de A_k es además un parámetro de entrada, el cual puede ser modificado en el modelo de acuerdo a los cambios de disponibilidad mensual de cada avión, pudiendo o no afectar también el valor de la solución óptima.

- **Normativa Aeronáutica**

Se considera que la capacidad efectiva de la empresa se ve limitada por la normativa aeronáutica debido a las exigencias que la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) impone sobre las compañías aéreas en lo relativo a los tiempos de vuelo, períodos de servicio y de descanso de las tripulaciones de vuelo y auxiliares. Específicamente, estos temas están regulados a través del DAN 121: "Requisitos de Operación: Operaciones Nacionales, Internacionales, Regulares y No Regulares", emitido por la DGAC. Dicha norma se aplica para aviones cuyo peso máximo de despegue (MTOW) sea superior a 5.700 kg, que es el caso de 8 de las 11 aeronaves que componen la flota estudiada. Para el caso contrario, se ha usado lo dicho por le Resolución N° 1344 Exenta, emitida por la DGAC con fecha 3 de septiembre de 2009. En cualquier caso, en los temas que se tratarán a continuación no existen diferencias en lo dicho por ambas normativas, por lo que aplican para toda la flota.

a) Tiempo de Vuelo (TV) para Tripulaciones

Corresponde al tiempo total transcurrido desde que la aeronave inicia su movimiento con el propósito de despegar, hasta que se detiene completamente al finalizar el vuelo. De acuerdo al DAN 121, los límites de Tiempo de Vuelo máximos para las tripulaciones están dadas por la siguiente tabla:

Tabla 1: *Tiempos de Vuelo Máximos por Tripulación*

(Fuente: DAN 121, DGAC Chile)

TV [hrs]	Observaciones
8	Continuas o discontinuas en 24 hrs consecutivas.
34	En 7 días consecutivos o
68	en 10 días consecutivos.
100	Mensuales (calendario).
270	Trimestrales.
1000	Anuales (calendario).

En el caso estudiado, el análisis que se lleva a cabo es a nivel mensual, por lo que, de acuerdo a la norma, el máximo permitido para cada miembro de la tripulación de vuelo debe ser de 100 horas.

b) Período de Servicio de Vuelo (PSV)

Es el tiempo transcurrido, dentro de un período de 24 horas consecutivas, desde el momento en que el tripulante se presenta en las dependencias aeroportuarias, con el objeto de preparar, realizar y finalizar operacional y administrativamente un vuelo, hasta que el tripulante es liberado de toda función. El modo de calcularlo depende de lo establecido por el Manual de Operaciones de cada aeronave o ruta, pero se considera que en ningún caso puede ser inferior a una hora antes de la hora prevista de comenzar el vuelo, hasta treinta minutos después de finalizar este.

De acuerdo al DAN 121, para una tripulación de dos pilotos, que es el caso de la flota analizada, el PSV diario no debe ser mayor a 12 horas. Sin embargo, El Código del Trabajo (Artículo 152 ter. D) define que la jornada mensual de trabajo de los tripulantes de vuelo y de cabina no excederá de 160 horas, salvo que la DGAC, por razones de seguridad, determina una jornada menor. Es por esto que, debido al carácter mensual del modelo que se desarrolla en este trabajo, es que se considera el criterio establecido en el Código del Trabajo.

c) Período de Descanso (PD)

Es todo el tiempo en tierra durante el cual área de Operaciones releva a un miembro de la tripulación de toda función relacionada con su trabajo, con el objeto que este se mantenga en descanso para recuperarse física y psíquicamente luego de un Período de

Servicio de Vuelo. El período que se le asigne a un piloto para descansar entonces depende del PSV, lo cual está normado y se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2: *Períodos de Descanso por Tripulación*

(Fuente: DAN 121, DGAC Chile)

PSV [hrs]	Período de Descanso (PD) [hrs]
7 o menos	10
8	12
9	13
10	14
11	15
12	15
13	16
14	17
15	17
16	18
17	19
18	20
19	22
20	24

En lo que respecta al modelo desarrollado, junto con la empresa se ha llegado a ciertas convenciones referentes a la normativa aeronáutica. El primero es que el Tiempo de Vuelo máximo mensual de 100 horas es bastante alto de acuerdo a la carga de trabajo de los pilotos y el historial de vuelo de Aerocardal, por lo que el criterio usado fue de $1000\ [hr/año]/12\ [mes/año]$, con lo que se obtiene un nuevo máximo de $83{,}33\ [hr/mes]$. Además, se decidió formular el problema bajo el criterio de trabajo 5x2, con lo que el máximo de 160 horas al mes de PSV se reduce a jornadas de trabajo máximos de $8\ [hr/día]\ x\ 5[día/semana]\ x\ 4[semana/mes]$. Así, se determina que la suma de horas entre lo que trabaja y descansa por norma un piloto debe ser máximo $24\ [hr/día]\ x\ 5[día/semana]\ x\ 4[semana/mes] = 480\ [hr/mes]$.

- **Prioridad y Asignación de las Horas de Vuelo**

Las restricciones contenidas en esta categoría cumplen una doble función. Por un lado, el área de Operaciones de la empresa siempre busca, en la medida de lo posible, una

repartición homogénea de los contratos de trabajo entre los aviones de la flota que posean similares características de operación, es decir, que no se aplique una mayor carga de trabajo a ciertas aeronaves y que idealmente puedan todos mantenerse el mayor tiempo posible en vuelo. Sin embargo, de acuerdo a los requerimientos que pueda tener un vuelo, se debe priorizar el uso de ciertas aeronaves por sobre otras, generando una mayor utilización histórica de unos por sobre otros. De la misma forma, se intenta lograr una homogeneidad en la asignación de vuelos a la cartera de pilotos que disponen, de acuerdo a las habilitaciones que estos posean para volar ciertos materiales de vuelo, por lo que también es inevitable que unos vuelen más que otros.

Por otro lado, el método computacional desarrollado al resolver el modelo tiende a optimizar de acuerdo al orden en que las variables fueron ingresadas, asignándole una mayor cantidad de horas de vuelo a las primeras aeronaves y tripulaciones, repartiendo así las horas que van quedando, según la solución óptima encontrada, en el resto de la flota y pilotos, lo que hace del resultado obtenido un valor poco realista.

Con lo anterior, es que se obliga al modelo a generar un método que pueda asignar las mencionadas horas de vuelo de acuerdo a las necesidades o metas que la compañía tenga con respecto a su flota o parte de ella, o incluso priorizando a ciertas aeronaves por sobre otras según su participación histórica, pero no según el orden en que fueron ingresados al modelo. De igual forma, se busca que el modelo sea capaz de distribuir de manera equitativa la carga de trabajo entre los pilotos que componen las distintas tripulaciones de la flota, evitando que algunos hagan demasiados vuelos, lo que es poco realista, y obligando a que todos operen.

- **Vuelos Itinerantes**

Los vuelos itinerantes son aquellos que, por su nombre, “se efectúan en base a itinerarios y horarios establecidos de tal manera que su regularidad constituya una serie que pueda reconocerse como sistemática” (OACI, 2008), por lo que se conocen más comúnmente como vuelos Regulares. Como se ha mencionado, el principal mercado de Aerocardal son los vuelos no regulares, específicamente los vuelos ejecutivos, chárter y de ambulancia, por lo que su incursión en este sector es relevante en el sentido operacional.

Hasta el momento de elaboración de este estudio, la empresa realiza dos vuelos itinerantes, ambos vinculados con el área de la minería, hacia la ciudad de Vallenar (región de Atacama) y a la minera Los Pelambres (Salamanca, región de Coquimbo). Para el primer destino se realizan vuelos tres días a la semana (5 frecuencias) a través de dos aeronaves Dornier D-328, cuya duración del trayecto es en promedio 1,1 hora (por lo tanto 2,2 horas ida y regreso). En el caso de Pelambres, se realizan vuelos los días lunes y jueves, con 6 frecuencias semanales, ejecutados con tres aviones Dornier D-228, con una duración promedio del trayecto de 1,25 hora (2,5 horas ida y vuelta).

Para la programación y análisis de los vuelos que la empresa realiza de manera itinerante, se desarrolló un calendario tipo para un mes de 30 días, que se muestra a continuación.

***Figura 5**: Calendario Mensual de Vuelos Itinerantes, empresa Aerocardal (Fuente: Elaboración Propia)*

CALENDARIO TIPO DE VUELOS ITINERANTES								
Semanas	**Lunes**	**Martes**	**Miércoles**	**Jueves**	**Viernes**	**Sábado**	**Domingo**	**Días**
Semana 1	VALLENAR		VALLENAR	PELAMBRES	VALLENAR			**1 al 7**
	PELAMBRES	PEL	ACG	PELAMBRES	ACG			
Semana 2	VALLENAR		VALLENAR		VALLENAR			**8 al 14**
	PELAMBRES	PEL	ACG	PELAMBRES	ACG			
Semana 3	VALLENAR	ACG	VALLENAR		VALLENAR			**15 al 21**
	PELAMBRES		ACG	PELAMBRES	ACG			
Semana 4	VALLENAR	ACG	VALLENAR		VALLENAR			**22 al 28**
	PELAMBRES		ACG	PELAMBRES	AEY			
Semana 5	VALLENAR	AEY	MES SIGUIENTE					**29 y 30**
	PELAMBRES							

De la figura 5 se observa que el día del mes donde hay mayor cantidad de vuelos es el lunes, en el que operan los cinco aviones designados a viajar a Vallenar y Los Pelambres. Esto representa un reto en el sentido operacional, ya que para este día deben haber comprometidos 10 pilotos de los 12 existentes de la cartera total, al momento de la confección de este estudio. Por esta razón es que la aparición de contratos de vuelos no programados en estos días resulta ser problemático ante la falta de tripulaciones que los

cubran, siendo entonces la variabilidad en la programación de vuelos uno de las mayores complicaciones existentes en el mercado de los vuelos no regulares.

a) Vallenar

Como ya se ha mencionado, se hacen cinco salidas semanales a este destino, siendo el avión Dornier D-328 de matrícula CC-ACG quien vuela los tres días señalados en el calendario, y CC-AEY el que opera solo los días lunes y viernes. Por esto es que ACG realiza mensualmente 13 salidas, volando en total 28,6 horas. En el caso de AEY, realiza 9 vuelos con un total de 19,8 horas mensuales. El total de 48,4 horas al mes es lo que los pilotos habilitados para tales aeronaves deben cubrir de manera fija, aparte de los vuelos que puedan realizar por sus otras habilitaciones. De acuerdo a la gerencia de la empresa, no se estima que estos aviones realicen vuelos no regulares salvo excepciones, por lo que se definió que, para el modelado, éstos operen solo a través de itinerarios.

En materia operacional y económica, resulta más rentable para la empresa que tanto aeronaves como pilotos permanezcan en el destino hasta la realización del vuelo de vuelta, en vez de volver a Santiago inmediatamente. Los vuelos de ida salen normalmente entre las 8-9 horas y los de regreso entre las 17-18 horas, por lo que las tripulaciones que realizan dichos vuelos cumplen Períodos de Servicio de Vuelo cercanas a las 8 horas, a pesar de pilotear 2,2 horas. Debido a esto es que a cada miembro de tripulación que vuele a Vallenar se le asigna directamente 12 horas de Período de Descanso, que es lo que indica la normativa aeronáutica al tener PSV de 8 horas.

Los pilotos habilitados para los D-328 son 6 de los 12 existentes en la cartera, los que a su vez están también capacitados para volar los D-228, por lo que pueden realizar vuelos tanto a Pelambres como a Vallenar. Esto significa que este grupo de pilotos pueden llegar a realizar 17 vuelos itinerantes, dependiendo cual es el destino que les corresponda, por ejemplo, los días lunes, de acuerdo al calendario. Analizando los tiempos de vuelo asociados, significa que los pilotos habilitados para ambos tipos de aeronaves pueden llegar a volar hasta 40,1 horas al mes solo haciendo vuelos itinerantes.

b) Los Pelambres

Hacia la minera Los Pelambres existen seis frecuencias semanales, las que se concentran en los días lunes y jueves, como se señala en el calendario de la figura 8. Los aviones Dornier D-228 de matrículas CC-AAQ, CC-CWC y CC-CWX son los utilizados para tales vuelos, operando los tres durante los días señalados salvo que existiese alguna excepción (otros contratos de trabajo, o falta de demanda) que lleve a que no se realice un vuelo. Con esto, cada una de las aeronaves realiza mensualmente 9 operaciones a Pelambres, volando en total 22,5 horas, por lo que las tripulaciones habilitadas para los D-228 deben cubrir las 67,5 horas de vuelo requeridas para cumplir con el calendario. De forma análoga a los D-328, no se contempla que los D-228 realicen otros vuelos itinerantes y no regulares, por lo que, para efectos del modelo, y en acuerdo con la empresa, se considera que estas aeronaves solo prestan servicios de vuelos itinerantes.

Al igual que en el caso de los vuelos realizados a Vallenar, tanto los aviones como las tripulaciones en general permanecen en Pelambres hasta la hora del vuelo de regreso a Santiago, salvo que el rol de vuelo indique que deben operar hacia otro destino posteriormente. Es por esto que a cada piloto se le asigna un Período de Servicio de Vuelo de 8 horas (aunque la operación total pueda durar algo menos), que constituye una jornada de trabajo ordinaria. Con este PSV fijado para cada operación diaria, es que a las tripulaciones involucradas les corresponde un Período de Descanso de 12 horas continuas.

Los pilotos habilitados para los D-228 son 10 de los 12 pilotos en la cartera al momento de este trabajo; 6 de ellos pueden volar además D-328 (Vallenar) y los otros 4 con habilitaciones para el resto de la flota. Entonces, 4 de los 10 pilotos habilitados pueden realizar hasta 9 vuelos a Pelambres al mes, volando 22,5 horas; los otros 6 pueden volar también a Vallenar, por lo que su máximo puede llegar a las 17 operaciones mensuales, volando hasta 40,1 horas.

3.2. Formulación del Modelo Matemático

3.2.1. Índices y Conjuntos

Tanto para la variable de decisión como para los parámetros de entrada, siendo $\boldsymbol{NP}$ el número de pilotos disponibles para formar tripulaciones:

- $\boldsymbol{i} \in \{\boldsymbol{j}+\mathbf{1}, \dots, \boldsymbol{NP}\}$ → Recorre las filas en la matriz de "Tripulaciones Disponibles" de cada avión.
- $\boldsymbol{j} \in \{\mathbf{1}, \dots, \boldsymbol{NP}-\mathbf{1}\}$ → Recorre las columnas en la matriz de "Tripulaciones Disponibles" de cada avión.
- $\boldsymbol{l} \in \{\mathbf{1}, \dots, \boldsymbol{NP}\}$ → Contador que recorre a cada piloto individualizado.
- $\boldsymbol{k} \in \{\mathbf{1}, \dots, \mathbf{11}\}$ → Contador que recorre los aviones de la flota de la empresa.
- Se define a **T** como el subconjunto de los pares ordenados **(i,j)** que considera a las tripulaciones válidas para volar cada avión **k**.

$$\boldsymbol{T} \subseteq \{(\boldsymbol{i},\boldsymbol{j}) | \boldsymbol{i} = \boldsymbol{j}+\mathbf{1}, \dots, \boldsymbol{NP};\ \boldsymbol{j} = \mathbf{1}, \dots, \boldsymbol{NP}-\mathbf{1}\}$$

- Se define a **A** como el conjunto de las aeronaves que componen la flota de la empresa, los que se definen a través de sus matrículas.

$$\boldsymbol{A} = \{\boldsymbol{AAQ}, \boldsymbol{CWC}, \boldsymbol{CWX}, \boldsymbol{ACG}, \boldsymbol{AEY}, \boldsymbol{CWW}, \boldsymbol{CWZ}, \boldsymbol{CWE}, \boldsymbol{CWD}, \boldsymbol{CWB}, \boldsymbol{CWK}\}$$

- Además, se generan **AV y AP** como los conjuntos de las aeronaves que vuelan a Vallenar y Pelambres, respectivamente.

$$\boldsymbol{AV} = \{\boldsymbol{ACG}, \boldsymbol{AEY}\}$$
$$\boldsymbol{AP} = \{\boldsymbol{AAQ}, \boldsymbol{CWC}, \boldsymbol{CWX}\}$$

- Con lo anterior, se define el grupo de aeronaves que realizan vuelos itinerantes como la unión de **AV** y **AP**, llamado el conjunto **AI**.

$$\boldsymbol{AI} = \boldsymbol{AV} \cup \boldsymbol{AP}$$

3.2.2. Parámetros

- $\boldsymbol{NP}$**:** Número de pilotos disponibles en la empresa para generar tripulaciones. En el caso estudiado, $\boldsymbol{NP = 12}$.
- $\boldsymbol{a_{(i,j),k}}$: Parámetro que vale **1** si tripulación $(\boldsymbol{i,j}) \in T$ está habilitada para volar aeronave $\boldsymbol{k}$ y **0** en caso contrario.
- $\boldsymbol{A_k}$: Disponibilidad Real por Mantenimiento de la aeronave $\boldsymbol{k}$.
- $\boldsymbol{R_{MIN\ (k)}}$: Rango mínimo de asignación de horas de vuelo para aeronave $\boldsymbol{k}$.
- $\boldsymbol{R_{MAX\ (k)}}$: Rango máximo de asignación de horas de vuelo para aeronave $\boldsymbol{k}$.
- $\boldsymbol{tv_k}$: Tiempo de Vuelo promedio de cada aeronave $\boldsymbol{k}$.
- $\boldsymbol{hv_l}$ **:** Tiempo de Vuelo máximo permitido por normativa para cada piloto $\boldsymbol{l}$**.**
- $\boldsymbol{psv_k}$: Período de Servicio de Vuelo promedio obtenido para cada aeronave $\boldsymbol{k}$.
- $\boldsymbol{pd_k}$**:** Período de descanso promedio al realizar un vuelo en la aeronave $\boldsymbol{k}$**.**

3.2.3. Variables de Decisión

- $\boldsymbol{X_{(i,j),k}}$: Horas de Vuelo asignadas a tripulación $(\boldsymbol{i,j})$ para el avión $\boldsymbol{k}$.
- $\boldsymbol{PSV_{l,k}}$: Período de Servicio de Vuelo del piloto $\boldsymbol{l}$ en la aeronave $\boldsymbol{k}$.
- $\boldsymbol{NV_{l,k}}$**:** Número de vuelos realizados por el piloto $\boldsymbol{l}$ en la aeronave $\boldsymbol{k}$**.**
- $\boldsymbol{PD_{l,k}}$: Período de descanso asociado al piloto $\boldsymbol{l}$ al volar aeronave $\boldsymbol{k}$.

