

**EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD PARA LA
IMPLANTACIÓN RNP10 EN EL CORREDOR
SANTIAGO DE CHILE–LIMA DE LAS RUTAS RNAV
PARALELAS UL 780 Y UL 302**

**Preparado por
CARSAMMA**

29 Septiembre 2003

RESUMEN EJECUTIVO

El presente reporte presenta los resultados de la evaluación del riesgo de colisión entre aeronaves que vuelan en el corredor Santiago-Lima entre los FL290 y 410, inclusive, como requerimiento para la implementación de la “Performance de Navegación Requerida (RNP10)”. Ese corredor se encuentra sobre el Océano Pacífico y comprende los tramos de las rutas UL780 y UL 320 entre los puntos MOXES y SULNA y entre los puntos ILMAR y ATEDA, como mostrados en la Figura 1.

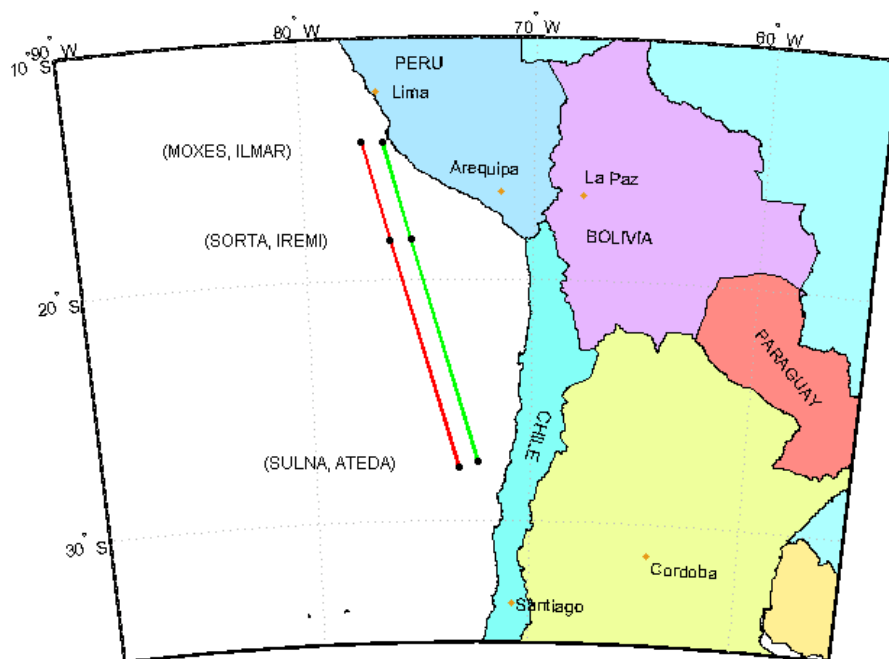


Figura 1. Rutas UL780 y UL320.

La evaluación de riesgo utilizada en esta análisis basada en el Modelo Riesgo de Colisión de Reich (CRM). Los resultados son mostrados para la situación actual, también, es hecha una proyección para el aumento de tráfico aéreo de 2, 4 y 6% en el periodo entre 2002 – 2012. La estimativa para el riesgo es comparada con el Nivel de Seguridad Deseado (TLS) de 5×10^{-9} accidentes por hora de vuelo. En los estudios fue considerado que todas las aeronaves y tripulaciones que vuelan en el corredor Santiago – Lima están aprobadas para la operación RNP 10.

Fue examinada una muestra de un mes de datos colectados en el período de 01 hasta 31 de diciembre de 2002, representando cerca de 1142 vuelos, a partir de los cuales fueron determinados algunos de los parámetros utilizados en el modelo de riesgo de colisión, como: tamaños medios de las aeronaves operando en el espacio aéreo considerado; las velocidades relativas medias y la ocupación lateral. Con esos datos fue calculada la velocidad media de las aeronaves que es de 455 Kt. Para lo calculo de la tasa de ocupación lateral fue utilizado un espaciamiento de 80 NM, siendo que la separación longitudinal aplicada a las rutas es de 10 minutos basada en la técnica del número Mach (MNT). Los datos colectados muestran la

inexistencia de desviaciones laterales, lo que no quiere decir que no ocurrieran en la práctica, conforme experiencias obtenidas con otros espacios aéreos. De esa manera, la probabilidad de superposición lateral, $P_y(S_y)$, fue calculada con base en un modelo analítico. En el modelo considerado, se hizo una modelación que lleva en cuenta los dos tipos distintos de desviaciones: las normales y las groseras. La análisis ha dado el valor presente, $P_y(S_y) = 7,0795 \times 10^{-8}$.

La probabilidad de superposición vertical, $P_z(0)$, fue calculada a partir de las desviaciones verticales obtenidas de un programa de monitorización elaborado para la región NAT, debido la inexistencia de informaciones sobre las citadas desviaciones. El resultado obtenido fue $P_z(0) = 0,504$.

Como no existían datos disponibles para ninguno de los de los componentes, típico ó atípico, fueran utilizados, para el corredor Santiago–Lima, los datos y modelos de la región NAT. Los datos de desempeño AAD típico consistieran de datos de Modo C, colectados para aeronaves volando entre el FL290 y 410, inclusive, a este de la costa del Canadá dentro de la cobertura de sus radares. Para el desempeño AAD atípico, fueran utilizadas las grandes desviaciones de altitud, atípicas, obtenidas en el año de 1997 del espacio aéreo “NAT MNPS”. Entonces, un modelo “Doble Doble Exponencial” fue obtenido como el mejor modelo de los datos para el espacio aéreo considerado. En esos datos (atípicos), en particular, está incluida una desviación de 1200 pies debido a turbulencias.

Fue necesario utilizar límites conservativos para diversos parámetros debido la carencia de datos. Los parámetros relacionados a la velocidad relativa vertical fue ajustado de parámetros utilizados en otras regiones.

La ocupación estimada, 0.028, refleja la distribución del tráfico por todo el día. Los datos referentes a los tiempos de pasaje en los puntos de reporte de posición fueron obtenidos por extrapolación de los valores obtenidos en la muestra colectada, teniendo en cuenta que algunos de los puntos constantes de los tramos analizados no poseían informaciones de tiempo.

Fue encontrado el valor de $7,3350 \times 10^{-10}$ para el riesgo de colisión para el tráfico actual de las rutas UL780 y UL302.

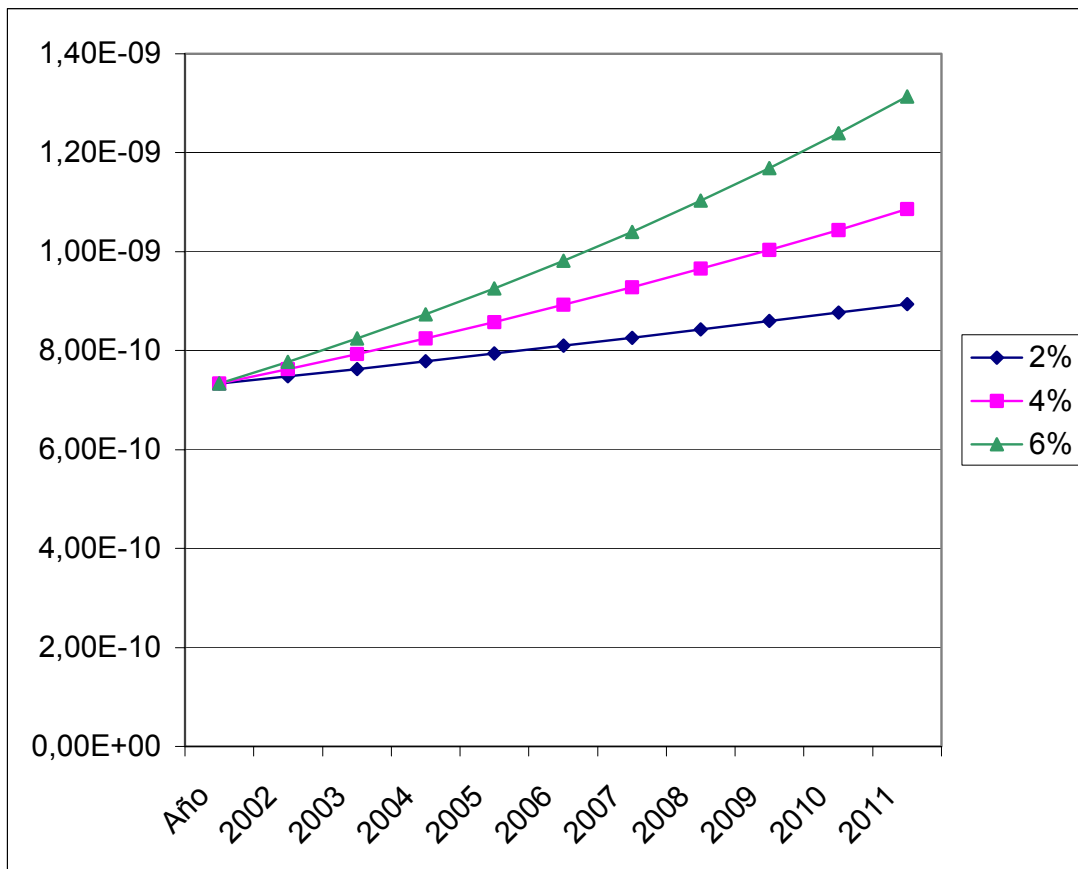


Figura 2. Riesgo de Colisión con Tasas de Crecimiento Anual de 2, 4, y 6%.

El riesgo de colisión fue estimado para tasas de crecimiento del tráfico de 2, 4 y 6% para el período 2002 hasta 2012.

Como pueden ser observados en la Figura 2, los valores del riesgo de colisión están bajo del límite de 5×10^{-9} , asumido como nivel de seguridad deseado (TLS).

Las siguientes recomendaciones son sugeridas:

- Que los Estados involucrados prosigan en la implementación de la RNP 10 en los tramos de las rutas UL302 y UL780 analizados.
- Las desviaciones laterales deberán ser obtenidas y informadas a la CARSAMMA de acuerdo con los procedimientos de los programas de monitorización de desviaciones. Deberán ser informadas todas las desviaciones superiores a 10NM, utilizándose los formularios apropiados.
- Deberán ser informadas a la CARSAMMA las desviaciones verticales de más de 300ft, de acuerdo con los formularios apropiados.
- Deberán ser informados los datos referentes al status de aprobación RNP y RVSM de las aeronaves de cada uno de los Estados involucrados.

1. Introducción	2
2. Descripción del espacio aéreo	2
2.1 Descripción de las rutas y flujos de tránsito aéreo	2
2.2 Servicios de Tránsito Aéreo y Procedimientos	3
2.3 Población y Dimensión de las Aeronaves	4
2.4 Colecta de Datos.....	5
3. Evaluación del Riesgo de Colisión Lateral	9
3.1 Modelo de Riesgo de Colisión	9
3.2. Modelo de Riesgo de Colisión Lateral.....	9
3.3 Probabilidad de Superposición Lateral	11
3.3.1 Estimativa del Factor α	14
3.4 Ocupación Lateral	15
3.4.1 Método Directo – Tiempo de Pasaje por el Punto	16
3.4.2 Cálculo de la Ocupación en las Rutas UL780 y UL302 del Corredor Santiago–Lima	17
3.4.3 Simulación del Crecimiento de la Ocupación Lateral en el Corredor Santiago–Lima	19
3.4.4 Comentario Final sobre la Ocupación.....	21
3.5 Probabilidad de Superposición Vertical, $P_z(0)$	21
3.5.1 Modelo de la Distribución ASE	23
3.5.3 Distribución TVE	32
3.6 Estimativa de las Velocidades.....	33
3.6.1 Velocidad Media $ \bar{V} $ y Velocidad Relativa Media $ \Delta V $	34
3.6.1.1 Aplicación en el Corredor Santiago–Lima.....	34
3.6.2 Velocidad Lateral Relativa Media $ \dot{y} $	36
3.6.2.1 Aplicación en el Corredor Santiago–Lima.....	37
3.6.3 Velocidad Vertical Relativa Media $ \dot{z} $	37
3.7 Estimativas de la Probabilidad de Superposición Lateral, $P_y(S_y)$	37
3.8 Sumario y Comparación de Valores de los Parámetros	38
3.9 Resultados para el Riesgo de Colisión Lateral.....	39
4. Conclusiones	40
4.1 Análisis de Datos.....	40
4.2 Velocidades Medias	41
4.3 Análisis del Riesgo.....	41

1. INTRODUCCIÓN

Ese trabajo se refiere a la implementación de la RNP10 [1] en el corredor Santiago–Lima, con separación mínima de 50 millas náuticas (MN) entre los ejes de las rutas involucradas. Es esperado que esa implementación ocurra en Enero de 2005.

La reducción de separación mínima debe ser precedida de una análisis de riesgo conforme el *Manual on Airspace Planning Methodology* [2]. En ese caso, debe ser garantizado el Nivel Deseado de Seguridad (TLS) máximo de 5×10^{-9} accidentes de vuelo por dimensión de aeronave y por hora de vuelo[3].

La análisis de riesgo es basada en el modelo de riesgo de colisión de Reich [Reich ^{4,5,6} apud ARINC ¹¹]. Los parámetros para la análisis fueron estimados de datos colectados en las rutas, de desviaciones laterales simuladas y datos verticales (ASE y AAD) obtenidos en el espacio aéreo de las regiones NAT y Europeo para se hacer una evaluación del riesgo actual. Estimativas para el crecimiento del tránsito aéreo durante el período de diez años (2002-2012) fueron utilizadas para hacer una proyección del aumento del riesgo en ese período. Las estimativas son comparadas con el TLS 5×10^{-9} accidentes por dimensión y para todas las causas para cada tasa de crecimiento considerada de 2, 4 y 6%.

Ese trabajo empieza con la descripción del espacio aéreo y análisis de datos en el Capítulo 2. El capítulo 3 muestra los procedimientos de cálculo del riesgo de colisión. Las conclusiones y recomendaciones son presentadas en el Capítulo 4.

2. DESCRIPCIÓN DEL ESPACIO AÉREO

Ese capítulo describe las características de las rutas y los flujos de tránsito aéreo, bien como los servicios ATS. También describe la población de aeronaves, sus dimensiones y velocidades medias

2.1 Descripción de las rutas y flujos de tránsito aéreo

El corredor Santiago–Lima es formado por las rutas oceánicas UL780 y UL320. Las rutas están situadas dentro de las FIR Lima y FIR Santiago. Los tramos que fueron estudiados para obtención del riesgo son aquellos situados entre los puntos de notificación SULNA y MOXES de la UL780 y ATEDA y ILMAR de la UL302. El esquema con los puntos de notificación y los límites considerados en el cálculo del riesgo son los mostrados en la Figura 2.1. En la análisis del riesgo son considerados datos solamente del espacio aéreo entre los FL290 y FL410, inclusive. La Tabla 2.1 muestra los puntos de notificación con las coordenadas geográficas respectivas y las distancias entre ellos para las rutas del corredor. La Tabla 2.2 muestra los sentidos del tránsito en los niveles de vuelo del corredor.

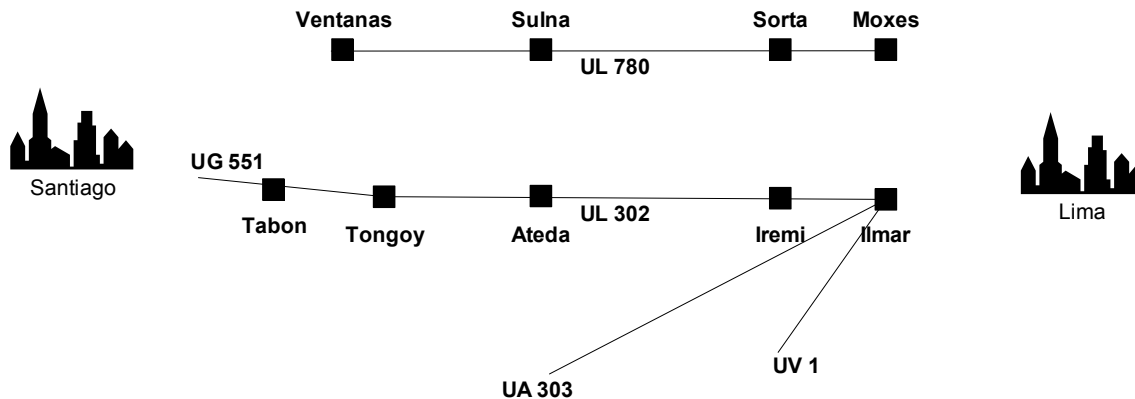


Figura 2.1 Estructura de las Rutas del Corredor Santiago-Lima.

Tabla 2.1 Coordenadas Geográficas de los Puntos de Notificación.

RUTA	PUNTO	LAT/LONG	MN	HDG
UL780	MOXES	14° 16,5' S / 077° 25,1' W		164/337
	SORTA	18° 21,0' S / 076° 18,2' W	252	
	SULNA	27° 46,7' S / 073° 20,4' W	587	
UL302	ILMAR	14° 16,5' S / 076° 30,8' W		
	IREMI	18° 21,0' S / 075° 23,0' W	252	
	ATEDA	27° 31,7' S / 072° 26,6' W	574	

Tabla 2.2 Sentidos de vuelo entre FL290 y FL410.

FL	Sentido del vuelo
410	Lima→Santiago
390	Santiago→Lima
370	Lima→Santiago
350	Santiago→Lima
330	Lima→Santiago
310	Santiago→Lima
290	Lima→Santiago

2.2 Servicios de Tránsito Aéreo y Procedimientos

El espacio aéreo para implementación de la RNP10 del corredor Santiago-Lima tiene vigilancia realizada, principalmente, por reportes de posición de los pilotos en los puntos de notificación, teniendo en cuenta que la cobertura radar en la área en análisis es restringida a

los tramos iniciales de las rutas. En los casos en que se tengo necesidad, hay la alternativa de utilización de las comunicaciones tierra/aire por HF. Entretanto esa alternativa es poco utilizada debido a la calidad de los sistemas de comunicación en VHF.

El procedimiento de separación longitudinal utilizado es aquel previsto en la técnica del número Mach (MNT), utilizándose una separación de 10 minutos entre aeronaves volando en lo mismo nivel de vuelo.

2.3 Población y Dimensión de las Aeronaves

La población de aeronaves fue obtenida a partir de los datos de las FIR Santiago y Lima. La Tabla 2.3 muestra todos los tipos de aeronaves y el número de vuelos que fueron reportados en SORTA y IREMI, a altitudes entre FL 290 y FL 410, inclusive, de 01 a 31 de diciembre de 2002 en las rutas UL780 y UL302.

Tabla 2.3 Población de Aeronaves, Dimensiones y Velocidades Medias.

Tipo de Aeronave	Cantidad	Cant. (%)	Porcentaje Acumulada	Longitud (pies)	Anchura (pies)	Altura (pies)	Velocidad Media
B763	658	57,31	57,31	159,26	156,18	52,03	459
A320	105	9,20	66,51	123,34	111,92	38,61	452
B742	71	6,25	72,76	231,98	195,80	63,46	455
B737	69	6,13	78,90	231,98	195,80	63,46	452
DC10	64	5,66	84,56	182,38	155,45	57,55	450
A343	58	5,00	89,56	208,80	197,97	54,83	452
B762	52	4,59	94,15	180,37	156,18	52,03	449
MD11	13	1,16	95,31	202,23	170,72	57,55	444
A319	9	0,82	96,13	111,10	111,92	38,61	436
IL62	8	0,71	96,83	175,12	141,09	34,02	451
C750	5	0,47	97,30	72,23	63,69	19,04	430
B744	4	0,35	97,64	232,11	211,43	63,69	462
GLF5	4	0,37	98,01	96,48	93,62	25,85	443
B767	3	0,25	98,26	201,58	170,39	55,16	478
B752	2	0,17	98,44	155,35	124,91	44,65	452
DC9	2	0,20	98,63	133,69	93,40	28,89	407
F900	2	0,19	98,82	66,35	63,46	24,79	413
GLF4	2	0,18	99,00	88,39	77,89	24,35	449
MD88	2	0,18	99,18	147,76	107,73	29,52	436
A323	1	0,09	99,27	123,34	111,92	38,61	436
B722	1	0,10	99,37	209,21	200,04	60,79	413
B735	1	0,10	99,47	101,81	94,81	36,52	407

B757	1	0,09	99,55	178,93	124,92	44,65	455
C17A	1	0,09	99,64	68,45	64,38	20,68	447
CL60	1	0,09	99,73	68,45	64,38	20,68	450
G3	1	0,08	99,81	83,14	77,89	24,355	484
GLF2	1	0,09	99,90	79,97	68,88	24,52	443
GULF	1	0,10	100,00	83,14	77,89	24,35	407
Sistema	1.142	100,00					443*

*Velocidad media simples. Velocidad utilizada en el cálculo del riesgo de colisión, ver ítem 3.6.

Los datos de las muestras tienen un total de 1142 vuelos. La aeronave predominante en el corredor es el B763. Ese tipo representa 57,31 % del total de aeronaves. Mismo con un grande número de diferentes tipos de aeronaves que operaron en el corredor en el período de colecta de datos, apenas ocho tipos totalizaron más de 95 % de los vuelos.

2.4 Colecta de Datos

Una parte de los datos usados para la evaluación del riesgo de colisión fue fornecida por los ACC de Lima y Santiago. Esos datos consisten de los movimientos del tránsito aéreo en las rutas en estudio en el período desde 01 a 31 de diciembre de 2002, incluyendo tiempos de pasaje en los puntos de notificación, niveles de vuelo en los puntos de notificación y rutas utilizadas por las aeronaves.

Los datos relativos a las desviaciones laterales y verticales fueron obtenidos en otras regiones, (NAT, NOPAC, EUR). Teniendo en vista que, hasta el cierre de ese trabajo, no había reporte de desviaciones en el espacio aéreo considerado se ha decidido por una aproximación conservativa, teniendo en cuenta que las citadas desviaciones, aún que no reportada, pueden tener ocurrido en la práctica.

La Figura 2.2 muestra el número de vuelos por día. La media de tráfico es de 37 vuelos.

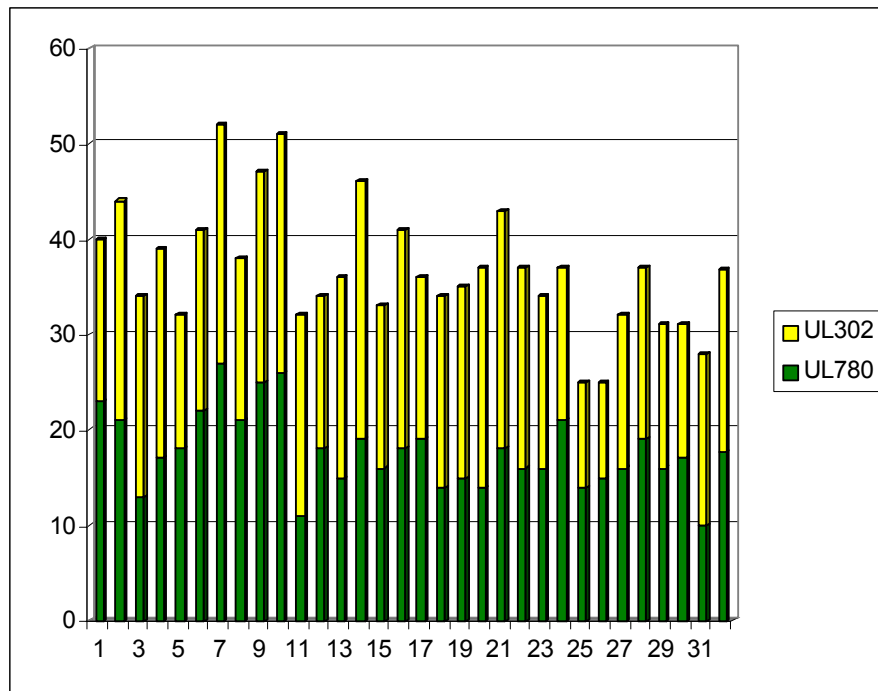


Figura 2.2 Número de Vuelos por Día.

La Figura 2.3 muestra la distribución de los vuelos dentro del período de 24 horas, en intervalos de una hora, en los puntos IREMI y SORTA en las rutas UL302 y UL780. Verifícase la presencia de puntos de concentración durante algunos períodos del día.

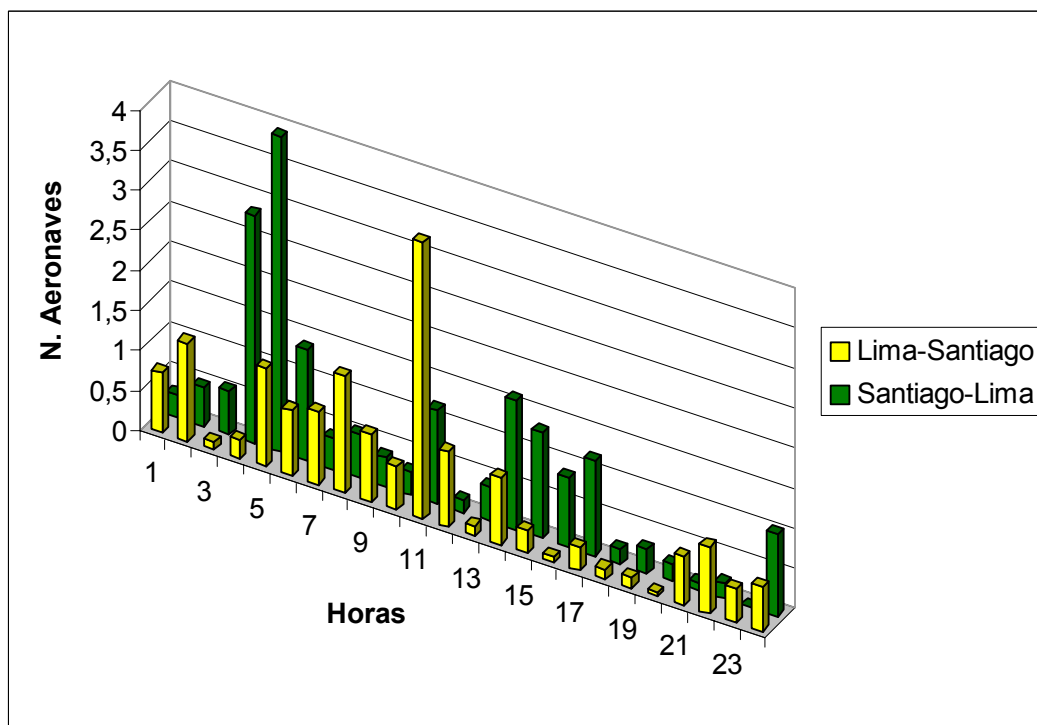


Figura 2.3 Distribución por hora de vuelo en SORTA y IREMI.

Por no haber pasajes en sentido opuesto, los puntos mostrados en la Figura 2.3 muestran las horas de mayor densidad de tráfico debido a vuelos en el mismo sentido en SORTA y IREMI. Entre 10:00 y 11:00 horas ocurre la mayor densidad de tráfico en el sentido Lima–Santiago y entre 04:00 y 05:00 horas ocurre la mayor densidad de tráfico en el sentido Santiago–Lima. Esos puntos ocurren por toda la ruta en diferentes horarios.

La Figura 2.4 muestra el número de vuelos por nivel, para las rutas UL302 y UL780, observándose que la mayoría de ellos concentrarse en el nivel 370 en la UL302 y en el nivel 310 en la UL780. La Figura 2.5 presenta el número total de vuelos en cada nivel en el corredor Santiago–Lima que fueron notificados en los puntos IREMI y SORTA durante el período de colecta de datos.