3.2.4. Función Objetivo

$$MAX \sum_{k \in A} \sum_{(i,j) \in T} a_{(i,j),k} * X_{(i,j),k} \qquad (\mathbf{3.2})$$

La función objetivo responde al problema de maximización de las horas de vuelo de la flota de la empresa en el período de un mes. Dadas las tripulaciones $(\boldsymbol{i,j})$ habilitadas para volar el material de vuelo $\boldsymbol{k}$, entregado por el parámetro $\boldsymbol{a_{(i,j),k}}$, las horas de vuelo

asignadas por el modelo para un avión determinado se concentran en la variable $\boldsymbol{X_{(i,j),k}}$, cuyo valor entregado concentra además las restricciones operativas consideradas en el modelo.

3.2.5. Restricciones del Problema

- **Disponibilidad por Mantenimiento**

$$\sum_{(i,j)\in T} a_{(i,j),k} * X_{(i,j),k} \leq 720 * A_k \left[\frac{hr}{mes}\right]; \quad k \in A \qquad (\mathbf{3.3})$$

La restricción vinculada al mantenimiento refleja que las horas de vuelo que el modelo asigne a un avión k no debe ser mayor que la disponibilidad del mismo en un mes. El parámetro de entrada $\boldsymbol{A_k}$ corresponde a la Disponibilidad Real por Mantenimiento, tasa de tipo mensual calculada por la empresa.

- **Prioridad y Asignación de las Horas de Vuelo**

Debido a que el modelo optimiza de acuerdo al orden en que las variables fueron ingresadas, no garantiza una repartición homogénea ni realista de las horas de vuelo asignadas. Es por esto que se generaron una serie de restricciones de prioridad para entregar a cada avión, tripulación y piloto una cantidad de HV proporcional de acuerdo al historial y que puede ajustarse de acuerdo a los intereses de la empresa, ya que el recurso de estas desigualdades corresponde a parámetros de entrada que pueden ser modificados.

- **Utilización de Flota**

$$\frac{\sum_{(i,j)\in T} a_{(i,j),k} * X_{(i,j),k}}{\sum_{k'\in A}\sum_{(i,j)\in T} a_{(i,j),k} * X_{(i,j),k}} \geq \boldsymbol{R_{MIN\,(k)}}; \quad k \in A \qquad (\mathbf{3.4})$$

$$\frac{\sum_{(i,j)\in T} a_{(i,j),k} * X_{(i,j),k}}{\sum_{k'\in A}\sum_{(i,j)\in T} a_{(i,j),k} * X_{(i,j),k}} \leq \boldsymbol{R_{MAX\,(k)}}; \quad k \in A \qquad (\mathbf{3.5})$$

Donde $\boldsymbol{R_{MIN\,(k)}}$ y $\boldsymbol{R_{MAX\,(k)}}$ corresponden al rango asignado para que el modelo asigne una cantidad de horas de vuelo al avión $\boldsymbol{k}$ con respecto al total.

- **Repartición Homogénea en Pilotos**

Distribuye las horas de vuelo entre todos los pilotos disponibles para una aeronave determinada. Evita que un piloto haga demasiados vuelos (poco real) y obliga a que todos operen.

$$\sum_{j=1}^{l-1} a_{(l,j),k} * X_{(l,j),k} + \sum_{i=l+1}^{12} a_{(i,l),k} * X_{(i,l),k} \geq tv_k \,; \forall l = \{1, \dots, 12\}; k \in A. \qquad (\mathbf{3.6})$$

El parámetro de entrada $\boldsymbol{tv_k}$ corresponde a un Tiempo de Vuelo promedio de cada avión $\boldsymbol{k}$, obtenido a partir de datos históricos y que se utilizan preferentemente en las restricciones asociadas a la normativa aeronáutica.

- **Normativa Aeronáutica**

En este ámbito hay tres obligaciones que la empresa debe cumplir por cada piloto, de acuerdo a la cantidad de horas voladas y el tiempo de descanso que les corresponde:

- **Tiempo de Vuelo Máximo Mensual por Piloto**

$$\sum_{k \in A} \left[\sum_{j=1}^{l-1} a_{(l,j),k} * X_{(l,j),k} + \sum_{i=l+1}^{12} a_{(i,l),k} * X_{(i,l),k} \right] \leq hv_l \,; \quad \forall l = \{1, \dots, 12\} \qquad (\mathbf{3.7})$$

En esta primera inecuación, las HV máximas permitidas por normativa son 100 al mes, pero esta cantidad es alta incluso en situación real, por lo que en consenso con la empresa se tomó el criterio del total anual (1000 $horas/año$) dividido por doce meses, resultando 83,33 $[HV/mes]$. El parámetro de entrada $\boldsymbol{hv_l}$ es el que regula este valor.

- **Periodo de Servicio de Vuelo Máximo Mensual por Piloto**

El Período de Servicio de Vuelo (que es el tiempo desde que el piloto llega a preparar el vuelo, lo ejecuta y finalmente lo cierra) no debe exceder las 160 horas mensuales y depende de las características del vuelo. La inecuación es la siguiente:

$$\sum_{k \in A} PSV_{l,k} \leq 160 \left[\frac{h}{mes}\right]; \qquad \forall l = \{1, \dots, 12\} \qquad (\mathbf{3.8})$$

La variable de decisión $PSV_{l,k}$ corresponde al Período de Servicio de Vuelo del piloto i en el avión k, y fue generado a partir de un psv_k (parámetro obtenido de información histórica) multiplicado por el número de vuelos realizado por el piloto l en tal avión k, como muestra la ecuación:

$$PSV_{l,k} = NV_{l,k} * psv_k ; \qquad \forall l = \{1, \dots, 12\};\ k \in A \qquad (\mathbf{3.9})$$

Finalmente, la variable de decisión $\boldsymbol{NV_{(l,k)}}$ correspondiente al número de vuelos realizado por el piloto i en el avión k, se obtiene de dividir las horas de vuelo que el modelo asigna a dicho piloto por el tiempo de vuelo promedio de la aeronave k ($\boldsymbol{tv_k}$).

$$NV_{l,k} = \frac{\left[\sum_{j=1}^{l-1} a_{(l,j),k} * X_{(l,j),k} + \sum_{i=l+1}^{12} a_{(i,l),k} * X_{(i,l),k}\right]}{tv_k}; \ \forall l = \{1, \dots, 12\};\ k \in A \qquad (\mathbf{3.10})$$

- **Período de Descanso**

El Período de descanso está determinado por el PSV de cada piloto, y se encuentra tabulado de acuerdo a la normativa vigente. Según el tiempo de vuelo promedio de cada avión k ($\boldsymbol{tv_k}$) se ha obtenido un $\boldsymbol{pd_k}$ que al multiplicarse con el número de vuelos realizado por cada piloto l en esa aeronave, se puede obtener el período de descanso mensual de l en tal avión, el cual es una variable de decisión y se muestra en la siguiente ecuación:

$$PD_{l,k} = NV_{l,k} * pd_k ; \qquad \forall l = \{1, \dots, 12\};\ k \in A \qquad (\mathbf{3.11})$$

Con lo anterior, la suma de los $\boldsymbol{PSV_{l,k}}$ más el Período de Descanso de cada piloto no debe superar las 480 horas, lo que es $24[hr/día]\ x\ 20\ [día]$, bajo el criterio de trabajo 5 x 2.

$$\sum_{k\in A} PSV_{l,k} + PD_{l,k} \leq 480\ \left[\frac{h}{mes}\right]; \qquad \forall l = \{1,\dots,12\} \qquad (\mathbf{3.12})$$

- **Vuelos Itinerantes**

Se consideran vuelos itinerantes los realizados por la empresa a Vallenar y a la minera Los Pelambres. La distribución de los vuelos, tripulaciones y horas de vuelo realizada por el modelo está basada en un calendario mensual tipo que programa las salidas. De acuerdo a este calendario:

- Los días lunes se realizan cinco vuelos itinerantes, concentrando a 10 de los 12 pilotos.
- Los vuelos a Vallenar se realizan lunes, miércoles y viernes. El D328 de matrícula ACG vuela los tres días y el AEY solo dos.
- Los vuelos a Pelambres ocurren los lunes y jueves, volando los tres aviones D228 (AAQ, CWC y CWX) los días mencionados.

1) Pelambres

a) Según el mencionado calendario, los tres D228 realizan 9 viajes ida-vuelta mensual a Pelambres, de 2,5 horas totales cada uno, volando entonces 22,5 $[h/mes]$.

b) Los pilotos habilitados en D228 pueden hacer máximo 9 vuelos de 2,5 horas.

c) Los aviones mencionados sólo realizan vuelos regulares a Pelambres, no chárter.

Por lo tanto, de a) y c) se obtienen las siguientes restricciones:

$$\sum_{(i,j)\,\in\,T} a_{(i,j),k} * X_{(i,j),k} = 22{,}5 \left[\frac{h}{mes}\right]; \quad k \in AP \qquad (\mathbf{3.13})$$

La ecuación (3.13) muestra la condición que deben cumplir los tres aviones mencionados, es decir, están obligados a realizar los 9 vuelos y con esto, a volar 22,5 horas mensuales a Pelambres.

Del punto b) se consigue la restricción que se muestra a continuación:

$$\sum_{k\,\in\,AP}\left[\sum_{j=1}^{l-1} a_{(l,j),k} * X_{(l,j),k} + \sum_{i=l+1}^{12} a_{(i,l),k} * X_{(i,l),k}\right] \leq 22{,}5 \left[\frac{h}{mes}\right]; \qquad \forall l = \{1,\ldots,12\} \quad (\mathbf{3.14})$$

La ecuación (3.14) muestra que la suma de las horas de vuelo de los pilotos habilitados para volar los tres aviones D228 deben volar al menos 22,5 horas al mes, es decir, realizar no más de 9 vuelos mensuales, ya que además estos pilotos están habilitados para volar hacia Vallenar, lo que implica que también deben cumplir con otras restricciones asociadas a este segundo destino.

2) Vallenar

a) El D328 de matrícula ACG realiza 13 viajes ida-vuelta al mes, de 2,2 horas totales cada uno, volando entonces 28,6 $[h/mes]$.

b) El D328 de matrícula AEY hace 9 viajes ida-vuelta al mes, de 2,2 horas totales cada uno, volando entonces 19,8 $[h/mes]$.

c) Los pilotos habilitados para los D328 lo están también para los D228 (Pelambres), pero no viceversa, por lo que, de acuerdo al calendario tipo, algunos pilotos podrían alcanzar los 17 vuelos al mes, uniendo ambos destinos.

d) Los pilotos habilitados en D328 pueden hacer entonces un máximo de 40,1 $[h/mes]$ considerando sus vuelos a Vallenar y Pelambres. Además, deben cumplir con los requisitos de no volar más de 28, 6 $[h/mes]$ si se trata del avión ACG y 19,8 $[h/mes]$ en el caso de AEY.

e) Los aviones mencionados sólo realizan vuelos regulares a Pelambres, no chárter.

Por lo tanto, de a), b) y e) se obtienen:

$$\sum_{(i,j)\in T} a_{(i,j),k} * X_{(i,j),k} = 28{,}6 \left[\frac{h}{mes}\right]; \qquad k = \{ACG\} \tag{3.15}$$

$$\sum_{(i,j)\in T} a_{(i,j),k} * X_{(i,j),k} = 19{,}8 \left[\frac{h}{mes}\right]; \qquad k = \{AEY\} \tag{3.16}$$

Al igual que en la ecuación (3.13), las igualdades indican la obligación de los aviones de realizar 13 y 9 viajes ida y vuelta respectivamente.

De las condiciones c) y d) se genera las restricciones asociadas a los pilotos:

$$\sum_{j=1}^{l-1} a_{(l,j),k} * X_{(l,j),k} + \sum_{i=l+1}^{12} a_{(i,l),k} * X_{(i,l),k} \leq 28{,}6 \left[\frac{h}{mes}\right];\ k = \{ACG\};\ \forall l = \{1,\dots,12\} \tag{3.17}$$

$$\sum_{j=1}^{l-1} a_{(l,j),k} * X_{(l,j),k} + \sum_{i=l+1}^{12} a_{(i,l),k} * X_{(i,l),k} \leq 19{,}8 \left[\frac{h}{mes}\right];\ k = \{AEY\};\ \forall l = \{1,\dots,12\} \tag{3.18}$$

$$\sum_{k\in VI} \left[\sum_{j=1}^{l-1} a_{(l,j),k} * X_{(l,j),k} + \sum_{i=l+1}^{12} a_{(i,l),k} * X_{(i,l),k}\right] \leq 40{,}1 \left[\frac{h}{mes}\right]; \qquad \forall l = \{1,\dots,12\} \tag{3.19}$$

En la ecuación (3.17) y (3.18) muestra que el total de HV asignadas a un piloto $\boldsymbol{l}$ no debe superar el máximo de viajes que realiza cada una de las aeronaves. Se considera las horas de vuelo por piloto y no por tripulación porque las habilitaciones de cada piloto determinan la capacidad de volar, y algunos de ellos están habilitados tanto para los D228 como los D328, por lo que el análisis es más exacto individualizándolos.

La ecuación (3.19) indica que la suma de las horas de vuelo de los pilotos habilitados para las aeronaves que vuelan tanto a Vallenar como Pelambres debe ser como

máximo 40,1 $[h/mes]$, de acuerdo al análisis hecho con el mencionado calendario de vuelos.

3) Ajuste en Período de Servicio de Vuelo en pilotos de Vuelos Regulares

En este caso, con el fin de que no se incumplan los tiempos destinados por normativa al descanso, es que se le asignan un PSV de 8 $[h/vuelo]$, que corresponde a las 8 horas de jornada laboral diaria. Dado que los pilotos generalmente hacen el vuelo de ida por la mañana y regresan por la tarde, cumplen la jornada en el destino, si bien cumplen tiempos de vuelo inferiores a 3 horas. Es una particularidad de la operación al norte.

Con esto, se define una última restricción, que consiste en que cada piloto no debe superar las 128 $[h/mes]$ de PSV por concepto de vuelos regulares. Este número se define por los 4 vuelos por semana que pueden llegar a realizar, 8 horas de PSV por vuelo, en 4 semanas del mes. Así, la restricción obtenida es similar a la ecuación (3.9), y queda:

$$\sum_{k \in VI} PSV_{l,k} \leq 128 \left[\frac{h}{mes}\right]; \qquad \forall l = \{1, \dots, 12\} \qquad (\mathbf{3.20})$$

Al igual que la ecuación (3.9), este factor se obtiene de multiplicar el número de vuelos realizado por el piloto l en la aeronave k y se multiplica por el PSV asociado a Pelambres y Vallenar (8 horas). VI corresponde al grupo de aviones que realiza exclusivamente vuelos itinerantes.

- **<u>No Negatividad</u>**

$$X_{(i,j),k} \geq 0; \qquad (i,j) \in T;\ k \in A \qquad (\mathbf{3.21})$$

La restricción número (3.21) representa el componente de hora de vuelo de una tripulación $(i,j) \in T$ dada una aeronave k, el cual debe ser mayor o igual a cero.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS E IMPLEMENTACIÓN

4.1. Modelo Computacional Diseñado

Como mecanismo de resolución del modelo desarrollado, se ha optado por utilizar la plataforma Microsoft Excel para modelar el problema, y junto con esto la herramienta Premium Solver Platform para procesar y encontrar una solución óptima.

La decisión de utilizar Microsoft Excel por sobre un lenguaje de programación matemática se basa en lo extendido que se encuentra el uso del primero, tanto a nivel educacional como empresarial, por lo que no requiere de mayor adiestramiento el comprender y utilizar las herramientas que este software ofrece. Si bien, en primera instancia puede parecer más fácil el modelado del problema a través de un lenguaje matemático especialmente creado para estos fines, esto requiere de igual forma un periodo de capacitación. Además, la resolución del modelo la lleva a cabo un complemento que se ejecuta en el mismo Excel, lo que evita el tener que utilizar dos utilidades separadas para modelar y resolver el problema.

La utilización de Premium Solver Platform se da debido a que el problema es demasiado grande para ser resuelto por el Solver incorporado en Excel, además de ser una de las herramientas más conocidas y utilizadas, principalmente a nivel educacional. Se utiliza la versión de prueba de 15 días más el motor de resolución Gurobi, ya que se contempla que la utilización que se le dé a este modelo por parte de la empresa no sea de carácter diario, sino que es una ayuda a la gestión de flota y capacidad de la misma, por lo que no es necesaria la adquisición de una licencia comercial.

Como referencia, Premium Solver Platform es una herramienta desarrollada por Frontline Systems que puede manejar hasta 8000 variables de decisión en su versión tradicional con cinco motores de resolución, y cuya capacidad puede ampliarse con ocho solvers adicionales (Gurobi, KNITRO, Mosek, entre otros). Puede resolver tanto problemas de programación determinística como estocástica, complementando este software con otros paquetes ofrecidos por la empresa (Risk Solver Platform). Su licencia va desde los US$995 – 1995 dependiendo de las distintas utilidades que se agreguen, existiendo precios para el área académica y período de prueba gratuito de 15 días.

El modelo computacional se estructura de tres secciones: un Panel de Control, el Motor del Modelo y una Hoja de Resultados. El primero se utiliza para el ingreso de los parámetros requeridos para hacer funcionar el modelo, los que se obtienen de la información histórica de la empresa. El segundo es, como su nombre lo indica, el motor, y se compone de una serie de matrices que identifica a cada aeronave, genera las tripulaciones disponibles y es donde se han modelado las restricciones que fueron creadas previamente de manera teórica. La hoja de resultados es donde se sintetizan los datos generados a partir de la solución óptima entregadas por el solver, a través de tablas y gráficos informativos.

4.2. Análisis de Resultados Obtenidos por Modelo

La situación de la empresa Aerocardal que se analiza con el modelo, se compone de 12 pilotos contratados, cuyas habilitaciones determinan la capacidad de éstos de volar las distintas aeronaves (Ver Anexo 1 para las habilitaciones). La flota considerada aquí consta de 11 elementos de un total de 16 aeronaves, dejando fuera del análisis a los helicópteros y al Cirrus SR-22, ya que, en el caso de los primeros, el aporte al total de operaciones es mínimo y su análisis no formaba parte del interés de la gerencia; y el segundo mencionado no se explota de manera comercial, sino que forma parte de otra área de negocio que se dedica a comercializarlos.

Como se ha comentado previamente sobre las restricciones del problema, el modelo toma en cuenta los vuelos itinerantes que la empresa realiza a la minera Los Pelambres y a la ciudad de Vallenar, en el norte de Chile, por lo que el análisis considera tanto los vuelos no regulares, principal modelo de negocios de Aerocardal, como los regulares y sujetos a itinerarios fijos, mercado al que se han incorporado recientemente y que busca disminuir la variabilidad en los requerimientos de vuelo que la empresa recibe y la programación de los mismos, permitiendo una mejor gestión de éstos. En la figura 5 se puede observar el calendario tipo de salidas a los destinos mencionados, el que debiera cumplirse a menos que eventualidades técnicas o de falta de demanda para alguno de los vuelos obligue a no efectuar alguno de ellos, recalcando el hecho de la complejidad que

significa en lo operacional los días lunes, en el que 5 de las aeronaves operan, obligando a que la generación de tripulaciones requiera de 10 pilotos, limitando casi en su totalidad cualquier otro contrato de vuelo que pudiera aparecer para ese día.

4.2.1. Parámetros ingresados.

La primera información ingresada al modelo es la referente a la cartera de 12 pilotos y sus habilitaciones para volar cada una de las aeronaves, como se comentó anteriormente. Posteriormente, se ingresa el rango de utilización que la empresa espera por cada avión, es decir, el modelo debe asignar una cantidad de horas de vuelo a cada aeronave de acuerdo a la prioridad que tenga ésta en la operación total. Los datos se muestran a continuación.

***Tabla 3**: Rango de Utilización por Aeronave*
(Fuente: Elaboración Propia)

Aeronave	Modelo	Mínimo [%]	Máximo [%]	Período [%]
CC-CWK	G-150	25,00	30,00	24,98
CC-CWZ	S-550	10,00	20,00	18,51
CC-CWW	S-550	10,00	20,00	10,07
CC-CWC	D-228	5,00	10,00	9,94
CC-ACG	D-328	5,00	10,00	8,43
CC-CWD	Cheyenne I	4,00	10,00	7,78
CC-AAQ	D-228	5,00	10,00	7,47
CC-CWX	D-228	5,00	10,00	5,92
CC-AEY	D-328	5,00	10,00	5,84
CC-CWE	Cessna 421	0,70	1,50	0,91
CC-CWB	Navajo	0,10	1,00	0,14
TOTAL				100,00

La última columna muestra la participación que cada aeronave tuvo en el total de vuelos del período analizado, por lo que los rangos se determinaron basándose en estos datos y en la intención por parte de la empresa de volar más o no en un material, como puede observarse en el caso del Gulfstream G150 (CWK). Se intentó además otorgarles un rango con cierta amplitud con el fin de que el modelo pueda encontrar la mejor solución posible y no corra el riesgo de que el problema no sea factible por tener rangos muy acotados.

El siguiente parámetro de importancia a ingresar es la Disponibilidad por Mantenimiento (A_k), el cual es un porcentaje que se obtiene a partir de los vuelos realizados por un avión dado y los que no fue posible efectuar debido a mantenimientos correctivos. Es un parámetro que se mide de manera mensual, sin embargo, los valores usados para hacer correr el modelo son los siguientes.

Tabla 4: *Disponibilidad Mensual por Mantenimiento*

(Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Aerocardal)

Aeronave	Modelo	Disponibilidad Mensual
CC-CWK	G150	90,70%
CC-CWZ	S-550	84,30%
CC-CWW	S-550	77,60%
CC-CWC	D-228	73,20%
CC-ACG	D-328	63,00%
CC-CWD	Cheyenne I	61,70%
CC-AAQ	D-228	67,60%
CC-CWX	D-228	87,60%
CC-AEY	D-328	73,10%
CC-CWE	Cessna 421	39,30%
CC-CWB	Navajo	9,10%

Los datos utilizados fueron los del último mes al momento de realización de este proyecto, y si bien éstos van cambiando, pueden modificarse fácilmente desde el panel de control de la herramienta computacional diseñada. Como se observa, el Gulfstream G150 y los Cessna Citation II S-550 son los que presentan una mayor disponibilidad, siendo los más utilizados además por la empresa. Por el contrario, el Piper PA-31 Navajo es el menos disponible, coincidente con ser el menos usado.

La siguiente información requerida para hacer funcionar el modelo corresponde a los parámetros asociados a los Tiempos de Vuelo (TV), Períodos de Servicio de Vuelo (PSV) y de Descanso (PD). Los datos extraídos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5: *Parámetros de Operación para Tripulaciones*

(Fuente: Elaboración Propia a partir de Información de Vuelos de Aerocardal)

Aeronave	Modelo	TV promedio [h]	PS por Vuelo [h]	PSV promedio [h]	PD [h]
CC-CWK	G150	4,4	3,13	7,53	12
CC-CWZ	S-550	3,3	3,19	6,49	10
CC-CWW	S-550	3,2	3,22	6,42	10
CC-CWC	D-228	2,5	5,50	8,00	12
CC-ACG	D-328	2,2	5,80	8,00	12
CC-CWD	Cheyenne I	2,7	2,29	4,99	10
CC-AAQ	D-228	2,5	5,50	8,00	12
CC-CWX	D-228	2,5	5,50	8,00	12
CC-AEY	D-328	2,2	5,80	8,00	12
CC-CWE	Cessna 421	5,6	4,40	10,00	14
CC-CWB	Navajo	3,7	16,30	20,00	24

De la tabla 5, la columna “TV Promedio” sintetiza en una cifra las horas de vuelo de una operación de cada aeronave, calculado a partir de todos los vuelos hechos durante un año. La columna “PS por Vuelo” simboliza el tiempo que toma a la tripulación el preparar, permanecer y cualquier otro hecho que ocurra hasta el cierre de dicho vuelo. El Período de Servicio de Vuelo es, entonces, la suma de los dos valores mencionados anteriormente, y se muestra en la columna “PSV Promedio”, calculado de manera análoga a los anteriores. Finalmente, el Período de Descanso se obtiene a partir del PSV Promedio, el cual está tabulado según lo que dice la normativa aeronáutica.

4.2.2. Resultados entregados por Modelo

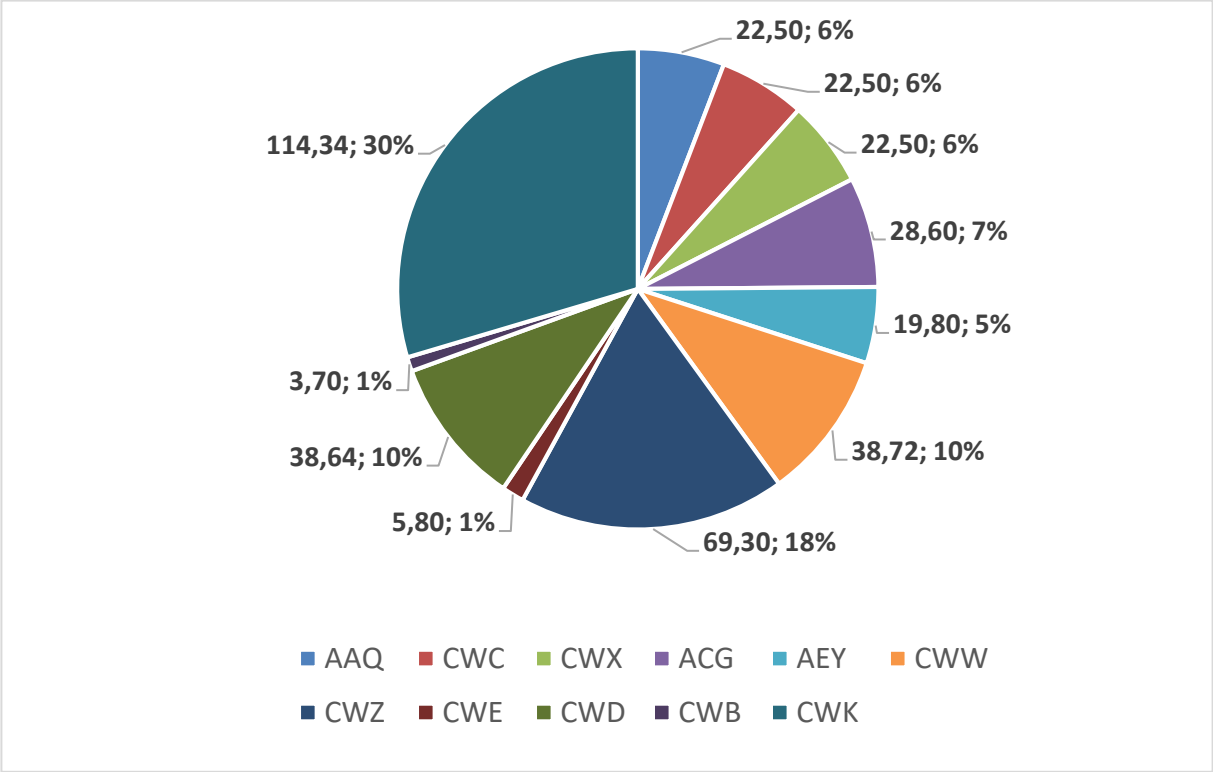
Con los parámetros mencionados en la sección anterior, se hizo correr la herramienta computacional que contiene el modelo matemático diseñado para el problema de la capacidad efectiva de la empresa Aerocardal, utilizando el complemento Premium Solver Platform más el motor de resolución Gurobi Solver Engine, en un tiempo de 1 minuto con 12 segundos para encontrar una solución que satisface las restricciones y condiciones de optimalidad.

La capacidad efectiva mensual de la empresa es de 386,40 horas de vuelo, distribuidas en 11 aeronaves de acuerdo a la importancia de cada una para las operaciones de la empresa, y explotadas por una cartera de 12 pilotos de acuerdo a las habilitaciones que poseen, cuya carga de trabajo es repartida por el modelo de la manera más uniforme posible, según los requerimientos del área de Operaciones. Este resultado significa que, para un mes tipo de 30 días, Aerocardal es capaz de mantener en vuelo a su flota de aviones por 386,40 horas, cumpliendo con las responsabilidades de realizar los vuelos itinerantes regulares al norte de Chile, respetando los turnos y tiempos de descanso que las tripulaciones deben tener por volar esta cantidad de horas, respondiendo a la disponibilidad de cada material en el mes y evitando sobrecargar a parte de la cartera de pilotos por sobre otra.

Dicho de otra forma, lo que el resultado indica es que, dadas las restricciones ya mencionadas, la empresa podría aceptar y administrar contratos de vuelo por un máximo de 386,40 horas por mes de manera global, con lo que se hace necesario conocer la manera en que esta capacidad se distribuye a través de su flota y pilotos para poder llevar el análisis a un nivel más detallado.

La distribución de la capacidad efectiva de la empresa en su flota de aeronaves se muestra en el siguiente gráfico:

Figura 6: *Distribución de las Horas de Vuelo en la Flota*
(Fuente: Elaboración Propia)



De la figura 6 se extrae que a las aeronaves Dornier D-228 (AAQ, CWC, CWX) se les asignó 22,5 [h/mes], correspondientes al 6% del total. Esta cantidad es la necesaria que la empresa requiere para cumplir con los 27 vuelos mensuales a Los Pelambres, es decir, 67,5 [h/mes]. Ya que de momento estas naves no tienen contempladas otro tipo de vuelo regular, se optó por parametrizar el modelo para generar mayor capacidad de acuerdo al principal modelo de negocio de la empresa, que son los vuelos no regulares. Los aviones Dornier D-328 de matrícula CC-ACG y AEY reciben 28,6 [h/mes] y 19,8 [h/mes], los que corresponden 13 y 9 vuelos mensuales respectivamente a Vallenar, o sea, 48,4 horas necesarias para operar regularmente a este destino. La diferencia en la capacidad asignada a cada una responde a decisión de la empresa, ya que por el material AEY deben pagar arriendo por las horas que éste opera. Al igual que para los D-228, no existen planes, al momento de realización de este proyecto, para que estos dos aviones realizan más vuelos itinerantes, por lo que de momento las horas de vuelo asignadas

responden a las obligaciones actuales y el modelo se concentra en generar capacidad en las aeronaves que respondan a contratos de vuelos ejecutivos y ambulancia.

Así es como el Gulfstream G150 es el que tiene una mayor cantidad de horas de vuelo para explotar, con 114,34 [h/mes], siendo casi el 30% del total de la flota. En este material se realiza generalmente los vuelos ejecutivos, siendo ésta la principal línea de negocios de la empresa. Los aviones Cessna Citation II S-550 de matrículas CC-CWZ y CWW son los que siguen, con una capacidad de volar de 69,30 [h/mes] y 38,72 [h/mes] (18% y 10% del total, respectivamente), lo que se condice en proporción con lo volado por ellos durante el período analizado (tabla 3). Su mayor participación se debe al uso para vuelos ejecutivos y ambulancia, siendo unos elementos de gran importancia para la compañía.