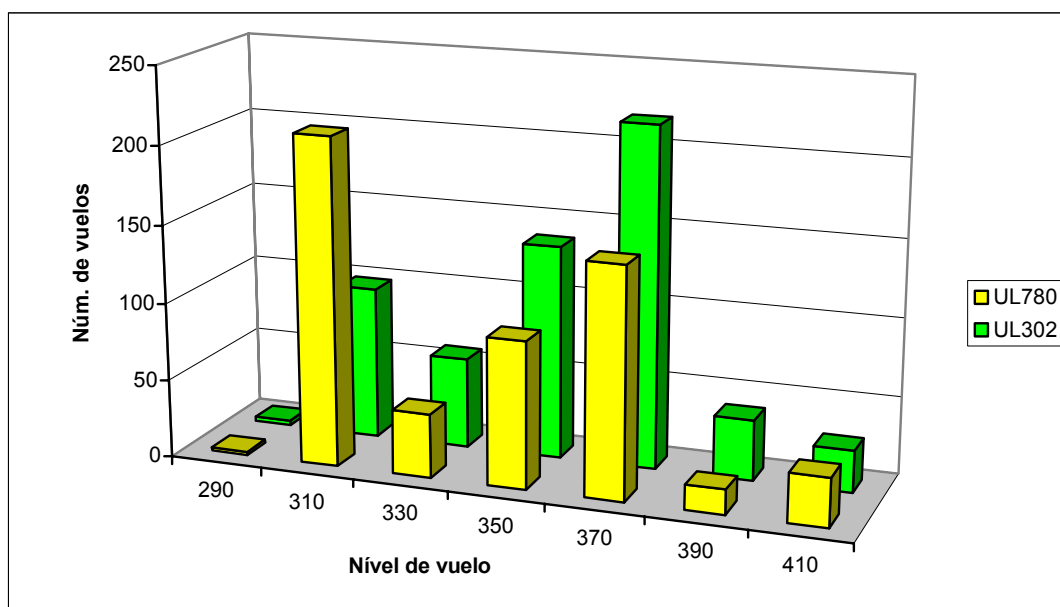


Figura 2.4 Distribución de los Vuelos por Nivel en cada Ruta.

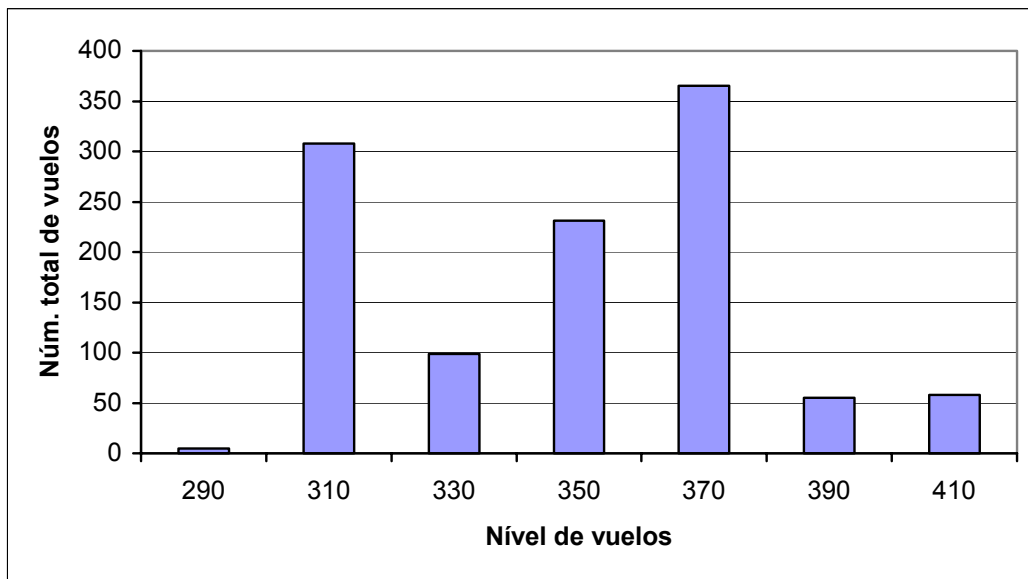


Figura 2.5 Distribución Total de los Vuelos por Nivel.

3. EVALUACIÓN DEL RIESGO DE COLISIÓN LATERAL

3.1 Modelo de Riesgo de Colisión

Existen dos métodos para se determinar si la seguridad del sistema es aceptable:

- Comparación con un sistema de referencia (Método relativo), y
- Evaluación del riesgo del sistema en función de un riesgo máximo tolerable (Método absoluto).

El método del sistema de referencia compara la performance estimada del sistema propuesto con la performance de un sistema que ya tenga sido juzgado como siendo de aceptable seguridad. Si la performance del sistema propuesto es mayor, o por lo menos no peor en todos los os aspectos relativos a seguridad del sistema de referencia, entonces el sistema propuesto puede también ser considerado como siendo un sistema de seguridad aceptable. El método de comparación con un sistema de referencia es también llamado de “Método Relativo”. Ese método no será objeto de estudio en ese trabajo.

El método absoluto consiste en estimar el riesgo de colisión del sistema y comparar con un riesgo de colisión máximo tolerable predeterminado. Si el riesgo estimado fuera menor que el riesgo máximo tolerable, y esperado que permanezca por todo el tiempo de vida del nuevo sistema, entonces el sistema propuesto puede ser considerado como siendo de seguridad aceptable. Ese proceso de evaluación de riesgo involucra la construcción de modelos matemáticos que utilizan informaciones detalladas respecto al sistema para estimar el riesgo de colisión.

Entre esos modelos, el Modelo de Reich viene siendo utilizado por organizaciones responsables por la implementación de conceptos como RNP y RVSM, para evaluar el riesgo de colisión como función de un riesgo máximo tolerable.

3.2. Modelo de Riesgo de Colisión Lateral

El riesgo de colisión a ser modelado es debido a la pérdida de separación lateral entre aeronaves en rutas paralelas, volando en la misma altitud (nivel de vuelo).

El modelo de riesgo de colisión, aplicado al sistema de rutas paralelas, tiene la siguiente fórmula [RGCSP/10-WP/22⁷, RGCSP-WG/A-IP/17⁸, APAC-S 95/13⁹ apud ARINC¹¹ y 10]:

$$N_{ay} = P_y(S_y)P_z(0)\frac{\lambda_x}{\tilde{S}_x}\left[E_y(mismo)\left\{\frac{|\Delta V|}{2\lambda_x} + \frac{|\dot{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\dot{z}|}{2\lambda_z}\right\} + E_y(opuesto)\left\{\frac{2|\dot{V}|}{2\lambda_x} + \frac{|\dot{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\dot{z}|}{2\lambda_z}\right\}\right], \quad (3.2.1)$$

donde

N_{ay} el número esperado de accidentes de aeronaves por hora de vuelo;

S_y la separación lateral establecida;

$P_y(S_y)$ la probabilidad de superposición lateral de aeronaves volando nominalmente en rutas adyacentes;

$P_z(0)$ la probabilidad de superposición vertical de aeronaves volando nominalmente en el mismo nivel de vuelo;

- λ_x la longitud medio de una aeronave;
 λ_y la anchura media de una aeronave;
 λ_z la altura media de una aeronave;
 $\tilde{S}_x$ un parámetro usado no cálculo de valores de ocupación lateral, E_y ;
 $E_y(mismo)$ número medio de aeronaves volando en rutas adyacentes, en lo mismo sentido, en lo mismo nivel de vuelo dentro de segmentos de longitud $2\tilde{S}_x$ con centro en la aeronave típica;
 $E_y(opuesto)$ número medio de aeronaves volando en rutas adyacentes, en sentidos opuestos, en el mismo nivel de vuelo dentro de segmentos de longitud $2\tilde{S}_x$ con centro en la aeronave típica;
 $|\overline{\Delta V}|$ la velocidad relativa media al longo da ruta entre dos aeronaves volando en lo mismo nivel de vuelo, en lo mismo sentido;
 $|\overline{V}|$ la velocidad media respecto al suelo de una aeronave;
 $|\overline{\dot{y}}|$ la velocidad relativa media de cruzamiento entre aeronaves que perdieron S_y MN de separación;
 $|\overline{\dot{z}}|$ la velocidad relativa vertical media de aeronaves volando en el mismo nivel de vuelo.

El modelo arriba está basado en las siguientes hipótesis:

1. Las rutas son paralelas con um espaciamiento constante S_y ;
2. Todas las colisiones ocurren entre aeronaves en rutas adyacentes;
3. Los tiempos de entrada en el sistema de rutas son no-correlacionados;
4. Las desviaciones laterales de las aeronaves en rutas adyacentes son no-correlacionadas;
5. La velocidad lateral de una aeronave es no-correlacionada con su desviación lateral;
6. No hay acciones correctivas por parte de los pilotos o controladores de tránsito aéreo cuando las aeronaves están por colidir; y
7. En el modelo de riesgo de colisión, las aeronaves son representadas por cajas rectangulares.

El modelo dado por la ecuación (3.2.1) fue usado para evaluar el riesgo de colisión lateral para las rutas paralelas dentro del espacio aéreo RNP10, pero con una modificación: no hay tráfico en sentido opuesto en el mismo nivel de vuelo en las rutas adyacentes. Por tanto, el modelo de riesgo de colisión lateral para las rutas UL780 y UL320 toma la siguiente forma:



Figura 3.2.1 Sistema de Rutas UL302 y UL780.

$$N_{ay} = [P_y(S_y)E_y(mismo)] \times P_z(0) \frac{\lambda_x}{S_x} \left\{ \frac{|\Delta V|}{2\lambda_x} + \frac{|\dot{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\dot{z}|}{2\lambda_z} \right\}. \quad (3.2.2)$$

3.3 Probabilidad de Superposición Lateral

La probabilidad de superposición lateral de aeronaves volando nominalmente en rutas adyacentes separadas por S_y es definida por:

$$P_y(S_y) = \int_{-\lambda_y}^{\lambda_y} f^{y_{12}}(y) dy, \quad (3.3.1)$$

donde

$$y_{12} = S_y + y_1 - y_2, \quad (3.3.2)$$

$$f^{y_{12}}(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f^y(y_1) f^y(S_y + y_1 - y) dy_1, \quad (3.3.3)$$

donde

$f^{y_{12}}(y)$ es la densidad de probabilidad de la distancia lateral y_{12} entre dos aeronaves con desviaciones de navegación y_1 e y_2 , nominalmente separadas por S_y .

La ecuación (3.3.3) asume que las desviaciones laterales son independientes y tienen la misma densidad de probabilidad $f^y(y_1)$.

De (3.3.3) en (3.3.1) viene:

$$P_y(S_y) = \int_{-\lambda_y}^{\lambda_y} \int_{-\infty}^{\infty} f^y(y_1) f^y(S_y + y_1 - y) dy_1 dy. \quad (3.3.4)$$

En la práctica, (3.3.4) puede ser aproximada por:

$$P_y(S_y) \approx 2\lambda_y \int_{-\infty}^{\infty} f^y(y_1) f^y(S_y + y_1) dy_1 \quad (3.3.5)$$

o

$$P_y(S_y) \approx 2\lambda_y f^{y_{12}}(0). \quad (3.3.6)$$

Sigue de las ecuaciones arriba que a densidad de probabilidad $f^y(y_1)$ de las desviaciones laterales de navegación de las aeronaves puede ser usada para calcular la probabilidad de superposición lateral $P_y(S_y)$. Esa densidad de probabilidad depende, en primer lugar, de la capacidad de navegación de las aeronaves, como especificado por el tipo de RNP del espacio aéreo. Pero eso no determina completamente la densidad $f^y(y_1)$. En particular, pueden existir algunos errores raros de navegación no-nominal que no son cubiertos por lo tipo RNP y cuyo potencial de ocurrencia puede tener un efecto significativo sobre el riesgo de colisión en el espacio aéreo. Por lo tanto, la naturaleza de los errores laterales de navegación y su impacto sobre el modelo de su distribución de probabilidad necesitan ser tratados.

Hay dos aproximaciones básicas para el modelo de la distribución de probabilidad de los errores laterales de navegación que pueden ser llamadas una “base global” e una “base individual”.

El modelo de los errores laterales de navegación en base global significa que es asumido que todos los errores laterales o desviaciones siguen la misma distribución de probabilidad. Esa distribución puede entonces ser determinada con base en una muestra de datos, describiendo las desviaciones laterales de aeronaves de sus rutas. Una muestra mucho grande de datos es necesaria para ser posible modelar los datos de desviaciones laterales. En particular, es importante evitar subestimar la cola de la distribución, o sea, la probabilidad de errores “grandes” o “groseros”, una vez que la estimativa del riesgo lateral es sensible aquella parte de la distribución. En la práctica, la mezcla de las dos distribuciones es frecuentemente usada, donde una distribución describe el cerne del desempeño y la otra, la cola o las desviaciones “groseras” del desempeño. A fin de tornar la mezcla de distribuciones conservativa, la distribución de la cola es tomada como una distribución exponencial Doble. (La distribución exponencial Doble es conocida por su cola relativamente espesa). Como establecido en Referencia 9, una distribución Doble Doble Exponencial fue usada para la análisis de riesgo de colisión lateral.

La Tabla 3.3.1 muestra los diversos tipos de desviaciones laterales de navegación.