En el último grupo de aviones más pequeñas, el Piper PA-31T Cheyenne I (CWD) es el que se le ha asignado una mayor cantidad de horas de vuelo, de acuerdo a la información histórica analizada. Tiene una capacidad de 38,64 [h/mes] que equivale al 10% de la flota, los que es capaz de transportar a 6 pasajeros normalmente en vuelos chárter o particulares, además de transporte aeromédico. Finalmente, las aeronaves Cessna 421 y Piper PA-31 Navajo Panther (CC-CWE y CWB) son a los que se les asigna menor capacidad, con 5,80 [h/mes] y 3,70 [h/mes] respectivamente. Estos hacen las mismas labores que CWD, pero suelen ocuparse menos ya que solo tienen dos pilotos habilitados, es decir, una tripulación disponible, la cual además se encarga de realizar vuelos en otras aeronaves de mayor importancia operacional y estratégica de la empresa.

A su vez, el modelo designó las tripulaciones para los vuelos que podrían realizarse dada la capacidad asignada. Por ejemplo, para el caso del D-228 de matrícula AAQ (Anexo 2, tabla 19) puede observarse que se le ha asignado 8 tripulaciones distintas, en la que la conformada por los pilotos 7 y 8 puede volar hasta 5 [h/mes], lo que corresponde a 2 vuelos en el mes, de acuerdo al tiempo de vuelo (TV) asignado a esta aeronave. En el caso del Cessna 421 (CWE) (Anexo 2, tabla 26), solo existe una tripulación disponible al haber solo dos pilotos habilitados, por lo que se les entrega una cuota mensual de 5,8 [h/mes].

En lo que respecta a los parámetros asociados a cada piloto, se menciona el Tiempo de Vuelo (TV) que el modelo asigna a cada uno al formar tripulaciones para realizar los vuelos recientemente descritos; el Período de Servicio de Vuelo (PSV), que es todo el tiempo desde que la tripulación prepara un vuelo, lo ejecuta y finalmente lo cierra; y el Período de Descanso, el cual se encuentra normado (tabla 2) y depende del PSV de un vuelo determinado. Sobre la cantidad de horas de vuelo que el Modelo asignó a los pilotos que componen las tripulaciones ya mencionadas, éstas se muestran en la siguiente tabla:

***Tabla 6**: Tiempos de Vuelo Asignados a Pilotos*

(Fuente: Elaboración Propia)

Descripción	TV [h/mes]	Respecto a Máx. [%]
Piloto 1	78,23	94%
Piloto2	83,33	100%
Piloto 3	41,67	50%
Piloto 4	83,33	100%
Piloto 5	69,20	83%
Piloto 6	23,74	28%
Piloto 7	78,63	94%
Piloto 8	76,72	92%
Piloto 9	75,87	91%
Piloto 10	83,33	100%
Piloto 11	38,64	46%
Piloto 12	40,10	48%

Vale la pena recordar que, como se explica en la tabla 1, el tiempo de vuelo máximo según la normativa aeronáutica es de 100 [h/mes]. Sin embargo, como se menciona en la sección 3.2.5, en la práctica este número sigue siendo muy alto y los pilotos no suelen alcanzar esos tiempos, por lo que el criterio que se consideró, en consenso con Aerocardal, fue el de utilizar 83,33 [h/mes], es decir, dividir el máximo anual (1000 [h/mes]) en doce meses. Observando la tabla 6, los pilotos número 2,4 y 10 son los que han llegado al máximo de horas de vuelo permitidos a nivel mensual, siendo limitados por esta restricción. Efectivamente, al comprobar el reporte de sensibilidad entregado por Solver, los precios sombra asociados a estas variables resultaron ser mayores qua cero, indicando que, si se modificara el lado derecho de tales restricciones, es decir el valor

83,33 [h/mes], se vería afectado el valor óptimo del problema entregado por el modelo. Los pilotos 3 y 6 se encuentran limitados en su máximo de HV debido a que cumplen labores gerenciales dentro de la compañía, por lo que los valores mostrados en la tabla también alcanzan el tope designado, el cual corresponde al 50% de las 83,33 [h/mes] para P3 y el 28% para P6. En resumen, si bien todos los pilotos alcanzan altas cantidades de tiempos de vuelo de acuerdo al modelo, quienes limitan la solución óptima son P2, P3, P4, P6 y P10. De ellos, solamente el número 6 no está habilitado para volar los Dornier D-228 y D-328, aviones que realizan los vuelos itinerantes a Vallenar y que limitan operacionalmente la capacidad de la empresa de realizar vuelos no regulares, principalmente los días lunes de cada mes.

El siguiente factor a analizar es el Período de Servicio de Vuelo, el cual tiene como restricción por normativa aeronáutica, el no sobrepasar las 160 horas mensuales. Cabe recordar que debido a lo difícil que es el establecer parámetros en vuelos no regulares (a diferencia de las líneas aéreas que realizan vuelos itinerantes y constantes), se fijó un PSV de referencia por cada aeronave, y de acuerdo a las horas y número de vuelos que el modelo asigne a cada material, es que cada piloto va acumulando PSV según la cantidad de vuelos que le toque realizar. La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos con respecto a este tema.

Tabla 7: *Periodos de Servicio de Vuelo Mensual asignado a Pilotos*

(Fuente: Elaboración Propia)

Descripción	PSV [h/mes]	Respecto a Máx. [%]
Piloto 1	160,00	100%
Piloto2	160,00	100%
Piloto 3	98,54	62%
Piloto 4	160,00	100%
Piloto 5	160,00	100%
Piloto 6	43,90	27%
Piloto 7	160,00	100%
Piloto 8	160,00	100%
Piloto 9	160,00	100%
Piloto 10	160,00	100%
Piloto 11	71,45	45%
Piloto 12	102,19	64%

A simple vista puede comprobarse desde la tabla 7 que el Período de Servicio de Vuelo es un factor relevante al momento de limitar la solución óptima encontrada. Un total de 8 de los 12 pilotos se ven acotados por sus PSV, los cuales dependen directamente de la aeronave y de su operación en particular. Por ejemplo, estos 8 pilotos están habilitados y realizan vuelos itinerantes tanto a Pelambres, Vallenar o ambos y, como se explica en la sección 3.1.1, la operación a estos destinos tiene la particularidad de que las tripulaciones deben permanecer allá hasta el vuelo de regreso a Santiago, completando la jornada de trabajo (que equivale al PSV) de 8 horas para luego tener derecho a descanso por 12 horas, siendo que el tiempo de vuelo en si va desde las 2,2 a 2,5 horas, ida y vuelta. Eso explica el hecho que varios de los pilotos no alcanzan el tope de tiempo de vuelo, si bien tienen asignadas bastantes horas de vuelo, pero debido a la naturaleza de las operaciones que realizan, su Periodo de Servicio de Vuelo es el que alcanza el límite permitido. Como comprobación, el reporte se sensibilidad de Solver reporta precios sombras mayores a cero para las restricciones asociadas a estos pilotos, por lo que un aumento o disminución del máximo permitido, modificaría el valor de la función objetivo encontrado.

Con respecto a los otros cuatro pilotos que no alcanzaron los máximos de PSV, P3 y P6 están acotados en sus tiempos de operación al cumplir tareas administrativas dentro de la empresa; el piloto 11 es más bien un piloto de helicópteros y su única habilitación para aviones es el Piper PA-31T Cheyenne I (CWD), por lo que tanto su Tiempo de Vuelo como Periodo de Servicio de Vuelo no es tan alto, si bien, como puede compararse de la figura 6 y de la tabla 6, su tiempo de vuelo es el mismo que el de la aeronave, por lo que es vital para la operación de este material, formando tripulación con todos los demás pilotos habilitados. Finalmente, el valor asignado al piloto 12 se explica porque está habilitado solo en los D-228 y D-328, por lo que su labor se limita a realizar vuelos itinerantes. Aunque al observar la tabla 6 que muestra los tiempos de vuelo, su rendimiento es máximo en cuanto a que tiene asignadas 40,1 [h/mes], es decir, es la mayor cantidad que un piloto habilitado para estas aeronaves puede realizar para volar a los dos destinos mencionados.

Finalmente, falta por mostrar cómo influyen los Períodos de Descanso asignados por el modelo a las tripulaciones, de acuerdo al PSV que éstos hayan alcanzado al realizar sus vuelos. La tabla a continuación sintetiza esta información.

***Tabla 8**: Períodos de Descanso asociados a Pilotos*

(Fuente: Elaboración Propia)

Descripción	PD [h/mes]	PSV+PD [h/mes]	Respecto a Máx. [%]
Piloto 1	256,31	416,31	87%
Piloto2	273,81	433,81	90%
Piloto 3	173,76	272,29	57%
Piloto 4	268,31	428,31	89%
Piloto 5	262,22	422,22	88%
Piloto 6	87,93	131,82	27%
Piloto 7	272,95	432,95	90%
Piloto 8	268,20	428,20	89%
Piloto 9	271,85	431,85	90%
Piloto 10	270,89	430,89	90%
Piloto 11	143,11	214,56	45%
Piloto 12	187,56	289,75	60%

La columna PD muestra las horas mensuales de descanso que a cada piloto le correspondería de acuerdo al Periodo de Servicio de Vuelo acumulado. Se recuerda que estos números no se obtienen a partir del total de PSV mostrados en la tabla 7, sino que se va sumando a partir de cada vuelo que el modelo determinó, ya que los tiempos de operación de cada avión son distintos. El período de descanso por sí solo no está asociado a restricción alguna. La siguiente columna muestra la suma del tiempo de Descanso y de Servicio de Vuelo, el cual se definió que no debe sobrepasar las 480 [h/mes]. El criterio es que esta sumatoria no debería ser mayor al producto de 24 [h/día] por 5[días/semana] por 4 [semana/mes], que es el tiempo total en el que se podrían efectuar vuelos, dado el criterio 5x2 de días trabajados, acordado previamente con la empresa al momento de diseñar el modelo.

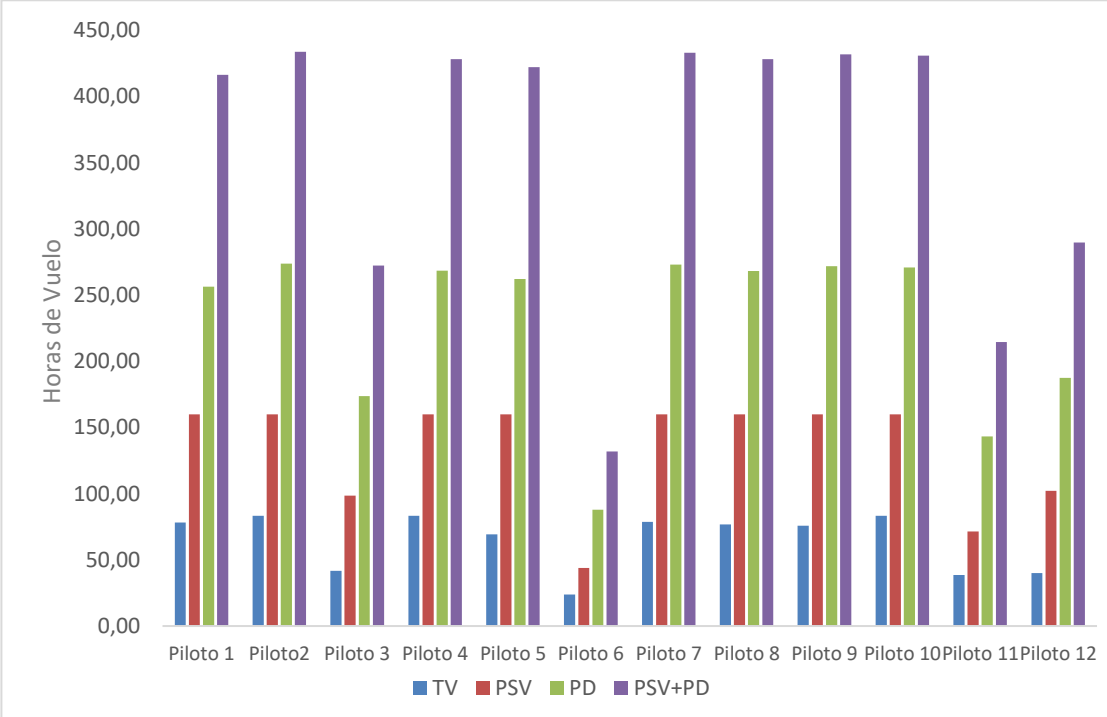
Se observa de la tabla 8 que ningún piloto alcanza el máximo establecido, si bien los pilotos 2, 7, 9, y 10 alcanzan el 90%. Esto significa que del tiempo total en el que los pilotos están disponibles para atender vuelos, los más solicitados están ocupados en un porcentaje cercano al 90%, ya sea realizando las operaciones asignadas o cumpliendo con

su tiempo legal de descanso. Una vez más, este es el caso de los pilotos que les corresponde realizar vuelos itinerantes, pero que además están habilitados para las aeronaves que tienen mayor utilización de la flota, el Gulfstream G150 (CWK) y los Citation II S-550 (CWW y CWZ). El piloto 3 y 6 responden a características especiales, por lo que su ocupación alcanza el 57% y 27% respectivamente. Mientras que los pilotos 11 y 12, su menor utilización se debe principalmente a sus habilitaciones con respecto a la flota, ya que como se mencionó para el caso de los PSV, P11 vuela solo uno de las aeronaves estudiadas, mientras que el otro solo realiza vuelos itinerantes.

Cerrando el primer análisis sobre los resultados obtenidos por el modelo, dada la situación de Aerocardal al momento de realización de este proyecto, la siguiente figura sintetiza los parámetros recién examinados, en el que se puede apreciar algunas características particulares de las operaciones de vuelo comentadas en este informe.

Figura 7: *Síntesis de Parámetros Relativos a Pilotos*

(Fuente: Elaboración Propia)



Como se ha mencionado anteriormente, cada vuelo tiene características de operación distintas, por ejemplo, la aeronave que se utiliza, su autonomía, el tipo de vuelo (ejecutivo, ambulancia, itinerante, etc.). Se ha explicado como el Periodo de Servicio de Vuelo es independiente del tiempo de vuelo efectivo, provocando en ciertos casos que pilotos que volaron menos horas que otros, tengan asignados periodos de descanso similares o mayores. Si se observa la figura 7, los pilotos 8,9 y 10 tienen un PSV máximo, igual a 160 [h/mes], sin embargo, es P10 el que más voló de este grupo (83,33 [h/mes]), mientras que el segundo fue P8 (76,72 [h/mes]), y luego P9 (75,87 [h/mes]). De éstos, P9 es quien recibe un tiempo mayor de descanso (271,85 [h/mes]), seguido de P10 (270,89 [h/mes]) y P8 (268,20 [h/mes]). Según esto, el que menos voló de estos tres pilotos es el que tiene el mayor PD, y al que se le asignó más TV, es el segundo en horas de descanso. La justificación de esta particularidad se encuentra en las habilitaciones de los pilotos, donde los pilotos 8 y 9 vuelan los tres Dornier D-228 y los dos Citation S-550, mientras que P10 no vuela los segundos, pero si los dos Dornier D-328 y el Gulfstream G150. La razón por lo que esto ocurre es porque el Piloto 10 realizó menos vuelos que sus compañeros (24), pero de más tiempo en el aire, copando su máximo de 83,33 [h/mes] de tiempo de vuelo, 160 [h/mes] de PSV. P9 en cambio, hizo 25 vuelos, con menos tiempo en el aire, pero con operaciones donde el PSV de éstos es mayor, por lo que alcanzó las 160 [h/mes] sin llegar al tope de TV. Finalmente, el piloto 8 es el que más vuelos hizo (26), pero éstos fueron de menor duración y PSV, por lo que su período de Descanso en total es menor que el de sus compañeros. Caso similar es el de los pilotos 4 y 5 en el que, si bien P4 voló notoriamente más que P5 (83,33 [h/mes] contra 69,20 [h/mes]), ambos alcanzaron el máximo de PSV y tienen un período de descanso bastante similar (268 [h/mes] y 262 [h/mes]) respectivamente.

El valor entregado en esta sección sobre la capacidad efectiva de la flota es, como el nombre lo indica, un máximo de producción que podría alcanzar la empresa, el cual podría ser complicado de alcanzar en la práctica dada la naturaleza de sus operaciones de vuelo. Como ya se ha mencionado, el principal modelo de negocios de Aerocardal son los vuelos no regulares, en la forma de vuelos ejecutivos, de ambulancia y chárter, los que son imposibles de ordenar de acuerdo a un itinerario mensual ya que son contratos que se llevan a cabo de manera aleatoria, inmediata y no son sistemáticos en el tiempo, como sí

lo son los vuelos que Aerocardal realiza a Los Pelambres y Vallenar o como los vuelos ofrecidos por las líneas aéreas. El modelo diseñado no es capaz de predecir ni analizar la variabilidad en este tipo de requerimientos, por lo que el resultado ofrecido sería posible alcanzarlo en un marco de plena demanda y en el que cada contrato de vuelo no se superponga sobre otro, es decir, que sea posible ordenar cada vuelo de tal forma que se pueda además respetar los tiempos de descanso de las tripulaciones.

4.2.3. Comparación entre Resultados de Modelo y Situación Analizada

El modelo más la herramienta computacional creada para la resolución del problema determinó que la capacidad efectiva de la empresa Aerocardal es de 386,40 [h/mes], distribuidas en 11 aeronaves y con una cartera de 12 pilotos. Sin embargo, este número por sí solo no significa mucho si no se compara con la información histórica a partir de la cual se calcularon diversos parámetros utilizados para dar forma al modelo. Para este fin es que se analizó la información de los vuelos efectuados durante el año previo a la elaboración de este proyecto, extrayendo el mes de mayor actividad operacional y el promedio anual de operación.

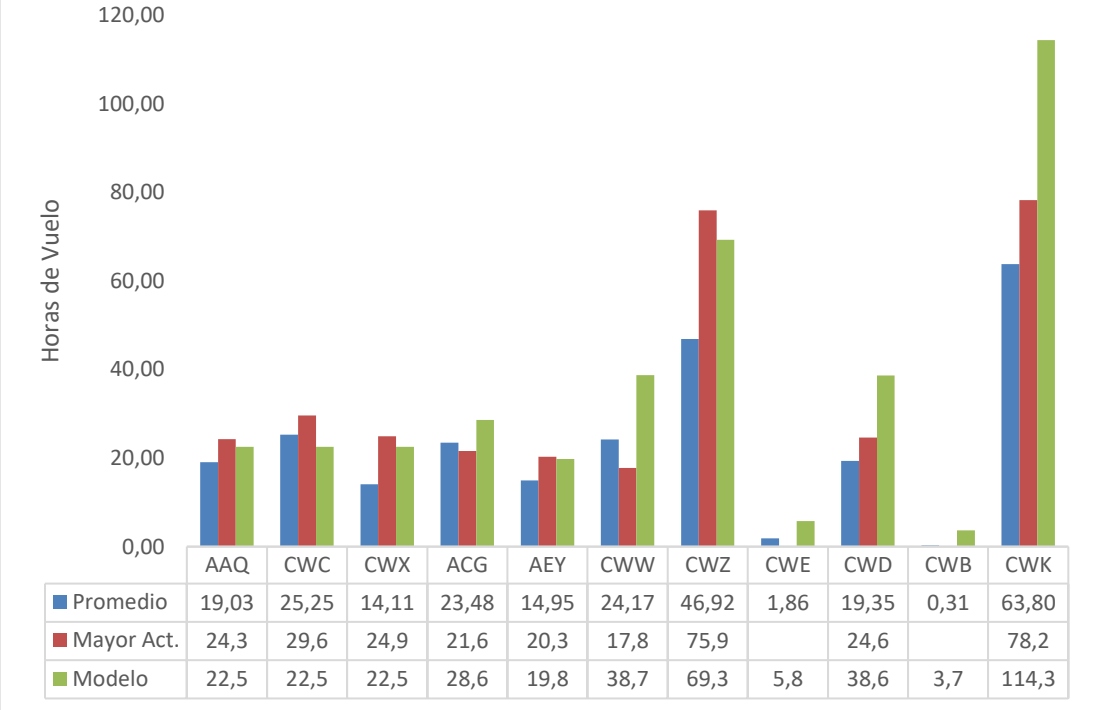
De los datos revisados, se obtuvo que el mes de mayor actividad durante el año analizado fue marzo, con 317,2 [h/mes], en el que volaron 9 de las 11 aeronaves que considera el modelo (CC-CWE y CC-CWB no registraron vuelos este mes). La eficiencia que presenta el mes de mayor actividad con respecto a la capacidad efectiva de la flota calculada por el modelo, es de un 82,1%.

El promedio mensual calculado fue de 253,22 [h/mes], pudiendo observarse durante el año, periodos en que naves de importancia como los Dornier D-328 y los Citation S-550 no registraron vuelos, principalmente por mantenimiento programado. En el caso de aviones pequeños, tanto el Cessna 421 (CWE) como el Navajo Panther (CWB) muestran pocas operaciones de manera anual, debido a falta de demanda o porque los contratos fueron efectuados por otras aeronaves (ver anexo 3). El promedio fue calculado en base a 12 meses, razón por la cual los aviones que realizaron vuelos solo en algunos periodos, muestran una cantidad de horas de vuelo bajas. La eficiencia que presenta el promedio mensual con respecto a la capacidad efectiva calculada es de un 65,5%. El

siguiente gráfico contrasta los valores señalados, distribuidos a lo largo de la flota de aeronaves.

Figura 8: *Comparación entre Capacidad de Modelo y Vuelos Analizados*

(Fuente: Elaboración Propia)



	AAQ	CWC	CWX	ACG	AEY	CWW	CWZ	CWE	CWD	CWB	CWK
Promedio	19,03	25,25	14,11	23,48	14,95	24,17	46,92	1,86	19,35	0,31	63,80
Mayor Act.	24,3	29,6	24,9	21,6	20,3	17,8	75,9		24,6		78,2
Modelo	22,5	22,5	22,5	28,6	19,8	38,7	69,3	5,8	38,6	3,7	114,3

Lo primero que debe llamar la atención al observar la figura 8 son las aeronaves en las que los datos históricos son mayores a la capacidad proyectada por el modelo, como es en el caso de los Dornier D-228 (AAQ, CWC y CWX), el D-328 (CWX) y el Cessna Citation S-550 (CWZ). Para el primer grupo de aviones, el modelo asignó una capacidad de 22,5 [h/mes] de acuerdo al uso estándar que se les da para realizar los vuelos itinerantes a Los Pelambres, basado en el calendario tipo que es muestra en la figura 5. El exceso de horas de vuelo en el mes estudiado se debe a la realización de vuelos chárter de manera esporádica, los que suelen ser ejecutados mediante tripulaciones que no forman parte de la cartera fija de pilotos. En el anexo 3 puede observarse que solo en este mes de máxima actividad es que se produce esta particularidad. A nivel promedio, se registró que la aeronave CWC voló más que lo proyectado por modelo, ya que suele ser este el material que realiza todo vuelo distinto a los regulares, además de cubrir a los otros dos en caso de falta de demanda para los vuelos proyectados para ellos, tal como puede verse en el

promedio mensual para AAQ y CWX, los cuales están por debajo de las 22,5 [h/mes] que deberían volar de acuerdo al calendario tipo. Según la empresa, al momento de elaboración de este trabajo no se planea establecer otras rutas itinerantes.

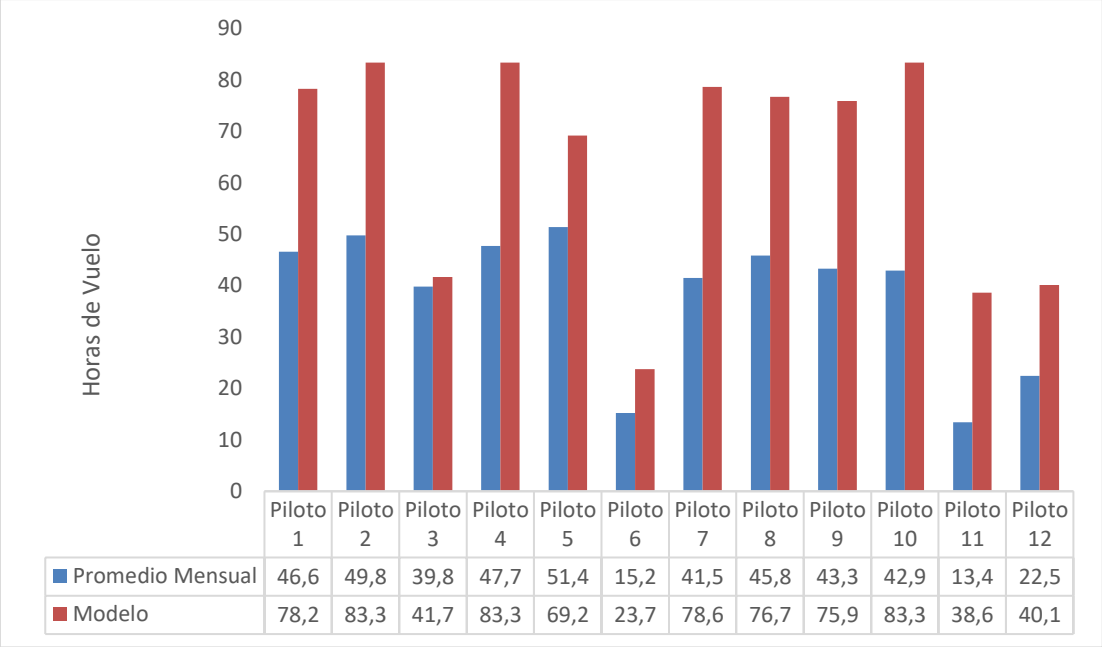
Similar explicación se da para el caso del Dornier D-328 de matrícula CC-AEY, el que para el mes analizado, registró una cantidad de horas de vuelo mayor a la asignada por el modelo, la que por lo demás es inferior a la del otro D-328 de la flota (ACG). La razón es que AEY no es de propiedad directa de la empresa, si bien es mantenido por esta, por lo que el aumento de su utilización se debe a vuelos particulares por fuera de los itinerantes a Vallenar. Se suele utilizar menos ya que la compañía debe pagar por las horas de vuelo realizadas. A nivel promedio, ambas naves están por debajo de lo asignado y, al igual que con los tres D-228, sus operaciones de iguales características además de las habilitaciones de los pilotos, permiten un intercambio de capacidad entre ellas y cubrirse ante imprevistos.

El Cessna Citation S-550 de matrícula CC-CWZ también sobrepasa la capacidad entregada por el modelo para el mes de mayor actividad, mas su promedio anual está por debajo de lo asignado. Esta aeronave, así como CWW, se encarga de los vuelos ejecutivos y de transporte aeromédico, por lo que no está atado a obligaciones de tipo itinerante. Por esto, y ya que 7 de los 12 pilotos de la cartera están habilitados para este avión, el traspaso de capacidad ociosa entre los dos Citation es posible, observando que CWW voló menos de la mitad de lo asignado. Viendo la información de los vuelos en el anexo 3, CWZ se excede nuevamente en el mes de agosto, ahora por 2,6 horas. Sin embargo, ese mes CWW no realizó vuelos, por lo que puede atribuirse el alza a cubrir las operaciones de este.

En cuanto a la cartera de pilotos, la comparación entre las horas de vuelo realizadas a nivel mensual y las asignadas por el modelo se muestran en la siguiente figura:

Figura 9: *Comparación entre Horas de Vuelo asignadas y las ejecutadas*

(Fuente: Elaboración Propia)



	Piloto 1	Piloto 2	Piloto 3	Piloto 4	Piloto 5	Piloto 6	Piloto 7	Piloto 8	Piloto 9	Piloto 10	Piloto 11	Piloto 12
Promedio Mensual	46,6	49,8	39,8	47,7	51,4	15,2	41,5	45,8	43,3	42,9	13,4	22,5
Modelo	78,2	83,3	41,7	83,3	69,2	23,7	78,6	76,7	75,9	83,3	38,6	40,1

Como se observa, en general existe una brecha amplia entre lo que el modelo dice que cada piloto es capaz de volar, con respecto a lo realmente volado durante el año estudiado. La explicación se debe a que el tiempo que los pilotos operaron depende de la demanda que efectivamente la empresa atendió, traducida en contratos de transporte aéreo. Puede constatarse que la mayoría de los pilotos volaron entre las 40 y 50 horas mensuales, destacando el esfuerzo del área de Operaciones de Aerocardal de distribuir homogéneamente las cargas de trabajo entre sus tripulaciones. Los casos puntuales son los pilotos 3 y 6, que cumplen labores gerenciales, y el 11 y 12, los que están habilitados para menos aeronaves que el resto.

Comparando con los valores asignados por el modelo, puede comprobarse la veracidad sobre la dificultad de, en la práctica, alcanzar el máximo de 100 [h/mes] establecido por la normativa aeronáutica, y aun usando el criterio anual en acuerdo con la empresa (1000[h/mes]/12[mes]), la cartera de pilotos alcanza en promedio el 60% de la capacidad efectiva fijada.

***Tabla 9**: Eficiencia de Pilotos con respecto a Capacidad Asignada*

(Fuente: Elaboración Propia)

P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
60%	60%	96%	57%	74%	64%	53%	60%	57%	52%	35%	56%

El caso del piloto 3 es particular como ya se ha señalado, por lo que el 96% que alcanza de rendimiento muestra que el modelo se ajustó correctamente a su situación. El piloto 6 alcanza un 64% de eficiencia, realizando principalmente vuelos en el Piper PA-31 Cheyenne I (CWD), al igual que P11, cuya única habilitación en aviones (vuela helicópteros) es en el material mencionado.

Habiendo realizado las comparaciones entre la capacidad efectiva de la empresa con el total volado en el año examinado, se realizó el ejercicio conceptual de ver cómo cambia el valor óptimo y otros parámetros al quitar a uno de los doce pilotos, y así probar si es posible acercarse al mes de mayor actividad registrado (317,2 [h/mes]). Analizando las posibilidades, se observa que el cumplimiento de los vuelos itinerantes al norte de Chile, principalmente el caso de los días lunes, no permitiría hacer un recorte entre los habilitados para volar tanto los Dornier D-228 y D-328. Al ser cinco las aeronaves que realizan vuelos regulares a las mineras durante los lunes, la obligación de tener tripulaciones de dos miembros obliga a tener al menos diez pilotos habilitados, habiendo precisamente tal cantidad en cartera, por lo que una reducción no permite a la empresa cumplir con los requerimientos, y en el caso del modelo, no le es posible encontrar una solución factible.

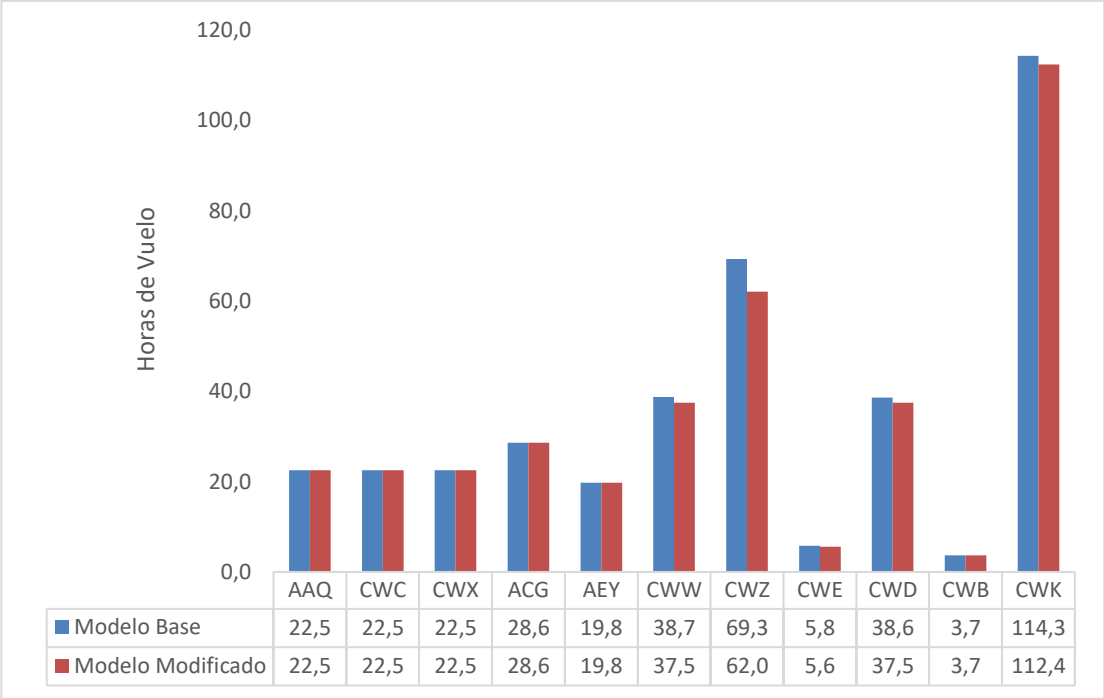
Por lo tanto, la única opción posible al intentar realizar una reducción de la cartera de pilotos, sería el analizar a los dos miembros restantes que no están habilitados para las aeronaves antes comentadas, siendo estos el piloto 6 y el número 11. Ellos vuelan el Piper Cheyenne I (CWD), avión que cuenta con otros dos pilotos habilitados, quienes cumplen además con realizar vuelos itinerantes. Según los resultados entregados por el modelo, el piloto 6 tiene asignadas 23,74 [horas/mes], recordando que además cumple con labores

administrativas en la empresa, y el número 11 puede volar 38,6 [horas/mes], siendo el que más vuela esta aeronave y el cual forma tripulación con los otros tres pilotos.