Tabla 3.3.1 Definición de Tipos de Errores Laterales de Navegación

Clase de Error	Descripción	Ejemplo
A	Cometido por aeronave no aprobada para operación RNP10.	
B	Error del circuito de comunicación piloto/ ATC.	Piloto entendiendo mal el mensaje de autorización o ATC emitiendo autorización incorrecta.
C1	Error de control de equipo, englobando operación incorrecta del FMS o sistema de navegación.	Piloto operando incorrectamente el equipo de navegación.
C2	Transcripción incorrecta de la autorización del ATC o re-autorización en el FMS.	
C3	Información errada transcrita en el FMS.	Seguido el plan de vuelo en vez de la autorización del ATC. Autorización original seguida en vez de la re-autorización.
D ¹	Otro con falla notificada al ATC en tiempo para acción.	
E ¹	Otro con falla notificada al ATC mucho tarde para acción.	
F ¹	Otro con falla no notificada o no recibida por lo ATC.	

Nota: ¹ Errores e las clases D, E y F son primariamente debidos a la falla del equipo.

La aproximación para el modelo de desempeño lateral de navegación en la base individual significa que, para cada tipo individual de error de navegación, una distribución de probabilidad apropiada de las desviaciones laterales asociada con el error es determinada primeramente. Subsecuentemente, una distribución global de las desviaciones laterales de ruta es establecida tomando una mezcla ponderada de las distribuciones individuales de desviaciones. Los factores de ponderación son determinados por las frecuencias con que los diferentes tipos de errores ocurren. Siguiendo esa aproximación, puede ser posible aproximar o limitar la distribución mezclada resultante por alguna distribución más simple sin afectar adversamente la credibilidad de la superposición lateral. Esa aproximación ha sido usada para la evaluación del riesgo de colisión lateral [11, 12, 13].

Considere, por lo tanto, la aproximación en la base global. Primero, eso requiere que el tipo de densidad de probabilidad sea especificado. Cuando es hecha una distinción entre un desempeño nominal y no-nominal, o entre desviaciones normales y groseras, la densidad de probabilidad global puede ser tomada como una mezcla de dos densidades componentes, o sea,

$$f^y(y_1) = (1 - \alpha)f_{norm}^y(y_1) + \alpha f_{gross}^y(y_1), \quad (3.3.7)$$

donde

$f_{norm}^y(y_1)$ se refiere a las desviaciones normales especificadas con base en el tipo RNP para el espacio aéreo;

$f_{gross}^y(y_1)$ se refiere a las desviaciones de magnitudes mayores que los valores del RNP, y con forma de distribución diferente (desviaciones raras);

α Proporción de ocurrencia de las desviaciones raras ($\sim 5\%$)

y

$$f_{norm}^y(y_1) = \frac{1}{2a_1} e^{-\frac{|y_1|}{a_1}}, \quad \text{donde } a_1 \text{ es el parámetro de escala} \quad (3.3.8)$$

Con

$$\int_{-10}^{10} f_{norm}^y(y_1) dy_1 = 0,95, \quad (3.3.9)$$

se obtiene:

$$a_1 = 3,33808,$$

$$f_{gross}^y(y_1) = \frac{1}{2a_2} e^{-\frac{|y_1|}{a_2}}, \quad \text{donde } a_2, \text{ como } a_1 \text{ (casos raros),} \quad (3.3.10)$$

$$f^y(y_1) = \frac{(1 - \alpha)}{2a_1} e^{-\frac{|y_1|}{a_1}} + \frac{\alpha}{2a_2} e^{-\frac{|y_1|}{a_2}}. \quad (3.3.11)$$

Sustituyendo la ecuación (3.3.11) en la ecuación (3.3.5) e, después efectuar la integración, se tiene, finalmente, la ecuación de la probabilidad de superposición lateral:

$$P_y(S_y) \approx 2\lambda_y \left\{ \left(\frac{1-\alpha}{2a_1} \right)^2 (a_1 + S_y) e^{\frac{|S_y|}{a_1}} + \left(\frac{\alpha}{2a_2} \right)^2 (a_2 + S_y) e^{\frac{|S_y|}{a_2}} + \frac{\alpha(1-\alpha)}{2} \left[\frac{1}{a_1 + a_2} \left(e^{\frac{-S_y}{a_1}} + e^{\frac{-S_y}{a_2}} \right) + \frac{1}{a_1 - a_2} \left(e^{\frac{-S_y}{a_1}} - e^{\frac{-S_y}{a_2}} \right) \right] \right\}. \quad (3.3.12)$$

3.3.1 Estimativa del Factor α

El factor de ponderación α dentro del modelo de distribución de probabilidad mezclada Doble Doble Exponencial para desviaciones laterales de navegación puede ser interpretado como la proporción de tiempo de vuelo, durante el cual la distribución de probabilidad de las desviaciones laterales es caracterizada por el factor de escala a_2 (o, equivalentemente, la desviación padrón σ_2) en vez de a_1 . Como la distribución de desviaciones groseras representa desempeño lateral de navegación atípico resultante de alguno tipo de anomalía, α puede ser interpretado como la proporción de aeronaves experimentando tales anomalías o como la probabilidad de una aeronave individual experimentando una anomalía, resultando en su distribución de desviaciones el factor de escala a_2 .

En la hipótesis de que los controladores de tránsito aéreo, o la tripulación de vuelo, sean capaces de detectar y reportar anomalías laterales de navegación, el parámetro α puede ser estimado como la proporción de vuelos o aeronaves donde una anomalía ocurrió. Debido a la naturaleza aleatoria de la ocurrencia de tales anomalías, es necesario suplementar la estimativa por un intervalo de confianza, particularmente, un límite superior de confianza. El intervalo de confianza representa el incertidumbre de la estimativa puntual en relación al verdadero valor de α .

Para una análisis subsecuente, será usado el símbolo p en vez de α para la probabilidad pertinente, para evitar confusión con el uso común de ese símbolo en la denotación de niveles de confianza $1-\alpha$.

El nivel de confianza para p puede ser determinado por medio de la distribución binomial para o número de aeronaves X , experimentando una anomalía lateral de navegación como descrito arriba durante un cierto período de monitoreo, o sea, en un dado número de vuelos n . La probabilidad de que k desviaciones vengan a ocurrir en n observaciones independientes es dada por,

$$P(X = k) = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{(n-k)}, \quad k = 0, 1, \dots, n. \quad (3.3.13)$$

Basado en la interpretación práctica, el límite superior de confianza p_U puede ser determinado directamente de

$$P(X \geq 1 | p = p_U) = 1 - P(X = 0 | p = p_U) = 1 - \alpha, \quad (3.3.14)$$

donde

$$(1 - p_U)^n = \alpha \quad (3.3.15)$$

o

$$p_U = 1 - \alpha^{1/n} \quad (3.3.16)$$

La muestra recopilada del corredor Santiago–Lima fue de apenas un mes, generando un $n = 1142$ aeronaves observadas. Esa muestra es pequeña para una análisis de eventos raros, como es el caso de las grandes desviaciones laterales.

Por lo tanto, se resolvió extrapolar el valor de un mes para 19 meses, resultando en un número de observaciones, $n = 22255$ [11]. Con este valor de n , la ecuación (3.3.16) ha dado $p_U = 1,346 \times 10^{-4}$ para $\alpha = 0,05$ y es exactamente un limite superior de intervalo de confianza de 95% para $k = 1$. Por lo tanto, este valor será usado en la Distribución Mezclada de Probabilidad Doble Doble Exponencial para las desviaciones laterales. Por lo tanto, el valor de $\alpha = 1,346 \times 10^{-4}$ será utilizado en la ecuación (3.3.12).

3.4 Ocupación Lateral

El concepto de ocupación es aplicable tanto para separación vertical como lateral. En el caso de ocupación vertical, el concepto es aplicado entre aeronaves volando en la misma ruta en niveles de vuelo adyacentes con separación vertical padrón. En el caso de ocupación lateral, los requisitos para el uso de ese concepto son establecidos en el párrafo 1.1 del Apéndice C de la Referencia 10, que define la ocupación lateral en el mismo sentido ($E_y(\text{mismo})$) para una separación padrón simples entre rutas paralelas, como el número medio de aeronaves que obedecen a las restricciones siguientes, relativamente a una aeronave típica:

- i- Vuelan en el mismo sentido que esta aeronave;
- ii- Vuelan, nominalmente, en una ruta paralela adyacente, con separación padrón simples de la ruta de esta aeronave;
- iii- Vuelan, nominalmente, en el mismo nivel que esta aeronave y;
- iv- Vuelan dentro de un segmento longitudinal centrado en la aeronave típica

Del mismo modo pódese tener la ocupación lateral en el sentido opuesto ($E_y(\text{opuesto})$), en ese caso solamente la restricción (i) debe ser modificada, eso es, las aeronaves vuelan en sentidos opuestos.

Hay dos métodos para se estimar la ocupación en un sistema de rutas:

- 1- **Método estado estacionario** (“steady state”): este método considera que el flujo de tránsito aéreo al longo de las rutas es estadísticamente constante durante el período considerado. Él es usado se existen solamente datos diarios de tráfico aéreo, o cuando la estimativa del tiempo de pasaje por el punto no contiene datos en grandes bloques de tiempo, y
- 2- **Método directo - tiempo de pasaje por el punto**: este método, probablemente, es lo método más preciso de la ocupación, siendo la técnica preferida en la verificación de la ocupación después del cambio en el sistema.

En seguida será mostrado el desarrollo de la obtención de la ocupación lateral en el mismo sentido $E_y(\text{mismo})$, usando el método directo.

3.4.1 Método Directo – Tiempo de Pasaje por el Punto

Este método es la manera práctica de se obtener la ocupación de los datos de vuelo fornecidos en los puntos escogidos para ese fin. Dado un sistema donde la velocidad media es V y lo espaciamento entre aeronaves es regido por el número Mach y vale S_x , el método permite obtener la ocupación, usando directamente los datos fornecidos en los puntos, se en una ruta adyacente en el mismo nivel existir aeronaves volando dentro del espacio longitudinal $2S_x$ centrado en la aeronave en estudio. Como ilustración, ver la Figura 3.1 para dos rutas genéricas adyacentes y mismo nivel. En ese caso, la ocupación está relacionada a otras dos cantidades por la fórmula

$$E_y(mismo) = \frac{2T_y}{H}, \quad (3.4.1)$$

donde, T_y es lo tiempo total de proximidad que ocurre en el sistema, eso es, el tiempo total en que pares de aeronaves vuelan en rutas adyacentes en el mismo nivel, dentro de una distancia longitudinal S_x una de la otra; H es el número total de horas de vuelo de las aeronaves en el sistema en el período considerado.

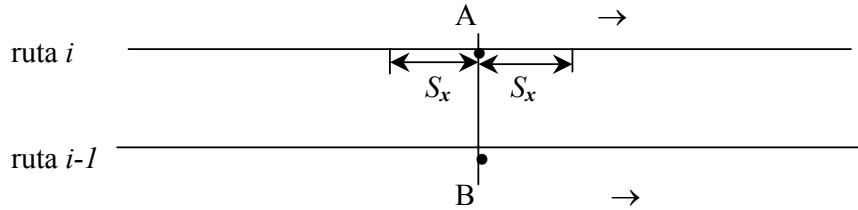


Figura 3.4.1 Ilustración de la Ocupación Lateral por lo Método Directo

El método directo permite evaluar la ecuación (3.4.1), usando la contabilidad en puntos determinados. Usando la Figura 3.4.1 como ilustración, el tiempo que una aeronave lleva para viajar un espacio longitudinal S_x es dado por

$$t = \frac{S_x}{V}. \quad (3.4.2)$$

Fijando una aeronave en la ruta i que pasó en el punto A en el tiempo t_A , todas las aeronaves que viajaron en la ruta adyacente $i-1$ y pasaron por el punto B de esa ruta (B y A están en un mismo plano perpendicular a las rutas en estudio) en un tiempo t_B tal que

$$|t_A - t_B| \leq t, \quad (3.4.3)$$

estarán volando dentro de un espacio longitudinal $S \leq S_x$ de la aeronave en estudio. Por lo tanto, basta contar esas aeronaves en ruta $i-1$, en todos los niveles.

Este esquema vale para aeronaves volando en el mismo sentido o en sentido opuesto. Solamente la contabilidad debe ser acumulada, separadamente, en contadores diferentes. Hecha la contabilidad en todas las rutas y niveles, multiplica-se cada resultado por 2 y se divide el resultado obtenido por el número total de aeronaves que volaron en el período

considerado, obteniéndose las respectivas ocupaciones, $E_y(mismo)$ y/o $E_y(opuesto)$. La ecuación (3.4.1) para la ocupación lateral en el mismo sentido se queda dada por

$$E_y = \frac{2n_y}{n}, \quad (3.4.4)$$

donde n_y es el número de pares de aeronaves y n es el número total de aeronaves que pasaron en el sistema durante el tiempo de observación.

3.4.2 Cálculo de la Ocupación en las Rutas UL780 y UL302 del Corredor Santiago–Lima

El concepto de ocupación discutido anteriormente fue usado en la evaluación del riesgo de colisión lateral para la implantación de la RNP10 en las rutas UL780 y UL302.

Para el cálculo de la ocupación fue establecido que la región de interés sería aquella comprendida entre los puntos de notificación ATEDA y SULNA, situados en la FIR Santiago, y ILMAR y MOXES, situados en la FIR Lima. La Figura 2.1 presenta la posición relativa de esos puntos y la Tabla 2.1 sus coordenadas.

El espacio longitudinal comprendido entre los puntos SULNA y MOXES, en la ruta UL780, es de 839 MN y entre los puntos ATEDA y ILMAR, en la ruta UL302, es 826 MN. Esta diferencia, 13 MN, corresponde a un tiempo de vuelo de aproximadamente 1,7 minuto a una velocidad media de 455 nudos.

La estimativa de la ocupación fue hecha con el método directo. Los puntos utilizados fueron SORTA en la ruta UL780 y IREMI en la ruta UL302. Esos puntos están localizados en la misma latitud y, por lo tanto, en una misma perpendicular a las rutas en estudio. El espacio de tiempo utilizado fue obtenido considerando un intervalo longitudinal padrón (S_x) entre las aeronaves de 80 millas náuticas (MN) y una velocidad media de 480 nudos, que resulta en 10 minutos de vuelo. Los niveles considerados fueron los comprendidos entre los niveles FL290 y FL410.

Los datos utilizados fueron obtenidos de una muestra colectada entre los días 1 y 31 de diciembre de 2002 por las unidades ATS del espacio aéreo de las FIR Santiago y Lima. Antes de obtener la ocupación, fue hecha una verificación detallada de los datos enviados y algunas observaciones deben ser hechas a ese respecto:

- i- Los datos no fueron colectados, específicamente, para la análisis RNP;
- ii- Mismo después de exhaustiva depuración, los datos aún presentan inconsistencias, que mismo sin comprometer la evaluación del riesgo por causa de la baja densidad del tráfico aéreo, no permiten una estimativa precisa de la ocupación;
- iii- Algunos datos originan velocidades con similitudes en las casas decimales; eso sugiere estimativa de datos, o sea, que algunos datos pueden no representar la realidad de las rutas.

Con estas observaciones, la estimativa de la ocupación fue hecha considerando la proximidad de las aeronaves en los puntos SORTA y IREMI. Fueron contados los pares de aeronaves que satisfacen la condición de proximidad en espacio de tiempo de 10 minutos y el número total de aeronaves que pasaron en esos puntos durante el tiempo de observación. Este tiempo fue de un mes: 1 a 31 de diciembre de 2002. La velocidad media estimada de la muestra utilizada es de 455 nudos que, se usada en el cálculo del espacio de tiempo, resulta en

10,55 minutos. Este tiempo, prácticamente, no interfiere en los resultados obtenidos para la ocupación por causa de la baja densidad del tráfico aéreo.

Particularmente, en esas rutas no existen aeronaves volando en el mismo nivel con sentidos opuestos. De ese modo, la ocupación lateral en el sentido opuesto $E_y(opuesto)$ es cero. La Tabla 2.2 muestra los sentidos con que las aeronaves vuelan en las rutas UL780 y UL302.

La Tabla 3.4.1 presenta un sumario de las contabilidades realizadas, o sea, de los pares identificados. En esta tabla son mostrados los días en que se tuvo proximidades, los niveles y los pares formados. La ocupación ocurre, principalmente, en el medio del mes, en los niveles intermedios de las rutas.

El número total de aeronaves en la muestra utilizada fue 1142 y la ocupación lateral en el mismo sentido, $E_y(mismo)$, fue calculada por la ecuación (3.4.4)

$$E_y(mismo) = \frac{2 \times 16}{1142} = 0,0280.$$

Tabla 3.4.1 Sumario de la Ocupación Obtenida de los Datos de las FIR Santiago y Lima

Día	Nivel	Número de Pares	Tipos Aeronaves	ΔV (nudos)
Sentido Lima→Santiago				
7	290	1	B763 x B762	25
14	370	1	B763 x B762	29
15	370	1	B763 x B763	10
16	370	1	B763 x B737	18
17	330	1	B763 x B763	2
27	370	1	B763 x B763	10
28	370	1	B763 x B763	10
31	370	1	B763 x B763	9
Sentido Santiago→Lima				
10	350	1	B762 x B763	1
14	310	1	B742 x B763	33
16	350	1	A343 x B763	1
17	350	1	B762 x B763	1
18	310	1	DC10 x B742	1
19	310	1	B763 x B763	7
20	350	1	A320 x B763	1
24	350	1	B763 x B763	18
Total	pares = 16		ΔV (medio) = 11 nudos	

Como puede ser visto, el valor de la ocupación (0,0280) entre las rutas UL780 y UL302 es bajo. Para comparación, este mismo parámetro obtenido en los estudios para implementación de la RNP10 en la región SAT [11], que también es una región oceánica, se quedó en 0,2562. La densidad del tráfico aéreo en el corredor SAT, 60 vuelos por día, es aproximadamente el

doblo del corredor Santiago–Lima, cerca de 37 vuelos por día. La grande diferencia en la ocupación, diez veces menor en el corredor Santiago–Lima, viene del hecho que en ese corredor el tráfico aéreo es más distribuido al longo del día (ver Figura 2.2), no causando proximidad, al paso que, en el corredor SAT, el tráfico ocurre en grandes bloques y en períodos bien definidos, lo que origina muchas proximidades en esos períodos en que los bloques se mueven.

Esta baja ocupación también puede ser inferida de la Figura 2.3, que muestra el número medio de vuelos en los puntos IREMI y SORTA, en cada hora del día, extraído de los datos colectados entre 1 y 31 días de diciembre de 2002, en los sentidos Santiago–Lima y Lima–Santiago. Puede ser visto que, en la mayor parte del día, la media horaria queda bajo de 2 aeronaves/hora, que es el límite para que ocurra proximidad. Además, en ese gráfico están representados 3 pares de niveles para el sentido Santiago–Lima y 4 pares de niveles para el sentido Lima–Santiago (ver Tabla 2.2); entonces, los números presentados deberían aún ser divididos por el respectivo número de pares, lo que torna la proximidad aún más improbable. Los puntos de máximo tráfico ocurren entre 4 y 5 horas en el sentido Santiago–Lima y entre 10 y 11 horas en el sentido Lima–Santiago.

Con estas consideraciones, la ocupación debe ser el parámetro usado en el modelo de Reich, visto que no hay pasajes en el mismo nivel en el corredor, para la estimativa del riesgo de colisión y implantación de la RNP10 en las rutas UL780 y UL302, en el tramo considerado.

Paralelamente a la verificación de la ocupación, puede ser obtenida la velocidad relativa entre los pares identificados y, de esa forma, obtenerse una velocidad relativa media ΔV entre esos pares. En la muestra utilizada el valor medio obtenido para ΔV fue 11 nudos.

3.4.3 Simulación del Crecimiento de la Ocupación Lateral en el Corredor Santiago–Lima

La simulación de la influencia del crecimiento del tráfico aéreo en la ocupación, usando el método directo, tiempo de pasaje por el punto, es inmediata, visto que esos parámetros son obtenidos por contabilidad de aeronaves que pasan en un espacio de tiempo $|t_A - t_B| < t$, en puntos determinados. Considerando que no hay alteración de la velocidad media y ni en el tipo de ocupación, eso es, solamente hay ocupación en el mismo sentido, el crecimiento puede ser simulado directamente por la fórmula

$$E_y^*(mismo) = (1 + r)^t E_y(mismo). \quad (3.4.5)$$

El crecimiento de la ocupación en el corredor Santiago–Lima fue basado en tres tasas: 2, 4 y 6% al año. El año base para el inicio de los cálculos fue 2002 debido al facto que los datos disponibles son de diciembre de aquello año. La evaluación fue hecha para el intervalo de tiempo de 10 anos, hasta diciembre de 2012. La Tabla 3.4.2 muestra los resultados para la ocupación. La columna con RVSM é una proyección, considerando la introducción de la RVSM en ese corredor a partir de 2005. En ese caso, fue usada una reducción simples de 15%, después el incremento da ocupación.

Tabla 3.4.2 Proyección del Crecimiento de la Ocupación Lateral en el Corredor Santiago–Lima.

Tasa (% año)	2		4		6	
Año	Sin RVSM	Con RVSM	Sin RVSM	Con RVSM	Sin RVSM	Con RVSM
2002	$E_y = 0,0280$ (referencia)					
2003	0,0286	--	0,0291	--	0,0297	--
2004	0,0291	--	0,0303	--	0,0315	--
2005	0,0297	0,0252	0,0315	0,0268	0,0333	0,0283
2006	0,0303	0,0258	0,0328	0,0278	0,0353	0,0300
2007	0,0309	0,0263	0,0341	0,0290	0,0375	0,0318
2008	0,0315	0,0268	0,0354	0,0301	0,0397	0,0338
2009	0,0322	0,0273	0,0368	0,0313	0,0421	0,0358
2010	0,0328	0,0277	0,03832	0,0326	0,0446	0,0379
2011	0,0335	0,0284	0,0399	0,0338	0,0473	0,0402
2012	0,0341	0,0286	0,0414	0,0352	0,0501	0,0426

Como puede ser visto, la ocupación se quedará en niveles bajos, mismo para un crecimiento del tráfico aéreo de 6 % al año y, de ese punto de vista, el riesgo no deberá cambiar significativamente. Las Figuras 3.4.2 y 3.4.3 muestran el crecimiento de la ocupación lateral en un horizonte de 10 años.

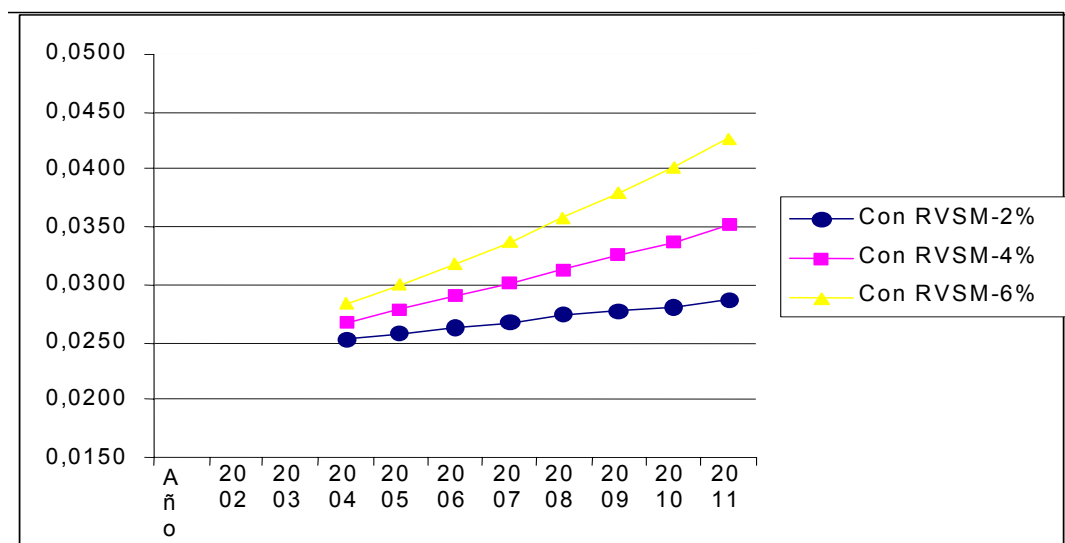


Figura 3.4.2 Proyección del Crecimiento de la Ocupación Lateral – RVSM en 2005.

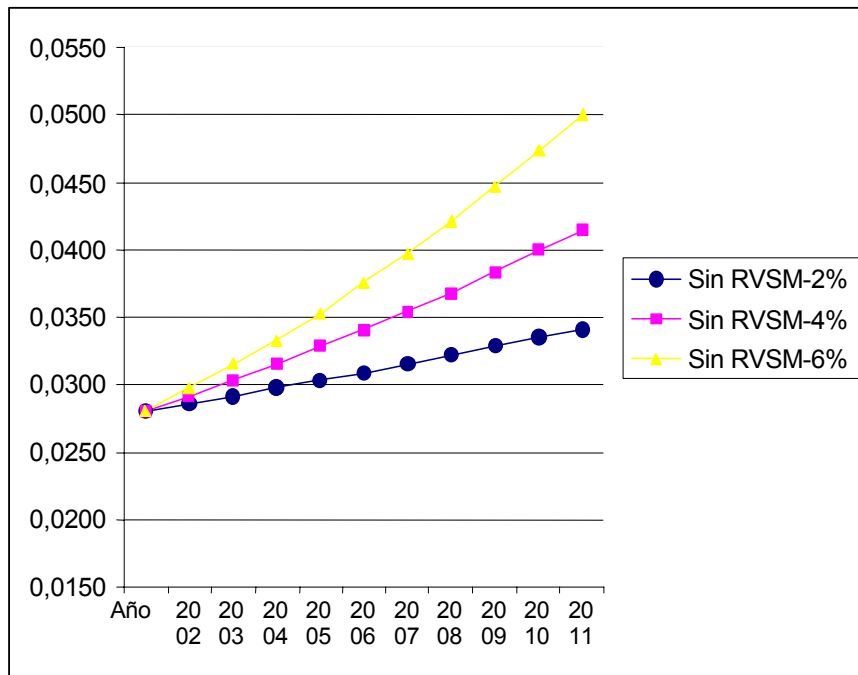


Figura 3.4.3 Proyección del Crecimiento de la Ocupación Lateral –sin RVSM.

3.4.4 Comentario Final sobre la Ocupación

La estimativa de la ocupación lateral por lo método directo es un procedimiento relativamente simples, pero que depende fuertemente de la muestra, o sea, de los datos. Los datos utilizados en la análisis de ese parámetro en el corredor oceánico ubicado en las FIR Santiago y Lima, comprendido por las rutas UL780 y UL302, presentan inconsistencias, visto que fue verificada una serie de coincidencias de velocidades que no ocurre en la realidad.

Cálculos más precisos para la ocupación exigen una mayor precisión en los tiempos reportados. Para un espacio de 10 minutos, una diferencia de tiempo de ± 1 minuto reportada para una misma aeronave en el mismo punto, corresponde a un error de $\pm 10\%$ en el espacio para lo cálculo de la ocupación que, en termos absolutos, no es sin valor. En el caso del corredor analizado, estas diferencias no deben introducir errores importantes; eso puede no ser verdad en el caso de corredores densamente utilizados. Por lo tanto, debe ser hecho un entrenamiento del personal involucrado en la colecta de datos para que esos sean obtenidos con alta confiabilidad.

La ocupación estimada, 0.0280, es baja y refleja la distribución del tráfico, como mostrado en las Figuras 2.2 y 2.3, por todo el día.