En un primer intento, se optó por quitar de la nómina al piloto 11, dada su importancia para las operaciones en el avión mencionado, y cuyo impacto en el valor óptimo podría ser mayor. No obstante, el modelo no fue capaz de encontrar una solución factible al problema que cumpliera con asignarle al Cheyenne I al menos un 4% de la capacidad efectiva de la flota, dado que los demás pilotos habilitados tienen preferencia a volar otras naves de mayor importancia operativa, como el G150, Citations y los Dornier. Por lo tanto, la opción escogida fue sacar del análisis al piloto 6, cuyas obligaciones gerenciales llevaron al modelo limitar su participación en la cartera de pilotos, decisión tomada bajo acuerdo con el área de Operaciones de la empresa al momento de presentar los criterios utilizados.

El nuevo valor de la capacidad efectiva de la empresa al quitar al piloto 6 fue de 374,53 [h/mes], disminuyendo 11,87 horas del valor base de capacidad (386,40 [h/mes]). La caída en la capacidad es de un 3%, lo que puede considerarse poco si se considera que el piloto 6 se encuentra limitado en el total de horas de vuelo que efectúa en comparación a los demás pilotos, pero provoca un efecto en cadena sobre las capacidades de las demás aeronaves. El efecto mencionado se muestra en la siguiente figura.

Figura 10: *Cambios en la Capacidad de la Flota al quitar un Piloto*
(Fuente: Elaboración Propia)



	AAQ	CWC	CWX	ACG	AEY	CWW	CWZ	CWE	CWD	CWB	CWK
Modelo Base	22,5	22,5	22,5	28,6	19,8	38,7	69,3	5,8	38,6	3,7	114,3
Modelo Modificado	22,5	22,5	22,5	28,6	19,8	37,5	62,0	5,6	37,5	3,7	112,4

En la figura 10 se aprecia que el Cheyenne I, de matrícula CC-CWD, experimentó una caída de 1,1 hora (-3,1%), siendo esta leve considerando que los tres pilotos restantes compensan las horas de vuelo perdidas al quitar a P6 del análisis. Los Dornier D-228 y D-328 no sufrieron cambios en la capacidad asignada, debido a que deben cumplir con la cantidad de horas demandadas asociadas a los vuelos itinerantes. Sin embargo, el Cessna Citation S-550 de matrícula CC-CWZ es el que sufre la mayor caída, un 10,5% de su capacidad inicial. Esto se explica ya que de los tres pilotos que quedan para operar el Cheyenne I, dos de ellos están habilitados además para los Citation, por lo que la redistribución de horas de vuelo afectó preferentemente a CWZ. El resto de los aviones también experimentan pequeñas bajas de capacidad, donde se destaca al Gulfstream G150 (CWK; -1,7%) y al Citation CWW (-3,3%).

Con respecto a los pilotos y los cambios producidos al redistribuirse sus horas de vuelo, la siguiente tabla sintetiza dicha información:

Tabla 10: *Cambios en Asignación de Horas de Vuelo de Pilotos*

(Fuente: Elaboración Propia)

Pilotos	Modelo Base	Modificado	Δ [%]
Piloto 1	78,2	77,7	-0,6
Piloto 2	83,3	83,3	0,0
Piloto 3	41,7	41,7	0,0
Piloto 4	83,3	83,3	0,0
Piloto 5	69,2	67,8	-2,1
Piloto 6	23,7	0,0	-100,0
Piloto 7	78,6	80,2	2,0
Piloto 8	76,7	77,7	1,3
Piloto 9	75,9	76,4	0,7
Piloto 10	83,3	83,3	0,0
Piloto 11	38,6	37,5	-3,1
Piloto 12	40,1	40,1	0,0

El piloto 11 es el que experimenta la mayor reducción de su capacidad, cayendo en la misma proporción que el avión CC-CWD, ya que se observa que P11 constituye tripulaciones con los otros tres pilotos habilitados, por lo que al quitar P6, su participación también cae. El piloto 5 ve disminuida sus horas de vuelo disponibles, principalmente debido a la caída de capacidad del Citation CWZ. Por otro lado, los pilotos 7,8 y 9 ven aumentada ligeramente su tiempo de vuelo, ya que deben compensar la fuga de HV desde los Citation S-550 hacia el Cheyenne I (Ver Anexo 1 para las habilitaciones de los pilotos).

Con este análisis se muestra que no es posible reducir en mayor medida la cartera de pilotos existentes en un intento por ajustar la capacidad efectiva de la flota actual con la requerida o demandada, debido a los problemas que esto acarrea en la red actual de tripulaciones formadas por las distintas habilitaciones de los pilotos. Dichas tripulaciones responden a las obligaciones que demandan los vuelos itinerantes a Los Pelambres y Vallenar, no obstante, no existe holgura en cuanto a pilotos habilitados para prescindir de alguno de ellos, al menos de forma conceptual, ya que en la práctica, cuando falta algún piloto habilitado para realizar alguno de los vuelos itinerantes, se recurren a externos no contratados por Aerocardal para completar las tripulaciones. Si bien en este proyecto no se discute los aspectos económicos que apuntan a cuánto cuesta mantener la capacidad actual, en lo referente al tema operacional, el modelo indica que hay holgura suficiente

para cubrir la demanda por vuelos no regulares, mientras que para los itinerantes se opera de manera ajustada.

4.2.4. Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad realizado guarda relación con lo expuesto en la sección anterior, en el sentido que se observará lo que sucede al modificar la cartera de pilotos con la que cuenta la compañía. La diferencia es que se analizará cómo cambia el valor óptimo encontrado para la Capacidad Efectiva de la flota al aumentar el número de pilotos habilitados para las aeronaves Dornier D-228, es decir, los aviones de matrícula AAQ, CWC y CWX. Con esto se busca también determinar hasta qué punto, según el modelo desarrollado, es conveniente aumentar la cartera de pilotos.

- Incorporando un piloto habilitado para volar los Dornier D-228

Al agregar el piloto número 13 habilitado en los tres aviones mencionados, la función objetivo (Capacidad efectiva de la flota) aumentó de 386,4 [h/mes] a 400,68[h/mes], un incremento de 3,7% con respecto al modelo base con 12 pilotos. La siguiente tabla muestra la variación generada sobre cada aeronave:

***Tabla 11**: Variación de Capacidad de la Flota al Incorporar un Piloto*
(Fuente: Elaboración Propia)

Flota	Modelo Base	Modelo 13 Pilotos	Δ [%]
AAQ	22,5	22,5	0,0%
CWC	22,5	22,5	0,0%
CWX	22,5	22,5	0,0%
ACG	28,6	28,6	0,0%
AEY	19,8	19,8	0,0%
CWW	38,7	51,6	33,2%
CWZ	69,3	69,3	0,0%
CWE	5,8	6,0	3,7%
CWD	38,6	40,1	3,7%
CWB	3,7	3,7	0,0%
CWK	114,3	114,1	-0,2%
SUMA	386,4	400,7	3,7%

La incorporación de un piloto en la compañía tuvo un impacto directo en el Citation S-550 de matrícula CC-CWW, incrementando su capacidad en un 33,2%. También vieron aumentadas sus capacidades el Cessna 421 (CWE; aumento de 3,7%) y el Piper Cheyenne (CWD; 3,7%). El Gulfstream G150 (CWK) registra una mínima caída, la cual podría considerarse despreciable. Cabe recordar que tanto los Dornier D-228 y D-328 están parametrizados solo para realizar vuelos itinerantes, por lo que agregar un piloto habilitado solo para estas naves (como es el caso de P13), genera un traspaso de horas de vuelo entre los pilotos que pueden volar además otros aviones, logrando un aumento global de la capacidad efectiva de la empresa.

La siguiente tabla muestra el efecto que ejerce la incorporación de un piloto habilitado en D-228 sobre el resto de la cartera de pilotos:

Tabla 12: *Variación en Tiempos de Vuelo al Incorporar un piloto*

(Fuente: Elaboración Propia)

Pilotos	Modelo Base	Modelo 13 Pilotos	Δ [%]
Piloto 1	78,2	78,2	0,0%
Piloto 2	83,3	83,3	0,0%
Piloto 3	41,7	41,7	0,0%
Piloto 4	83,3	83,3	0,0%
Piloto 5	69,2	70,8	2,3%
Piloto 6	23,7	23,7	0,0%
Piloto 7	78,6	78,9	0,3%
Piloto 8	76,7	77,9	1,5%
Piloto 9	75,9	77,5	2,2%
Piloto 10	83,3	83,3	0,0%
Piloto 11	38,6	40,1	3,7%
Piloto 12	40,1	40,1	0,0%
Piloto 13	-	22,5	-

De la tabla 12 puede notarse que los pilotos 5,7,8,9 y 11 han experimentado ligeros aumentos en sus tiempos de vuelo, en el que los primeros cuatro están habilitados tanto para D-228 como para los Citation (CWW y CWZ), explicando que los traspasos de HV se hayan dirigido principalmente a esas aeronaves. El piloto 11 aumentó en la misma proporción que el único avión que vuela, el Cheyenne I (CWD). Finalmente, el piloto 13

tiene asignadas 22,5 [h/mes], que corresponde a 9 vuelos mensuales hacia Los Pelambres, destino itinerante que realizan los D-228. En la tabla 2 del Anexo 4 puede observarse los parámetros asociados a cada piloto.

- Incorporando dos pilotos habilitados para volar los Dornier D-228

Al aumentar de 12 a 14 pilotos, con dos nuevos habilitados para volar los D-228, la capacidad efectiva de la flota alcanza los 410,7 [h/mes], un incremento del 6,3% con respecto al modelo base (386,4 [h/mes]), y del 2,49% sobre la capacidad calculada con 13 pilotos. El efecto que se produce es análogo al caso anterior, pero con mayor fuerza debido a que la incorporación de dos pilotos exclusivamente para las tres aeronaves mencionadas, permite redistribuir más horas de vuelo entre el resto de los materiales a los que los pilotos están habilitados, mientras que los nuevos se encargan de operar los vuelos itinerantes. La siguiente tabla muestra los cambios en la capacidad de cada material de la flota.

Tabla 13: *Variación de Capacidad de la Flota al Incorporar dos pilotos*
(Fuente: Elaboración Propia)

Flota	Modelo Base	Modelo 14 Pilotos	Δ [%]
AAQ	22,5	22,5	0,0%
CWC	22,5	22,5	0,0%
CWX	22,5	22,5	0,0%
ACG	28,6	28,6	0,0%
AEY	19,8	19,8	0,0%
CWW	38,7	54,5	40,8%
CWZ	69,3	69,3	0,0%
CWE	5,8	6,2	6,3%
CWD	38,6	41,1	6,3%
CWB	3,7	3,7	0,0%
CWK	114,3	120,0	5,0%
SUMA	386,4	410,7	6,3%

Al analizar la tabla 13, el impacto de incorporar dos pilotos habilitados en los D-228 nuevamente se ve reflejado en el aumento brusco de capacidad de la aeronave de matrícula CC-CWW. De acuerdo a la tabla de habilitaciones (Anexo 3), los siete pilotos habilitados para volar los aviones Cessna Citation S-550 lo están también para los D-228, por lo que la redistribución de horas de vuelo apuntará siempre a las aeronaves CWW y CWZ mientras no cumplan las restricciones de repartición de HV según prioridad. Caso similar ocurre para el Gulfstream G150 (CWK) y Cessna 421 (CWE), cuyos pilotos están también habilitados para volar los D-228. El primero vio incrementado su capacidad en un 5% mientras que el segundo un 6,3%. El avión Cheyenne I (CWD) debe su aumento de capacidad (6,3%) al compartir dos pilotos con los D-228, mientras que sus otros dos pilotos son exclusivos para esta aeronave. A continuación se muestran los cambios en los tiempos de vuelo que experimentan los pilotos en esta modalidad.

Tabla 14: *Variación en Tiempos de Vuelo al Incorporar dos pilotos*

(Fuente: Elaboración Propia)

Pilotos	Modelo Base	Modelo 14 Pilotos	Δ [%]
Piloto 1	78,2	78,2	0,0%
Piloto 2	83,3	83,3	0,0%
Piloto 3	41,6	41,7	0,0%
Piloto 4	83,3	83,3	0,0%
Piloto 5	69,2	71,6	3,5%
Piloto 6	23,7	23,7	0,0%
Piloto 7	78,6	78,9	0,4%
Piloto 8	76,7	77,9	1,5%
Piloto 9	75,8	76,9	1,4%
Piloto 10	83,3	83,3	0,0%
Piloto 11	38,6	41,1	6,3%
Piloto 12	40,1	40,1	0,0%
Piloto 13	-	22,5	-
Piloto 14	-	18,7	-

El piloto que ve aumentado sus tiempos de vuelo en mayor cantidad es el número 11, el que, como ya se ha comentado, vuela exclusivamente el Cheyenne I (CWD), por lo que el incremento mostrado es equivalente al de la aeronave debido a que forma tripulación con los otros tres pilotos, dos de ellos los cuales han redistribuidos sus HV

desde los Dornier D-228. El piloto 5 puede volar un 3,5% más, traspasando su exceso de horas de vuelo desde los D-228 hacia los Citation y Cessna 421. Es importante mencionar que mientras los pilotos están viendo aumentados sus tiempos de vuelo, los parámetros asociados al Periodo de Servicio de Vuelo y de Descanso siguen cumpliéndose. Para el caso del PSV, la cantidad de pilotos limitados por este factor ha bajado de 8 (con una cartera de 12 pilotos y capacidad de 386,4 [h/mes]) a 6 en el caso actual, siendo el piloto 2 y 9 los afectados. En el caso del primero, se puede ver de la tabla 14 que este sigue volando al máximo permitido, solo que trasladó sus HV a los Citation y G150, aviones que en promedio tienen Periodos de Servicio menores que los D-228, por lo que en síntesis obtiene menos tiempo de descanso. El piloto 9 vuela un 1,4% más que en el modelo base, pero traspasa también su capacidad ociosa a los Citation, disminuyendo el Periodo de Servicio de Vuelo mensual y también el de descanso.

- Incorporando tres pilotos habilitados para volar los Dornier D-228

Al aumentar la cartera de pilotos a quince, con tres de estos habilitados exclusivamente para volar los Dornier D-228, la capacidad productiva efectiva de la flota no registró cambio alguno con respecto al caso estudiado previamente. En otras palabras, el modelo asignó las mismas 410,7 [h/mes] al total de horas de vuelo disponibles para explotar que cuando se tiene en cartera a 14 pilotos. Es más, algunos pilotos registraron disminuciones en sus tiempos de vuelo mientras que el modelo asignó una porción de estas al piloto 15, tal como muestra la figura a continuación.

***Tabla 15**: Variación en Tiempos de Vuelo al Incorporar tres pilotos*

(Fuente: Elaboración Propia)

Pilotos	Modelo Base	Modelo 15 Pilotos	Δ [%]
Piloto 1	78,2	78,2	0,0%
Piloto 2	83,3	81,2	-2,5%
Piloto 3	41,6	41,7	0,0%
Piloto 4	83,3	83,3	0,0%
Piloto 5	69,2	71,6	3,5%
Piloto 6	23,7	23,7	0,0%
Piloto 7	78,6	78,0	-0,8%
Piloto 8	76,7	74,6	-2,8%
Piloto 9	75,8	71,9	-5,3%
Piloto 10	83,3	83,3	0,0%
Piloto 11	38,6	41,1	6,3%
Piloto 12	40,1	40,1	0,0%
Piloto 13	-	17,5	-
Piloto 14	-	17,5	-
Piloto 15	-	17,5	-

Puede verse en la figura 15 como los pilotos 2,7,8 y 9 muestran un recorte en la capacidad para volar, mientras que los tres pilotos nuevos registran 17,5 [h/mes]. El motivo de estos resultados anómalos se debe a la restricción llamada “Repartición Homogénea en Pilotos”. Esta distribuye las horas de vuelo entre todos los pilotos disponibles para una aeronave determinada, evitando que un piloto haga demasiados vuelos (poco real) y obligando a que todos operen. Ya que los D-228 cumplen con una cantidad fija de horas de vuelo por concepto de viajes itinerantes, el aumentar los pilotos habilitados hace que las horas de vuelo a cumplir por todos los habilitados sea menor, llegando al punto en que todos operan la cantidad mínima de HV fijadas para cumplir la restricción (en este caso, equivale a un viaje de 2,5 [h]).