3.5 Probabilidad de Superposición Vertical, $P_z(0)$

La probabilidad de superposición vertical de un par de aeronaves nominalmente volando en niveles de vuelo adyacentes separados por S_z es denotada por $P_z(0)$. Es definida por

$$P_z(0) = \int_{-\lambda_z}^{\lambda_z} f^{z_{12}}(z) dz, \quad (3.5.1)$$

donde $f^{z_{12}}$ denota la densidad de probabilidad de la distancia z_{12} entre dos aeronaves. Esta distancia puede ser definida como

$$z_{12} = S_z + z_1 - z_2, \quad (3.5.2)$$

con z_1 e z_2 representando las desviaciones de altura de las dos aeronaves. Las desviaciones de altura de aeronaves son normalmente definidas en termos del Error Vertical Total (TVE) donde

$$TVE = \text{altitud real de presión volada por una aeronave} - \text{altitud designada} \quad (3.5.3)$$

(medida en pies). Notase que, cuando la separación vertical es establecida correctamente, eso es, designada pelo ATC como S_z y volada por la aeronave, la ecuación (3.5.2) da la expresión correcta para la distancia vertical, en el sentido que el valor nominal de z_{12} es S_z . Cuando la separación vertical no fue correctamente establecida, el valor nominal de z_{12} normalmente no será igual a S_z .

Asumiendo que las desviaciones de altura de las dos aeronaves sean independientes y denotando su densidad de probabilidad por $f_1^{TVE}(z_1)$ e $f_2^{TVE}(z_2)$, la densidad de probabilidad $f^{z_{12}}(z)$ y la probabilidad de superposición vertical puede ser escrita como

$$f^{z_{12}}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1^{TVE}(z_1) f_2^{TVE}(S_z + z_1 - z) dz_1 \quad (3.5.4)$$

y

$$P_z(0) = \int_{-\lambda_z}^{\lambda_z} \int_{-\infty}^{\infty} f_1^{TVE}(z_1) f_2^{TVE}(S_z + z_1 - z) dz_1. \quad (3.5.5)$$

En la práctica, $P_z(S_z)$ puede ser aproximada por

$$P_z(0) \approx 2\lambda_z \int_{-\infty}^{\infty} f_1^{TVE}(z_1) f_2^{TVE}(S_z + z_1) dz_1 \quad (3.5.6)$$

o

$$P_z(0) \approx 2\lambda_z f^{z_{12}}(0). \quad (3.5.7)$$

Por lo tanto, para calcular la probabilidad de superposición vertical es necesario la densidad de probabilidad $f^{TVE}(z)$ de las desviaciones de altura de la aeronave.

La distribución de probabilidad de las desviaciones de altura depende, primeramente, de las características de mantenimiento de altura de la aeronave como especificado por las MASPS. Datos de desempeño de mantenimiento de altura de aeronaves aprobadas por las MASPS pueden ser obtenidos por medio de monitoreo de altura de las aeronaves, como expuesto en la Referencia 18. Como la mayoría de los tipos de aeronaves que vuelan en el corredor Santiago–Lima está también volando en el espacio aéreo Europeo, datos de monitoreo del programa de monitoreo de altura RVSM Europeo fueron usados inicialmente.

La aproximación seguida en las regiones NAT y Europa es basada en los datos de monitoreo de altura disponibles, que consisten de dos componentes de TVE modeladas separadamente: Error del Sistema Altimétrico (ASE) y Error Técnico de Vuelo (FTE). Las desviaciones grandes de altura debido a la turbulencia son incluidas en la distribución de FTE. La distribución de probabilidad de la densidad de probabilidad $f^{TVE}(z)$ puede, entonces, ser obtenida como sigue. Sea

$$TVE = ASE + FTE,$$

donde

$ASE = \text{altura real de presión volada por una aeronave} - \text{altura exhibida},$

$FTE = \text{altura exhibida} - \text{altura designada}$.

Asumiendo que los dos componentes son estadísticamente independientes, la densidad de probabilidad de TVE sigue de

$$f^{TVE}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f^{ASE}(a) f^{TVE}(z-a) da. \quad (3.5.8)$$

En la práctica, FTE es difícil de determinar y es aproximado por la Desviación de Altitud Designada (AAD),

$$AAD = \text{altura informada por el transponder de la aeronave} - \text{altura designada}. \quad (3.5.9)$$

Por lo tanto, la ecuación (3.5.8) es aproximada por

$$f^{TVE}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f^{ASE}(a) f^{AAD}(z-a) da. \quad (3.5.10)$$

Datos sobre AAD pueden ser obtenidos por la evaluación de los datos del archivo modo C. El modelo de densidad de dos componentes es descrito abajo.

3.5.1 Modelo de la Distribución ASE

De acuerdo con la aproximación seguida en las regiones NAT y Europa, una distribución completa de ASE es formada por una mezcla de distribuciones de ASE por tipo de aeronave, eso es,

$$f^{ASE}(a) = \sum_{i=1}^{n_{ig}} \beta_i f_i^{ASE}(a), \quad (3.5.11)$$

donde n_{ig} denota el número de tipos de grupos diferentes de aeronaves, β_i es la proporción de tiempo de vuelo contribuida por el grupo i de tipo de aeronave y $f_i^{ASE}(a)$ es la densidad de probabilidad del ASE del grupo i , $i = 1, \dots, n_{ig}$ de tipos de aeronaves [14, 15].

Tabla 3.5.1 Proporción de Tiempo de Vuelo y Características Preliminares de ASE por Tipo de Grupo de Aeronaves Operando en el Corredor Santiago–Lima.

Tipo de Aeronave	Proporción de Tiempo de Vuelo	Fuente de Datos	Tipo de Densidad de Probabilidad	Parámetros de la Densidad de Probabilidad	
				Media	Desviación Padrón
B763	0,5731258	NAT	DE	-31,89	45,05
A320	0,0920227	NAT	G	52,92	47,91
B742	0,0624946	NAT	DE	-12,72	58,84
B737	0,0613405	NAT			
DC10	0,0565852	NAT	DE	14,32	66,55
A343	0,0500148	NAT			
B762	0,0458964	NAT	DE	-4,04	47,83
MD11	0,0115938	NAT	G	1,05	37,40
A319	0,0081793	NAT			

IL62	0,0070540	NAT			
C750	0,0046739	NAT			
B744	0,0034671	NAT	DE	-23,24	46,25
GLF5	0,0036539	NAT			
B767	0,0025094	NAT	DE	-4,04	47,83
B752	0,0017479	NAT	DE	4,18	40,79
DC9	0,0019539	NAT			
F900	0,0019203	NAT	G	28,81	53,89
GLF4	0,0017719	NAT	DE	-17,64	49,08
MD88	0,0018198	NAT			
A323	0,0009099	NAT			
B722	0,0009578	NAT			
B735	0,0009721	NAT			
B757	0,0008668	NAT			
C17A	0,0008812	NAT			
CL60	0,0008955	NAT	DE	4,14	47,23
G3	0,0008285	NAT			
GLF2	0,0008907	NAT			
GULF	0,0009721	NAT			

Las densidades de probabilidad $f_i^{ASE}(a)$, $i = 1, \dots, n_{ig}$, serán determinadas, basadas en los datos de monitoreo de altura de aeronaves aprobadas de acuerdo con las MASPS.

La Tabla 3.5.1 da resultados preliminares sobre tipos de densidad de probabilidad y valores de parámetros asociados para tipos de aeronaves operando en las rutas UL302 y UL780, con base en los datos de programas de monitoreo de altura en la región NAT [16]. La proporción de tiempo de vuelo fue normalizada para garantizar que la suma de los factores de ponderación β_i sea igual a un.

La media de la densidad ASE $f_i^{ASE}(a)$ es dada por

$$m\{ASE\} = \sum_{i=1}^{n_{ig}} \beta_i m_i, \quad (3.5.12)$$

donde m_i denota la media ASE del i-ésimo tipo de aeronave en la Tabla 3.5.1. La desviación padrón de la densidad ASE agregada, $f_i^{ASE}(a)$, sigue de

$$s^2\{ASE\} = \sum_{i=1}^{n_{ig}} \beta_i s_i^2 + \sum_{i=1}^{n_{ig}} \beta_i m_i^2 - (m\{ASE\})^2, \quad (3.5.13)$$

donde s_i denota la desviación padrón ASE do tipo i, como mostrado en la Tabla 3.5.1. Por lo tanto, la media y la desviación padrón de la densidad ASE completa $f_i^{ASE}(a)$ son -13,62 pies y 59,35 pies, respectivamente.

Las Figuras 3.5.1 e 3.5.2 muestran la resultante completa de la densidad ASE $f_i^{ASE}(a)$ para el corredor Santiago–Lima, con una escala lineal y logarítmica, respectivamente. El último diagrama da una mejor indicación de la cola de la distribución de ASE. Debe ser enfatizado

que esta densidad solamente es válida para la población de aeronaves en el corredor Santiago–Lima, en la hipótesis de que todas las aeronaves sean aprobadas por las MASPS.

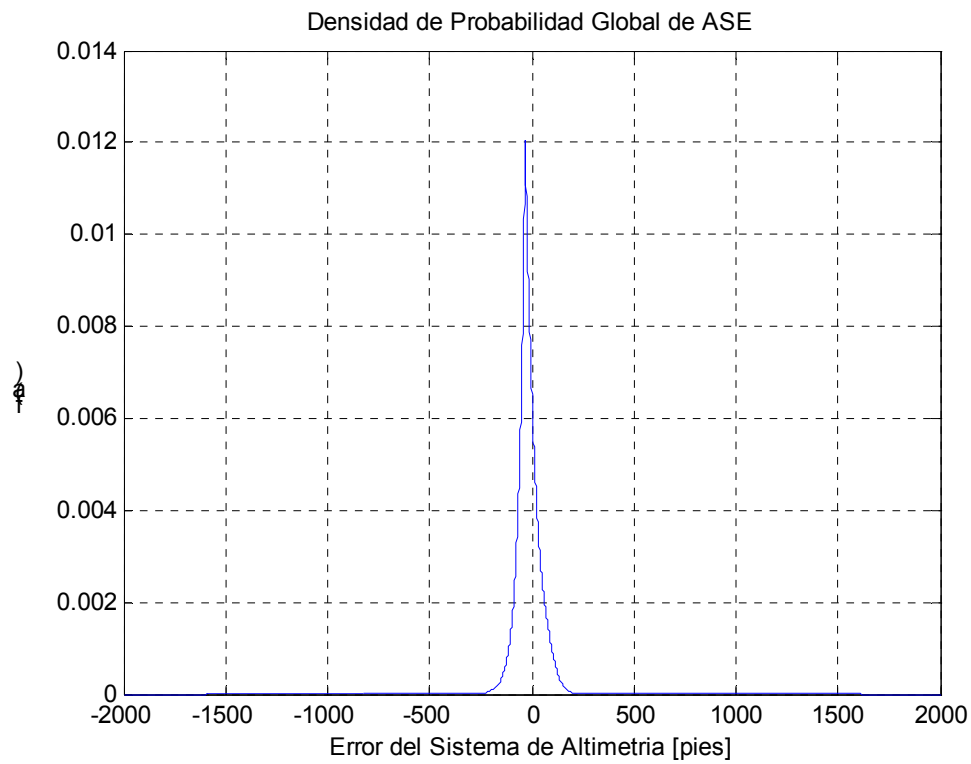


Figura 3.5.1 Densidad ASE Global $f^{ASE}(a)$ para la Población de Aeronaves Aprobadas por las MASPS en el Corredor Santiago–Lima.

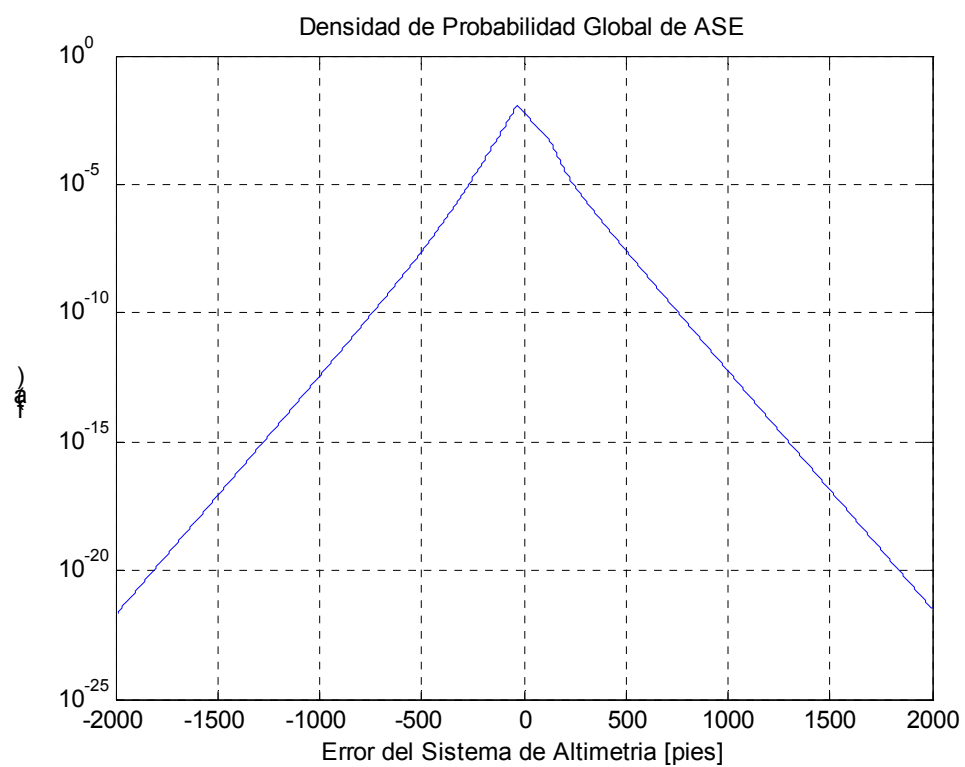


Figura 3.5.2 Densidad ASE Global $f^{ASE}(a)$ para la Población de Aeronaves Aprobadas por las MASPS en el Corredor Santiago–Lima (Escala Logarítmica).

Para se obtener la resultante completa de la densidad ASE $f_i^{ASE}(a)$ para el corredor Santiago–Lima, será necesario desarrollar un formalismo para se hacer la suma ponderada de las distribuciones citadas en la Tabla 3.5.1. Para eso, considere las definiciones:

$f_{DE}^i(x, m_i, s_i)$: la densidad de probabilidad Doble Exponencial del error ASE para la aeronave tipo i

$$f_{DE}^i(x, m_i, s_i) = \frac{1}{2s_i / \sqrt{2}} e^{-\left| \frac{x-m_i}{s_i / \sqrt{2}} \right|} \quad (3.5.14)$$

$f_G^j(x, m_j, s_j)$: la densidad de probabilidad Gaussiana del error ASE para la aeronave tipo j

$$f_G^j(x, m_j, s_j) = \frac{1}{s_j \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-m_j}{s_j} \right)^2} \quad (3.5.15)$$

La densidad de probabilidad total de las aeronaves que exhiben densidad de probabilidad Doble Exponencial para el error ASE es dada por:

$$f_{DE}^{ASE}(x) = \sum_{i=1}^{N_{DE}} \beta_i f_{DE}^i(x, m_i, s_i) \quad (3.5.16)$$

donde N_{DE} es el número total de aeronaves que exhiben densidad de probabilidad Doble Exponencial para el error ASE.

Igualmente, la densidad de probabilidad total de las aeronaves que exhiben densidad de probabilidad Gaussiana para el error ASE es dada por:

$$f_G^{ASE}(x) = \sum_{j=1}^{N_G} \beta_j f_G^j(x, m_j, s_j) \quad (3.5.17)$$

donde N_G es el número total de aeronaves que exhiben densidad de probabilidad Gaussiana para el error ASE.

Finalmente, la densidad de probabilidad global para el error ASE de todas las aeronaves es la suma de las densidades de probabilidad Doble Exponencial y Gaussiana para ese error. O sea,

$$f^{ASE}(x) = f_{DE}^{ASE}(x) + f_G^{ASE}(x) \quad (3.5.18)$$

Las Figuras 3.5.3 e 3.5.4 muestran los resultados de las ecuaciones (3.5.16) e (3.5.17).

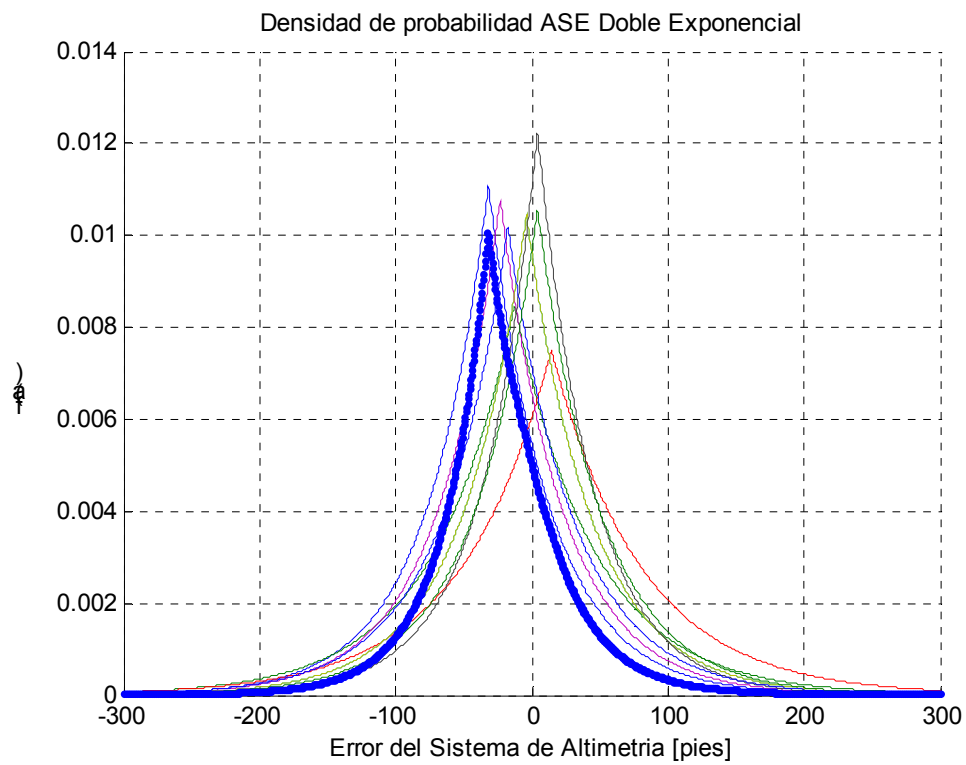


Figura 3.5.3 Densidad ASE Individual y Sumatoria del Tipo Doble Exponencial.

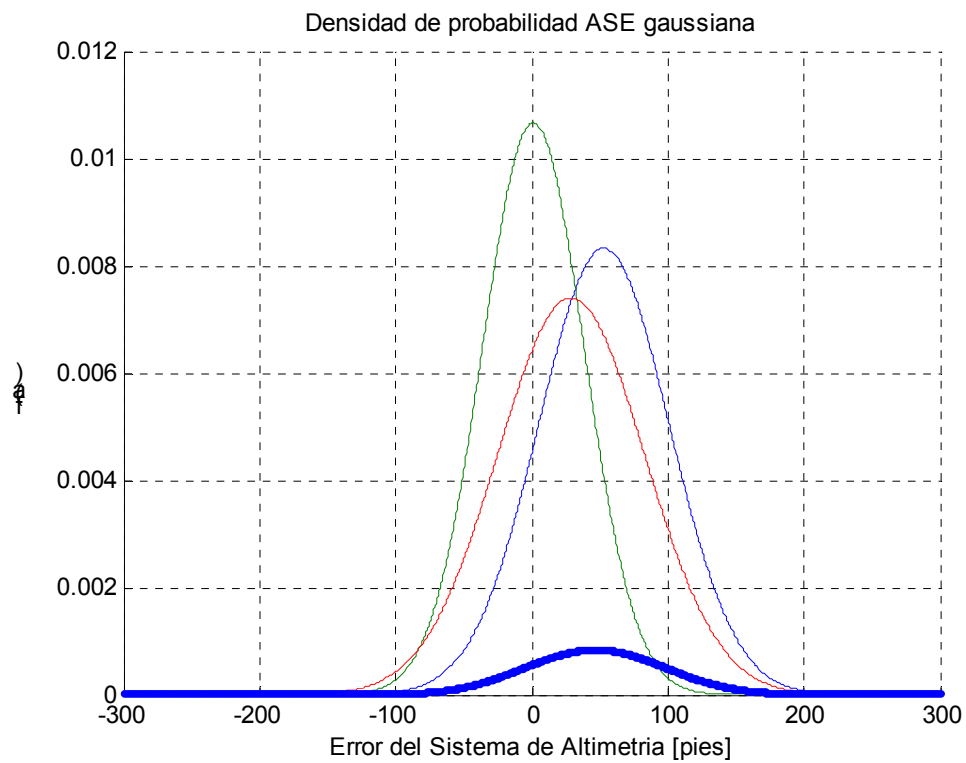


Figura 3.5.4 Densidad ASE Individual y Sumatoria del Tipo Gaussiana.

3.5.2 Modelo de la Distribución AAD

La performance AAD es subdividida en performance típica y performance atípica. Para la evaluación del riesgo técnico vertical, la performance atípica fue usada para modelar grandes desviaciones AAD, debidas a la turbulencia a penas. Datos de AAD de performance típica y atípica fueron obtenidos de la región NAT. Para encontrar una densidad de probabilidad analítica adecuada para AAD, se utilizó el modelo de las regiones NAT y Europa para la distribución de componentes de AAD. Para el modelo de la distribución de las desviaciones de navegación vertical fue usado un modelo compuesto de dos componentes [14, 15]:

$$f^{AAD}(a) = (1 - \alpha) \times f_{typ}^{AAD}(a) + \alpha \times f_{atyp}^{AAD}(a) \quad (3.5.19)$$

Ambos los componentes son tomados como densidades exponenciales y la ecuación (3.5.19) se torna

$$f^{AAD}(a) = (1 - \alpha) \times \frac{1}{2a_1} \exp\left(-\frac{|a|}{a_1}\right) + \alpha \times \frac{1}{2a_2} \exp\left(-\frac{|a|}{a_2}\right) \quad (3.5.20)$$

En el momento de la clausura de ese trabajo ninguno dato sobre performance típica o atípica en el corredor Santiago–Lima estaba disponible. Por lo tanto, fueron usados datos y modelos de AAD de la región NAT obtenido en la Referencia 11. El conjunto de datos consideró aproximadamente el valor de un millón de minutos de datos de modo C en performance AAD típica, colectados por aeronaves en niveles arriba del FL 290, al este de la costa de Canadá y dentro de la cobertura de sus radares de vigilancia. Esos datos fueron complementados con datos sobre grandes desviaciones atípicas de altitud, de todo el año de 1997, en el espacio aéreo MNPS de la región NAT. Un modelo DDE de la forma de la ecuación (3.5.20) fue, entonces, obtenido como el mejor modelo de datos. Los valores de los parámetros del modelo son mostrados en la Tabla 3.5.2.

Tabla 3.5.2 Parámetros de Densidades de Probabilidad Doble Doble Exponencial AAD de la Región NAT.

Conjunto de Datos	Parámetros del Modelo DDE	Estadísticas
Datos canadienses de modo C y grandes desviaciones de altura.	$a_1 = 22,3$	$\sigma_1 = 31,5$
	$a_2 = 123,9$	$\sigma_2 = 175,2$
	$\alpha = 1,1 \times 10^{-5}$	

Asumiendo que existe similitud entre el medio ambiente oceánico en la región NAT y en el corredor Santiago–Lima, el modelo de densidad de AAD especificado en la Tabla 3.5.2 fue usado en esa evaluación de riesgo para el corredor Santiago–Lima.

Las Figuras 3.5.5 e 3.5.6 muestran las densidades AAD mezcladas, $f^{AAD}(a)$, de la Tabla 3.5.2 en escalas linear y logarítmica, respectivamente. De nuevo, la última enfatiza la cola de la distribución AAD.

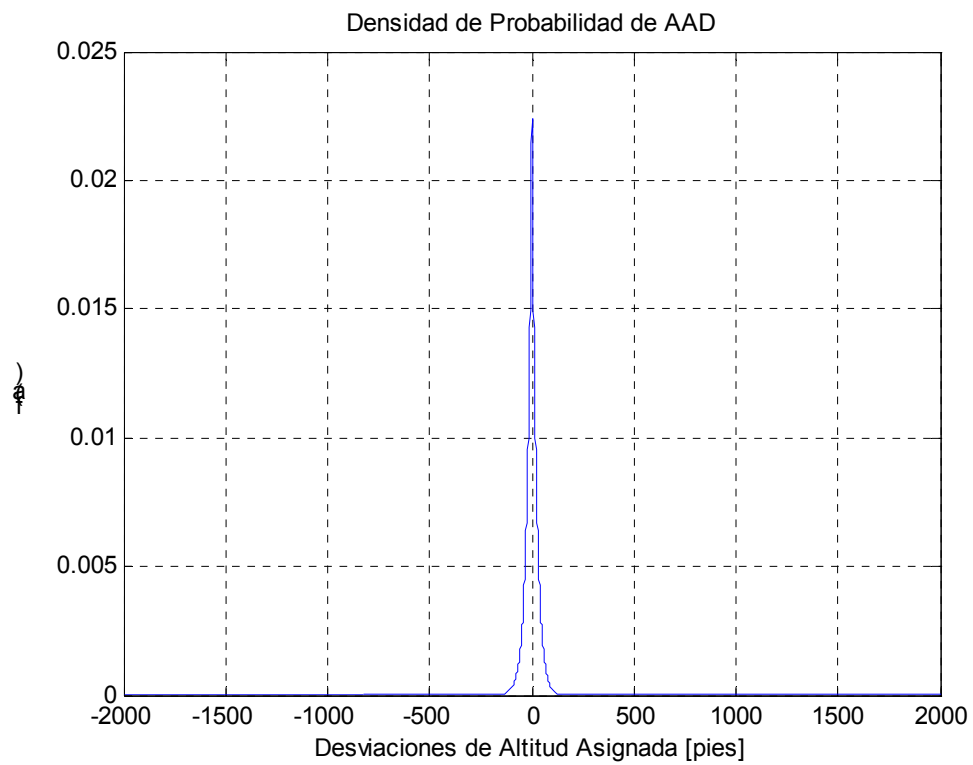


Figura 3.5.5 Densidad de AAD $f^{AAD}(a)$ Asumida para la Población de Aeronaves del Corredor Santiago–Lima

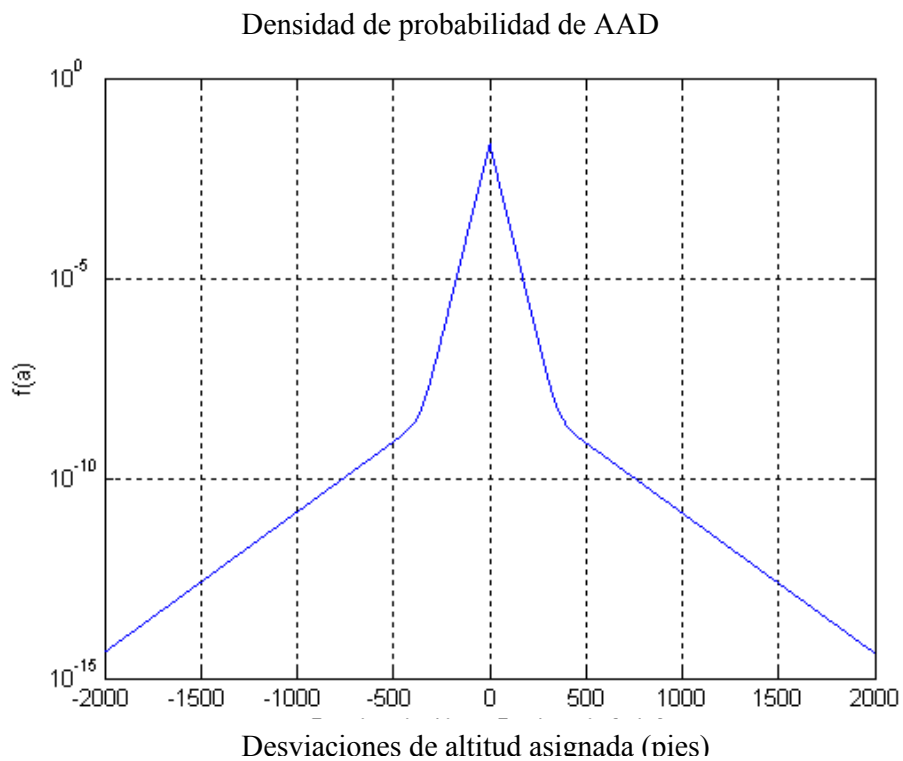


Figura 3.5.6 Densidad de AAD $f^{AAD}(a)$ Asumida para la Población de Aeronaves del Corredor Santiago–Lima (Escala Logarítmica).