Por esto es que se hizo el ejercicio de correr el modelo eliminando la restricción mencionada (llevando el recurso a cero), obteniéndose un nuevo valor óptimo y dejando la distribución de las horas de vuelo de los D-228 a criterio del modelo. La capacidad efectiva de la flota en el caso presentado es de 425,7 [h/mes], un 10,2% mayor al valor entregado con el modelo base y una cartera de 12 pilotos, y un 3,67% superior al óptimo

encontrado con 14 pilotos. Dentro de la flota de los D-2228, el avión de matrícula AAQ fue volado por 4 de los 13 habilitados, mientras que CWC y CWX por 5 de estos (incluyendo ambos a P13, P14 y P15). A continuación, se muestra el resumen de las horas de vuelo asignadas a la flota con el modelo modificado.

***Tabla 16**: Variación de Capacidad al incorporar tres pilotos en modelo modificado (Fuente: Elaboración Propia)*

Flota	Modelo Base	Modelo 15 Pilotos	Δ [%]
AAQ	22,5	22,5	0,0%
CWC	22,5	22,5	0,0%
CWX	22,5	22,5	0,0%
ACG	28,6	28,6	0,0%
AEY	19,8	19,8	0,0%
CWW	38,7	46,3	19,6%
CWZ	69,3	85,1	22,9%
CWE	5,8	6,4	10,2%
CWD	38,6	42,6	10,2%
CWB	3,7	3,7	0,0%
CWK	114,3	125,7	10,0%
SUMA	386,4	425,7	10,2%

El incorporar un tercer piloto para realzar los vuelos itinerantes permite liberar mayor cantidad de horas de vuelo para que sean redistribuidas de acuerdo a las habilitaciones de los otros pilotos. Se observa de la tabla 16 que el resto de la flota ve aumentada su capacidad, en especial los Citations, que comparten todos sus pilotos con la flota de D-228. Luego, el Gulfstream G150 (CWK), Cheyenne I (CWD) y el Cessna 421 (CWE) registran incrementos del 10% sobre su capacidad inicial, siendo el primero mencionado quien tiene la mayor cantidad de horas de vuelo disponibles de la flota, con un 29,5% de las 425,7 [h/mes]. El efecto que ejercen los tres nuevos pilotos habilitado en D-228 sobre el resto se muestran en la siguiente tabla.

***Tabla 17**: Variación en Tiempos de Vuelo al Incorporar tres pilotos en modelo modificado (Fuente: Elaboración Propia)*

Pilotos	Modelo Base	Modelo 15P	Δ [%]
Piloto 1	78,23	78,41	0,2%
Piloto 2	83,33	83,33	0,0%
Piloto 3	41,67	41,67	0,0%
Piloto 4	83,33	83,33	0,0%
Piloto 5	69,20	71,93	4,0%
Piloto 6	23,74	23,74	0,0%
Piloto 7	78,63	79,23	0,8%
Piloto 8	76,72	78,30	2,1%
Piloto 9	75,87	78,04	2,9%
Piloto 10	83,33	83,33	0,0%
Piloto 11	38,64	42,57	10,2%
Piloto 12	40,10	40,10	0,0%
Piloto 13	-	22,50	-
Piloto 14	-	22,50	-
Piloto 15	-	22,50	-

De la tabla 17, los pilotos que experimentan incrementos notorios en sus tiempos de vuelos son los mismos mencionados en los análisis anteriores. El piloto 5,7,8 y 9 trasladan su capacidad ociosa desde los D-228 a los Citation, mientras que P11 ve modificado su tiempo de vuelo según el alza que CC-CWD experimente, en este caso, un 10,2%. En el resto de pilotos no cambia sus capacidades si bien estos han igualmente redistribuido horas de vuelo desde los Dornier hacia el resto de aeronaves que efectúan vuelos no regulares. Los pilotos 2,3,4,6 y 10 no muestran cambios ya que están en sus niveles máximos de HV, y en cuanto a sus PSV, los pilotos 1,4,5,7,8,9 y 10 alcanzan las 160 [h/mes] que indica que los tiempos de vuelo asignados no pueden seguir aumentando.

En síntesis, el análisis de sensibilidad muestra que la decisión de incorporar uno o más pilotos habilitados en las naves Dornier D-228 tendría un efecto tanto en lo operacional, así como en la capacidad efectiva de la flota. Sobre el primer aspecto, el aumentar los pilotos disponibles para hacer vuelos itinerantes por sobre los diez que existe de manera inicial, permite generar holgura en la red de tripulaciones, la cual opera de manera ajustada, principalmente en los momentos que operan simultáneamente junto a los D-328. Con esto, el sumar uno o más pilotos que vuelen de manera exclusiva los D-228

significa que los pilotos que se encuentran habilitados para otras aeronaves estarán disponibles para efectuar vuelos ejecutivos, ambulancia o chárter en momentos críticos de la operación mensual, tal como ocurren los días lunes de cada semana, de acuerdo al calendario tipo de vuelos presentado en la figura 5.

Por otra parte, el efecto de aumentar el número de pilotos sobre la capacidad de la flota se manifiesta a través de la redistribución de las horas de vuelo que quedan ociosas, de parte de los pilotos que solían hacer vuelos itinerantes hacia el resto de los aviones en los que están habilitados. Lo anterior genera un incremento de la capacidad individual de las aeronaves dispuestas a cumplir con los vuelos no regulares, principalmente los dos Cessna Citation S-550, cuyos pilotos comparten habilitaciones con las naves mencionadas previamente, por lo que los tiempos de vuelo disponibles se traspasan de manera directa. Lo mismo se aplica para el Gulfstream G150 y en menor medida con el Piper PA-31 Cheyenne.

4.3. Implementación

En el caso de la herramienta computacional presentada en este proyecto, no se requiere de un proceso extendido de implementación a nivel de empresa, ya que esta no pretende por si misma generar cambios a niveles mayores como visión, misión, o políticas empresariales. Se considera el modelo de programación lineal aquí creado como un método de procesamiento de información para obtener información de importancia, como lo es el conocer la capacidad efectiva de la flota de aeronaves de Aerocardal, los tiempos de vuelo que su cartera de pilotos es capaz de alcanzar, los cambios que se producen tanto en la capacidad individual como global al modificar el número de pilotos, habilitaciones, disponibilidad por mantenimiento, entre otros parámetros. Estos aspectos resultan ser de sumo interés principalmente para el área de Operaciones, en la programación de corto – mediano plazo, así como para la alta gerencia en cuanto a la toma de decisiones que apuntan a la planeación de capacidad futura.

Sin embargo, se estima que su uso se concentre en Operaciones, en temas como el control de los parámetros asociados a tiempos de vuelos, periodos de servicio y de descanso de la cartera de pilotos, cambios de capacidad en el corto plazo al reemplazar pilotos y otros aspectos relacionados. Por esto es que el nivel de implementación de la herramienta es más bien local, lo que lleva a la realización de una capacitación al mismo nivel que apunta al modo de uso del modelo, los softwares requeridos para su utilización, su base conceptual y las posibilidades de modificar la herramienta de manera libre, a fin que esta se adapte a las nuevas condiciones y exigencias de la empresa.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

Al comenzar este proyecto, una de las grandes interrogantes de la empresa Aerocardal al momento de hacer gestión y planificación, era conocer la real capacidad productiva que pueden alcanzar con los recursos disponibles, a nivel mensual y en horas de vuelo. Por esta razón es que, basado en los conceptos de la Investigación de Operaciones, se diseñó un modelo de Programación Lineal y una herramienta computacional que resuelva un problema de maximización, siendo capaz de procesar aspectos tanto operacionales, humanos y de normativa aeronáutica.

Se determinó que las restricciones que afectan la capacidad efectiva de la flota pueden agruparse en cinco categorías: el tamaño de la cartera de pilotos y las habilitaciones de éstos sobre la flota; la disponibilidad mensual de las aeronaves con respecto al mantenimiento; la normativa aeronáutica que restringe los máximos tiempos de vuelo y asigna períodos de descanso; los vuelos itinerantes que la empresa realiza a Los Pelambres y Vallenar, con características que difieren de los vuelos no regulares, principal línea de negocio de la empresa; y la repartición homogénea de los contratos de trabajo entre las tripulaciones y aeronaves para evitar la sobreutilización de recursos.

Basado en las restricciones mencionadas anteriormente, y con la información más reciente al momento de realización de este proyecto, se obtuvo que la capacidad efectiva de la empresa es de 386,4 [h/mes], distribuido a lo largo de la flota de 11 aeronaves de acuerdo a los intereses de Aerocardal, respondiendo al número de vuelos itinerantes requeridos y generando capacidad para poder realizar operaciones no regulares. Se observa que la razón que impide a los pilotos de generar más tiempo de vuelo es debido al Periodo de Servicio de Vuelo, el que alcanza las 160 [h/mes] en gran parte de los 12 pilotos estudiados. Casos como los vuelos a Vallenar y Los Pelambres, en el que deben permanecer en el destino por 8 horas, genera altos PSV y obliga a otorgar tiempos de descanso mayores. Si bien decisiones como esta responden a motivos operacionales y económicos, impide generar más disponibilidad para las aeronaves involucradas y mayor tiempo de vuelo para los pilotos, en caso de que existiese la demanda.

Las 386,4 [h/mes] es el máximo nivel de producción que podría alcanzar la empresa, el cual depende del nivel de demanda que se tenga en la práctica. El principal modelo de negocios de Aerocardal son los vuelos no regulares, en la forma de vuelos ejecutivos, de ambulancia y chárter, los que son difíciles de proyectar ya que son contratos que se llevan a cabo de manera aleatoria, inmediata y no son sistemáticos en el tiempo, como sí lo son los vuelos itinerantes que Aerocardal realiza a Los Pelambres y Vallenar. El modelo diseñado no es capaz de predecir ni analizar la variabilidad en este tipo de requerimientos, por lo que el resultado ofrecido es posible alcanzarlo en un marco de plena demanda, en el que cada contrato de vuelo no intervenga en la realización del otro y que no exista falta de tripulaciones por estar cumpliendo con otros vuelos. Además, se considera que no haya fallas inesperadas que obliguen a periodos de mantenimiento correctivo y a tener aviones en tierra, así como externalidades que impidan el desarrollo normal de las actividades.

Comparando la capacidad con los vuelos efectuados el año anterior a este proyecto, se observó que, en promedio, la empresa operó 253,22 [h/mes], siendo el mes de marzo el que registró mayo actividad, con 317,20 [h/mes]. Lo anterior equivale a que, en promedio, la empresa utiliza el 65,5% de su capacidad efectiva según el modelo, llegando hasta 82,1% de eficiencia durante el mes mencionado. Con la intención de ver si es posible acercar la capacidad disponible con la demandada, se intenta reducir el tamaño de la cartera de pilotos. No obstante, la necesidad de tener diez pilotos habilitados para los vuelos itinerantes simultáneos acotó el análisis a dos posibles, consiguiéndose extraer a un piloto del modelo y logrando una caída en la capacidad efectiva a 374,53 [h/mes], un 3% del valor inicial.

El análisis de sensibilidad se enfocó en el caso contrario al recién expuesto. Ante lo ajustada que es la operación de vuelos itinerantes por el número de pilotos habilitados es que estudió los cambios que se producen al incrementar el número de pilotos. Este análisis demostró que el incorporar pilotos habilitados en el Dornier D-228 implicaría, por un lado, el generar una holgura en la red de tripulaciones capaces de cumplir con los vuelos itinerantes. Además, se produce una redistribución de las horas de vuelo ociosas que los pilotos iniciales destinaban para los vuelos itinerantes, hacia el resto de la flota a los cuales están habilitados, lo que genera un incremento de la capacidad individual de las aeronaves

dispuestas para realizar vuelos no regulares, principalmente en los dos aviones Cessna Citation S-550, el Gulfstream G150, avión que posee la mayor porción de la capacidad efectiva de la flota, así como el Piper PA-31 Cheyenne. La capacidad efectiva de la flota alcanzó un máximo de 425,74 [h/mes], un 10% mayor al caso inicial, al incorporar hasta 3 pilotos habilitados exclusivamente para los D-228.

Si bien este proyecto no se involucra en los aspectos económicos acerca de mantener una capacidad productiva amplia, en lo operacional, el modelo matemático y la herramienta computacional se ha mostrado útil en lo que se refiere al procesamiento de las variables que influyen de manera directa en la capacidad efectiva a corto plazo, es decir, el tamaño de la cartera de pilotos y las habilitaciones asociadas. Aunque no se efectuaron cálculos al respecto en este informe, también es posible obtener resultados al modificar el tamaño de la flota de aeronaves, lo que en la práctica corresponde a decisiones de largo plazo e involucra a la alta dirección de la empresa. En lo que respecta a la herramienta diseñada, modificar la flota requiere de mayor conocimiento en la estructura del mismo, ya que obliga a cambiar parámetros, celdas variables y algunas restricciones ingresadas en el sistema, pero es un tema que debiese incluirse como capacitación al momento de implementarse en las áreas de la empresa que pueda resultarle de utilidad. Además, la herramienta está abierta para cualquier mejora o cambio que se necesite hacer para adaptarse a nuevas situaciones.

CAPÍTULO VI: LIMITACIONES

Según Hillier y Lieberman (2002), la primera limitación que se debe tener presente al momento de comenzar un proyecto de este tipo, es que es imposible abarcar con el modelo todos los ámbitos que limitan las operaciones, sin que este pierda eficiencia, estabilidad e incluso optimalidad en sus soluciones. Problemas de este tipo suelen evidenciarse en las fases de prueba y mejoramiento, obligando a buscar nuevos enfoques a las restricciones cuestionadas para poder conseguir valores óptimos que resulten acordes con la realidad de las operaciones.

Una limitación encontrada en la construcción del modelo aquí presentado fue la imposibilidad de conseguir parámetros constantes asociados a las operaciones debido a la naturaleza de los vuelos no regulares, ya que estos no son ser iguales unos a otros. Se trata de vuelos ejecutivos, aeromédicos y chárter, que se diferencian de los vuelos itinerantes al ser los últimos mencionados constantes y sistemáticos, conociéndose de antemano sus tiempos de vuelo, periodos de servicio de vuelo, descansos de pilotos, entre otros. Es por esto que se ideó un método para obtener los parámetros requeridos de manera teórica a partir de información histórica, con el fin de representar lo más fielmente posible la realidad de las operaciones y buscando que el modelo no pierda confiabilidad.

Finalmente, la escasez de información sobre estudios similares para determinar la capacidad de flota en aerolíneas que tienen los vuelos no regulares como principal modelo de negocios, dificultó la elaboración del modelo acá presentado. Generalmente, los modelos diseñados mediante programación lineal son para líneas aéreas de vuelos regulares, y cuyo reto es optimizar sus itinerarios en base a la mayor utilización de sus pilotos, tripulaciones y aeronaves. En el caso estudiado en este informe, no existen itinerarios de vuelo, salvo el de los vuelos a Los Pelambres y Vallenar, que representan el 30% del uso de la capacidad de la flota, según el mismo modelo. Además, ante la alta variabilidad de los vuelos no regulares, es complicado realizar un ejercicio similar.

BIBLIOGRAFÍA

Acosta, M. (2011). *Diseño de un Plan Estratégico y Propuesta de Implementación para la empresa Aerocardal Limitada.* Santiago: UTFSM.

Benitez Rochel, J. (2000). Factores Determinantes de la Demanda de Transporte Aéreo y Modelos de Previsión. *Boletín Económico de ICE N° 2652*.

Benito, A. (2009). La Demanda de Transporte Aéreo. *Jornada sobre Demanda de Transporte Aéreo INECO*, (págs. 1-13).

Blanco Callejo, M. (2012). *La Capacidad Productiva - Apuntes de Clases.* España: Universidad Rey Juan Carlos.

Código del Trabajo. (2016). Santiago: Dirección del Trabajo.

DGAC. (2009). Resolución Exenta N°1437:. *Limitaciones de Tiempo de Vuelo, Periodos de Servicio de Vuelo y Descanso para Miembros de Tripulaciones de Vuelos de Aeronaves de Pasajeros cuyo MTOW sea Igual o inferior a 5700kg*. Santiago, Chile.

DGAC. (2013). *DAN 121 - Requisitos de Operación: Operaciones Nacionales, Internacionales, Regulares y No Regulares. 2° Edición.* Santiago: Dirección General de Aeronáutica Civil.

Fourer, R. (2015). 2015 Linear Programming Survey. *OR/MS Today*.

García, J. (2011). *Modelos de Programación Matemática - Apuntes.* ROGLE.

Heizer, J., & Render, B. (2009). *Principios de Administración de Operaciones 7° Edición.* Pearson Prentice Hall.

Hillier, F., & Lieberman, G. (2002). *Investigación de Operaciones, 7° Edición.* Mc Graw Hill.

Loustau Ferrán, F. (1977). El Transporte Aéreo Turístico: Los Vuelos Chárter. *Revista de Politica Internacional*, 57-75.

OACI. (2006). *Convenio sobre Aviación Civil Internacional - 9° Edición.*

OACI. (2013). *Documento OACI 9587: Criterios y Texto de Orientación sobre la Reglamentación Económica del Transporte Aéreo Internacional - 3° Edición.* Obtenido de OACI: http://www.icao.int/Meetings/atconf6/Documents/Doc%209587_es.pdf

Peña, P. (2007). *Gestión de Investigación de Operaciones - Apuntes de Clase.* UTFSM.

Qualimet. (2013). *Estimación de Demanda por Transporte Aéreo Nacional e Internacional en Chile.* Obtenido de Junta de Aeronáutica Civil: http://www.jac.gob.cl/wp-content/uploads/2016/03/Informe_final_estudio_demanda_25.11.2013.pdf

Russon, M. G., & Hollingshead, C. A. (1989). Aircraft Size as a Quality of Services Variable in a Short-Haul Market . *International Journal of Transport Economics, N°3*, 297-311.

Valdes, P. (2016). *Modelo de Optimización para el Cálculo de Remuneraciones Variables en Empresa de Servicios de Emergencia Movil.* Santiago: UTFSM.

ANEXOS

Anexo 1

Tabla 18: *Habilitaciones de Tipo*

		TABLA RELACIÓN PILOTOS - AERONAVES										
		D-228			D-328		S-550		Cessna 421	Cheyenne I	Navajo	G150
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	PILOTOS	**AAQ**	**CWC**	**CWX**	**ACG**	**AEY**	**CWW**	**CWZ**	**CWE**	**CWD**	**CWB**	**CWK**
1	A. Casasempere	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2	A. Castro	X	X	X			X	X				X
3	R. Espinoza	X	X	X	X	X	X	X				X
4	R. Luttges	X	X	X	X	X						X
5	E. Inostroza	X	X	X	X	X	X	X	X		X	
6	C. Riederer									X		
7	A. Schweinitz	X	X	X			X	X		X		
8	A. Zapata	X	X	X			X	X				
9	R. Grupe	X	X	X			X	X				
10	I. Fabry	X	X	X	X	X						X
11	J. Arellano									X		
12	R. Brenner	X	X	X	X	X						

Anexo 2

Capacidad Asignada por Modelo a Flota de Aeronaves y sus Tripulaciones

Tabla 19: *Dornier D-228 (CC-AAQ)*

AAQ

TRIPS.	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**Suma**
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
8	0	2,5	0	2,5	0	0	5	0	0	0	0	0	10,0
9	2,5	0	2,5	0	2,5	0	0	0	0	0	0	0	7,5
10	0	0	0	0	0	0	2,5	0	0	0	0	0	2,5
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	2,5	0	0	0	2,5
Suma	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	0	7,5	0	2,5	0	0	0	**22,5**

Tabla 20: *Dornier D-228 (CC-CWC)*

CWC													
TRIPS.	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**Suma**
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
2	2,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,50
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
5	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,00
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
10	0	0	2,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,50
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
12	0	5,0	0	2,5	1	0	2,5	2,5	2,5	0	0	0	16,00
Suma	2,5	6,7	2,5	2,5	1	0	2,5	2,5	2,5	0	0	0	**22,50**

Tabla 21: *Dornier D-228 (CC-CWX)*

CWX													
TRIPS.	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**Suma**
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
4	0	2,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,5
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
8	0	1	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	5,0
9	2,5	5	2,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10,0
10	0	1,0	0	0	0	0	0	1,5	0	0	0	0	2,5
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
12	0	0	0	0	2,5	0	0	0	0	0	0	0	2,5
Suma	2,5	9,5	2,5	0	2,5	0	4	1,5	0	0	0	0	**22,5**

Tabla 22: *Dornier D-328 (CC-ACG)*

ACG													
TRIPS.	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**Suma**
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
3	3,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,2
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
5	0	0	4,4	3,9	0	0	0	0	0	0	0	0	8,3
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
10	0	0	4,4	1,9	4,4	0	0	0	0	0	0	0	10,7
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
12	0	0	0	1,6	4,4	0	0	0	0	0,3	0	0	6,4
Suma	3,2	0	8,8	7,4	8,8	0	0	0	0	0	0	0	**28,6**

Tabla 23: *Dornier D-328 (CC-AEY)*

AEY													
TRIPS.	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**Suma**
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
4	0	0	2,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,2
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
10	0	0	4,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,4
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
12	2,2	0	4,4	4,4	2,2	0	0	0	0	0	0	0	13,2
Suma	2,2	0	11,0	4,4	2,2	0	0	0	0	0	0	0	**19,8**

Tabla 24: *Cessna Citation S-550 (CC-CWW)*

CWW

TRIPS.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Suma
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
7	0	0	3,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,2
8	3,2	3,2	0	0	0	0	6,7	0	0	0	0	0	13,1
9	0	0	0	0	3,2	0	9,6	9,6	0	0	0	0	22,4
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
Suma	3,2	3,2	3,2	0,0	3,2	0,0	16,3	9,6	0,0	0,0	0,0	0,0	**38,7**

Tabla 25*: Cessna Citation S-550 (CC-CWZ)*

CWZ

TRIPS.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Suma
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
7	0	0	3,3	0	9,9	0	0	0	0	0	0	0	13,2
8	2,0	3,3	0	0	9,9	0	9,9	0	0	0	0	0	25,1
9	1,3	0	0	0	9,9	0	9,9	9,9	0	0	0	0	31,0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
Suma	3,3	3	3,3	0	29,7	0	19,8	9,9	0	0	0	0	**69,3**

***Tabla 26**: Cessna 421 (CC-CWE)*

CWE													
TRIPS.	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**Suma**
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
5	5,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,80
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
Suma	5,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**5,80**

***Tabla 27**: Piper PA-31T Cheyenne I (CC-CWD)*

CWD													
TRIPS.	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**Suma**
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
11	2,7	0	0	0	0	23,7	12,2	0	0	0	0	0	38,6
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
Suma	2,7	0	0	0	0	23,7	12,2	0	0	0	0	0	**38,6**

Tabla 28: *Piper PA-31 Navajo Panther (CC-CWB)*

CWB

TRIPS.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Suma
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
5	3,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,70
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
Suma	3,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**3,70**

Tabla 29: *Gulfstream G-150 (CC-CWK)*

CWK

TRIPS.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Suma
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
3	4,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,4
4	0	49,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	49,5
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
10	42,2	5,9	0	12,3	0	0	0	0	0	0	0	0	60,4
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
Suma	46,6	55,5	0	12,3	0	0	0	0	0	0	0	0	**114,3**

- Posibles diferencias en algunas de las sumas se deben a la reducción automática de decimales por espacio de la celda, por lo que no se ven en las matrices.

Anexo 3

***Tabla 30**: Resumen de Vuelos Realizados durante Periodo Analizado*

(Fuente: Aerocardal)

HV mes [hrs]	AAQ	CWC	CWX	ACG	AEY	CWW	CWZ	CWE	CWD	CWB	CWK	SUMA
Enero	24,9	27,4	18,5		28,4	14,4	54,6	5,1	21,7		83,1	278,1
Febrero	12	22,7	18,2		31,1	24,5	47,9	6,6	18,9		79,5	261,4
Marzo	24,3	29,6	24,9	21,6	20,3	17,8	75,9		24,6		78,2	317,2
Abril	16,4	25,2	10,4	26,7	4,4	34	59,4		14,1		44,7	235,3
Mayo	26,3	29,3	17,3	31,5		26,3	34,7		30,2		45,3	240,9
Junio	18,4	22,3	19,6	30,2		61,4	42,8		22,6		41,3	258,6
Julio	21,7	30,8	16,6	32,7		22,3	60,1		13,2		61,1	258,5
Agosto	10,15	16,4	9,8	37,6	9,8		71,9		19		55,3	229,95
Septiembre	13,3	20,8	3	18,7	13,4	16,1	49,6	4,9	18,4		64,4	222,6
Octubre	21	25,6	8,5	31	23,4	16,2			32,6		63,7	222
Noviembre	20,1	23,2	8,9	30,1	19,81	54,3	14,8	5,7	13,7	3,7	49,6	243,9
Diciembre	19,8	29,7	13,6	21,7	28,8	2,7	51,3		3,2		99,4	270,1
SUMA	228,35	303	169,3	281,8	179,375	290	563	22,3	232,2	3,7	765,6	**3038,59**
Promedio	19,03	25,25	14,11	23,48	14,95	24,17	46,92	1,86	19,35	0,31	63,80	**253,22**
Prom Efect	19,03	25,25	14,11	28,18	19,93	26,36	51,18	5,58	19,35	3,70	63,80	**276,47**

Esta tabla muestra los vuelos realizados por la flota durante todo el año analizado en este proyecto, exceptuando los vuelos de prueba por mantenimiento.

Anexo 4

TABLAS ASOCIADAS AL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

***Tabla 31:** Parámetros de pilotos en Modelo Base*

Descripción	TV [h/mes]	TV [%]	PSV [h/mes]	PSV [%]	PD [h/mes]	PSV+PD [h/mes]	% sobre 480 [h]
Piloto 1	78,23	94%	160,00	100%	256,31	416,31	87%
Piloto2	83,33	100%	160,00	100%	273,81	433,81	90%
Piloto 3	41,67	50%	98,54	62%	173,76	272,29	57%
Piloto 4	83,33	100%	160,00	100%	268,31	428,31	89%
Piloto 5	69,20	83%	160,00	100%	262,22	422,22	88%
Piloto 6	23,74	28%	43,90	27%	87,93	131,82	27%
Piloto 7	78,63	94%	160,00	100%	272,95	432,95	90%
Piloto 8	76,72	92%	160,00	100%	268,20	428,20	89%
Piloto 9	75,87	91%	160,00	100%	271,85	431,85	90%
Piloto 10	83,33	100%	160,00	100%	270,89	430,89	90%
Piloto 11	38,64	46%	71,45	45%	143,11	214,56	45%
Piloto 12	40,10	48%	102,19	64%	187,56	289,75	60%

Tabla 32: *Parámetros de pilotos al incorporar un nuevo Piloto*

Descripción	TV [h/mes]	TV [%]	PSV [h/mes]	PSV [%]	PD [h/mes]	PSV+PD [h/mes]	% sobre 480 [h]
Piloto 1	78,2	94%	160,00	100%	256,24	416,24	87%
Piloto2	83,3	100%	160,00	100%	274,19	434,19	90%
Piloto 3	41,7	50%	97,16	61%	174,31	271,47	57%
Piloto 4	83,3	100%	160,00	100%	270,89	430,89	90%
Piloto 5	70,8	85%	160,00	100%	254,80	414,80	86%
Piloto 6	23,7	28%	43,90	27%	87,93	131,82	27%
Piloto 7	78,9	95%	160,00	100%	273,58	433,58	90%
Piloto 8	77,9	93%	160,00	100%	262,37	422,37	88%
Piloto 9	77,5	93%	160,00	100%	263,85	423,85	88%
Piloto 10	83,3	100%	160,00	100%	268,31	428,31	89%
Piloto 11	40,1	48%	74,09	46%	148,40	222,49	46%
Piloto 12	40,1	48%	102,73	64%	184,82	287,54	60%
Piloto 13	22,5	27%	55,10	34%	108,00	163,10	34%

Tabla 33*: Parámetros de pilotos al incorporar dos Pilotos*

Descripción	TV [h/mes]	TV [%]	PSV [h/mes]	PSV [%]	PD [h/mes]	PSV+PD [h/mes]	% sobre 480 [h]
Piloto 1	78,22	94%	160,00	100%	256,19	416,19	87%
Piloto2	83,33	100%	151,31	95%	249,42	400,73	83%
Piloto 3	41,67	50%	98,24	61%	173,76	272,00	57%
Piloto 4	83,33	100%	160,00	100%	269,91	429,91	90%
Piloto 5	71,64	86%	160,00	100%	250,77	410,77	86%
Piloto 6	23,74	28%	43,90	27%	87,93	131,82	27%
Piloto 7	78,91	95%	160,00	100%	274,64	434,64	91%
Piloto 8	77,89	93%	160,00	100%	262,37	422,37	88%
Piloto 9	76,95	92%	158,16	99%	258,28	416,43	87%
Piloto 10	83,33	100%	160,00	100%	269,29	429,29	89%
Piloto 11	41,07	49%	75,93	47%	152,10	228,03	48%
Piloto 12	40,10	48%	101,26	63%	184,18	285,44	59%
Piloto 13	22,50	27%	54,92	34%	108,00	162,92	34%
Piloto 14	18,66	22%	45,50	28%	89,58	135,08	28%

Tabla 34: *Parámetros de pilotos al incorporar tres Pilotos*

Descripción	TV [h/mes]	TV [%]	PSV [h/mes]	PSV [%]	PD [h/mes]	PSV+PD [h/mes]	% sobre 480 [h]
Piloto 1	78,2	94%	160,00	100%	256,19	416,19	87%
Piloto2	81,2	97%	146,16	91%	239,39	385,55	80%
Piloto 3	41,7	50%	98,24	61%	173,76	272,00	57%
Piloto 4	83,3	100%	160,00	100%	270,25	430,25	90%
Piloto 5	71,6	86%	160,00	100%	250,77	410,77	86%
Piloto 6	23,7	28%	43,90	27%	87,93	131,82	27%
Piloto 7	78,0	94%	158,16	99%	270,45	428,60	89%
Piloto 8	74,6	90%	152,26	95%	246,08	398,34	83%
Piloto 9	71,9	86%	146,16	91%	234,37	380,53	79%
Piloto 10	83,3	100%	160,00	100%	268,96	428,96	89%
Piloto 11	41,1	49%	75,93	47%	152,10	228,03	48%
Piloto 12	40,1	48%	101,26	63%	184,18	285,44	59%
Piloto 13	17,5	21%	41,94	26%	84,00	125,94	26%
Piloto 14	17,5	21%	42,79	27%	84,00	126,79	26%
Piloto 15	17,5	21%	42,42	27%	84,00	126,42	26%

Tabla 35: *Parámetros de pilotos en Modelo modificado con tres pilotos nuevos*

Descripción	TV [h/mes]	TV [%]	PSV [h/mes]	PSV [%]	PD [h/mes]	PSV+PD [h/mes]	% sobre 480 [h]
Piloto 1	78,4	94%	160,00	100%	256,76	416,76	87%
Piloto2	83,3	100%	157,28	98%	259,11	416,38	87%
Piloto 3	41,7	50%	77,71	49%	125,20	202,91	42%
Piloto 4	83,3	100%	159,35	100%	263,89	423,24	88%
Piloto 5	71,9	86%	160,00	100%	249,29	409,29	85%
Piloto 6	23,7	28%	43,90	27%	87,93	131,82	27%
Piloto 7	79,2	95%	160,00	100%	276,86	436,86	91%
Piloto 8	78,3	94%	160,00	100%	263,05	423,05	88%
Piloto 9	78,0	94%	160,00	100%	262,72	422,72	88%
Piloto 10	83,3	100%	159,35	100%	263,89	423,24	88%
Piloto 11	42,6	51%	78,72	49%	157,68	236,40	49%
Piloto 12	40,1	48%	102,61	64%	184,17	286,78	60%
Piloto 13	22,5	27%	55,26	35%	108,00	163,26	34%
Piloto 14	22,5	27%	55,10	34%	108,00	163,10	34%
Piloto 15	22,5	27%	55,18	34%	108,00	163,18	34%