3.5.3 Distribución TVE

La substitución de las densidades ASE y AAD de las dos secciones precedentes en la ecuación (3.5.8) produce la densidad TVE $f^{TVE}(z)$ para el corredor Santiago–Lima, mostradas en las Figuras 3.5.7 y 3.5.8.

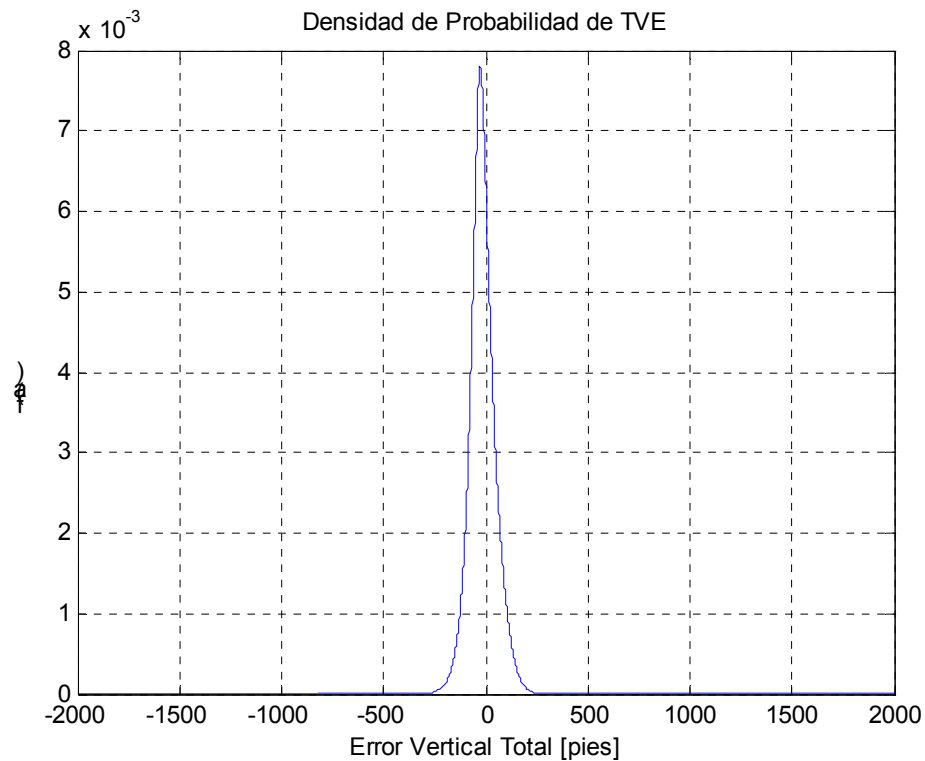


Figura 3.5.7 Densidad TVE $f^{TVE}(z)$ para la Población de Aeronaves del Corredor Santiago–Lima.

Semejante a la Figura 3.5.6, la Figura 3.5.8 muestra el efecto de las grandes desviaciones AAD sobre la cola de la densidad TVE.

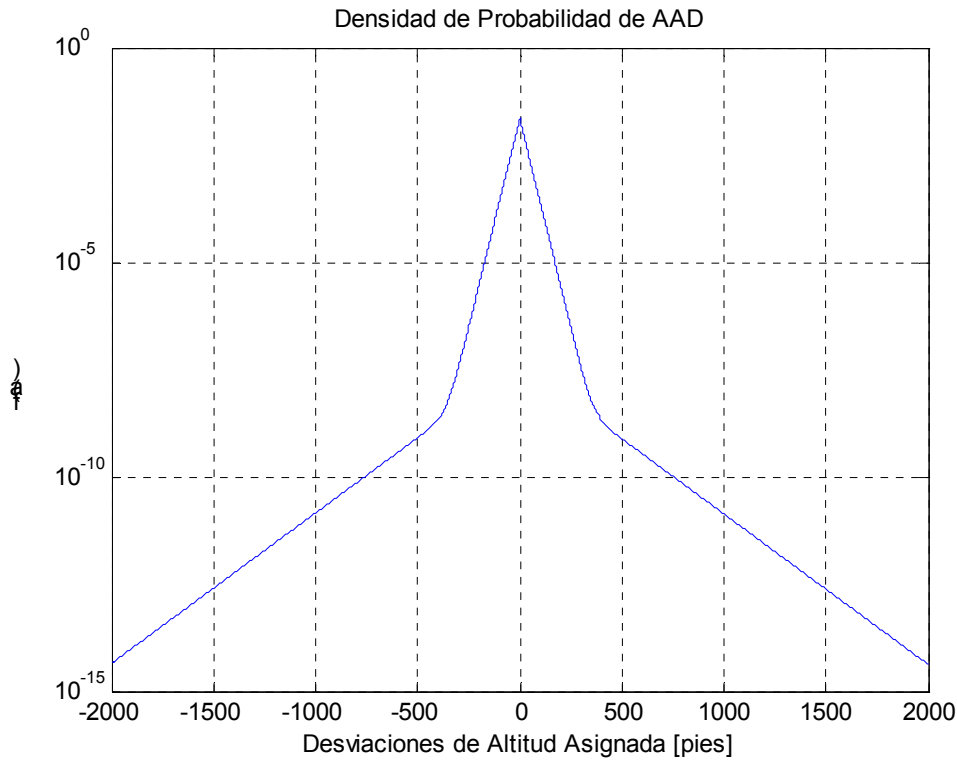


Figura 3.5.8 Densidad TVE $f^{TVE}(z)$ para la Población de Aeronaves del Corredor Santiago–Lima (Escala Logarítmica).

La densidad de probabilidad $f^{TVE}(z_1)$ de las desviaciones verticales de las aeronaves es necesaria para el cálculo de $P_z(0)$. Por lo tanto, una estimativa del valor de $P_z(0)$ para el corredor Santiago–Lima, donde el valor medio de $\lambda_z = 51,9$ pies, utilizando la ecuación (3.5.6), resultó en $P_z(0) = 0,368$. Entretanto, debido a falta de datos, este valor fue obtenido con una muestra representativa de 85% de las aeronaves que vuelan en el corredor Santiago–Lima. Por eso, a fin de se obtener un valor más conservativo, se resolvió recalcularlo todo con una normalización de los tipos de aeronaves con datos disponibles para 100%. Con eso, se obtuvo $P_z(0) = 0,504$, valor usado en el cálculo de la probabilidad de superposición lateral, $P_y(S_y)$.

3.6 Estimativa de las Velocidades

En el modelo de cálculo del riesgo de colisión lateral, donde no se tiene rutas en cruzamiento, son necesarios los valores de las velocidades $|\overline{V}|$, $|\overline{\Delta V}|$, $|\dot{y}|$ y $|\dot{z}|$, donde:

$|\overline{V}|$ - módulo de la velocidad media de las aeronaves;

$|\overline{\Delta V}|$ - módulo de la velocidad relativa media, al largo de la ruta, de pares de aeronaves volando en el mismo nivel y en el mismo sentido;

$\overline{|\dot{y}|}$ - módulo de la velocidad relativa lateral media, entre aeronaves volando en el mismo nivel, que perdieron la separación lateral mínima;

$\overline{|\dot{z}|}$ - módulo de la velocidad relativa vertical media de aeronaves volando en el mismo nivel.

3.6.1 Velocidad Media $\overline{|V|}$ y Velocidad Relativa Media $\overline{|\Delta V|}$

La velocidad media es obtenida a partir de la velocidad autorizada de cada vuelo; pero este es un dato que, generalmente, no está disponible. Otro modo sería obtenerla a partir de los datos reportados en los puntos de notificación. Las velocidades de crucero de cada aeronave también podrían ser utilizadas.

A partir de los datos reportados en los puntos de notificación, las velocidades medias son calculadas para cada punto con los tiempos reportados, para cada aeronave, en los dos sentidos de la ruta. En seguida es calculada la velocidad media del corredor.

El valor medio de la velocidad relativa $\overline{|\Delta V|}$ al longo de la ruta puede ser calculada por medio del levantamiento de la distribución de las diferencias entre velocidades de pares de aeronaves volando en el mismo nivel en rutas adyacentes.

3.6.1.1 Aplicación en el Corredor Santiago–Lima

Los cálculos de las velocidades medias en el corredor Santiago–Lima fueron hechos con los datos colectados del día 01 de diciembre a 31 de diciembre de 2002, en los tramos entre los puntos ATEDA–IREMI, ILMAR–IREMI, SULNA–SORTA y MOXES–SORTA. la velocidad media fue calculada de dos modos. En lo primero, fue obtenida la velocidad media de cada tipo de aeronave, calculándose a partir de esas, por media simples, la velocidad media del corredor $\overline{|V|} = 443$ nudos. En el segundo modo, la velocidad media de cada tipo de aeronave fue ponderada por la respectiva porcentaje de tiempo de vuelo, obteniéndose la velocidad ponderada media en el corredor $\overline{|V|} = 455$ nudos. En el cálculo del riesgo de colisión fue adoptado el valor mayor $\overline{|V|} = 455$ nudos, por ser más conservativo.

Las velocidades relativas medias fueron obtenidas tomándose un intervalo de tiempo de una

hora para más y una hora para menos, en el punto de notificación IREMI de la ruta UL320 y en el punto de notificación SORTA de la UL780, en el mismo sentido. El intervalo de tiempo de una hora fue establecido con el objetivo de cubrir el camino del tramo en análisis. Tomándose como referencia cada aeronave en uno de los puntos de una ruta, fueron consideradas todas las aeronaves que están dentro del intervalo de tiempo de ± 1 hora. La velocidad relativa entre dos aeronaves varía de 1,0 a 74 nudos. La velocidad relativa media obtenida en el sentido Lima–Santiago es de 23,28 nudos y en el sentido Santiago–Lima 10,86 nudos, resultando la velocidad relativa media en el corredor de 17,07 nudos.

La velocidad relativa media entre dos aeronaves que caracterizaron proximidad fue obtenida en la Sección 4 y es de 11 nudos. Como la velocidad relativa media es un parámetro que multiplica la ocupación en la expresión matemática del riesgo, debe ser utilizado el mayor valor, $|\overline{\Delta V}| = 17,07$ nudos, para ser conservador.

La Figura 3.6.1 muestra la distribución de las velocidades relativas $|\overline{\Delta V}|$ de pares de aeronaves en el mismo nivel de la UL302 y de la UL780, en el corredor Santiago–Lima.

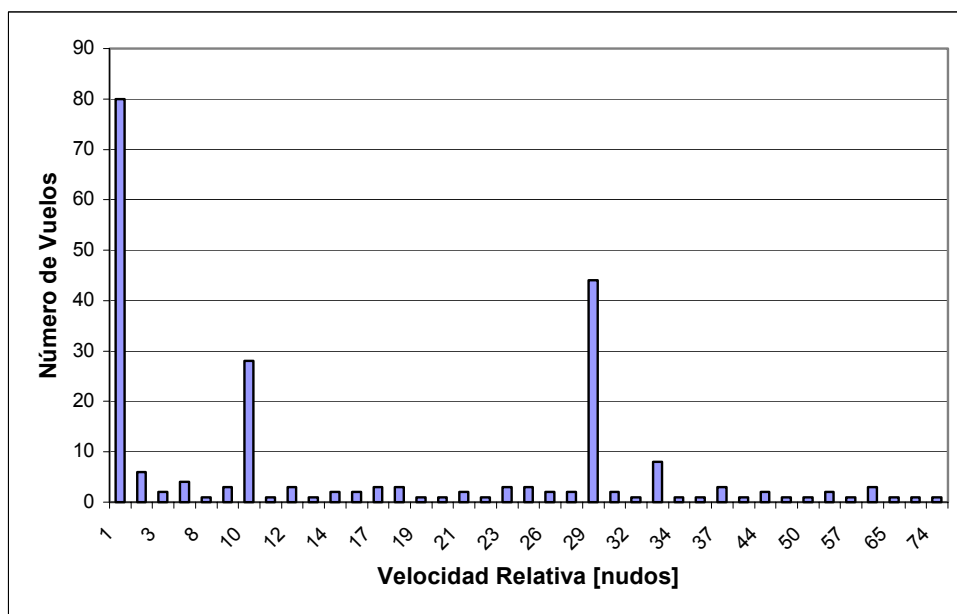


Figura 3.6.1 Velocidades Relativas en el Corredor Santiago–Lima.

La Figura 3.6.2 muestra la frecuencia de ocurrencia de los tipos de pares de aeronaves en el corredor, utilizados en el cálculo de la velocidad media relativa, notándose la predominancia del par del tipo B763. Los otros tipos de aeronaves que no aparecen en la figura tienen

ocurrencia única dentro del intervalo de tiempo considerado.

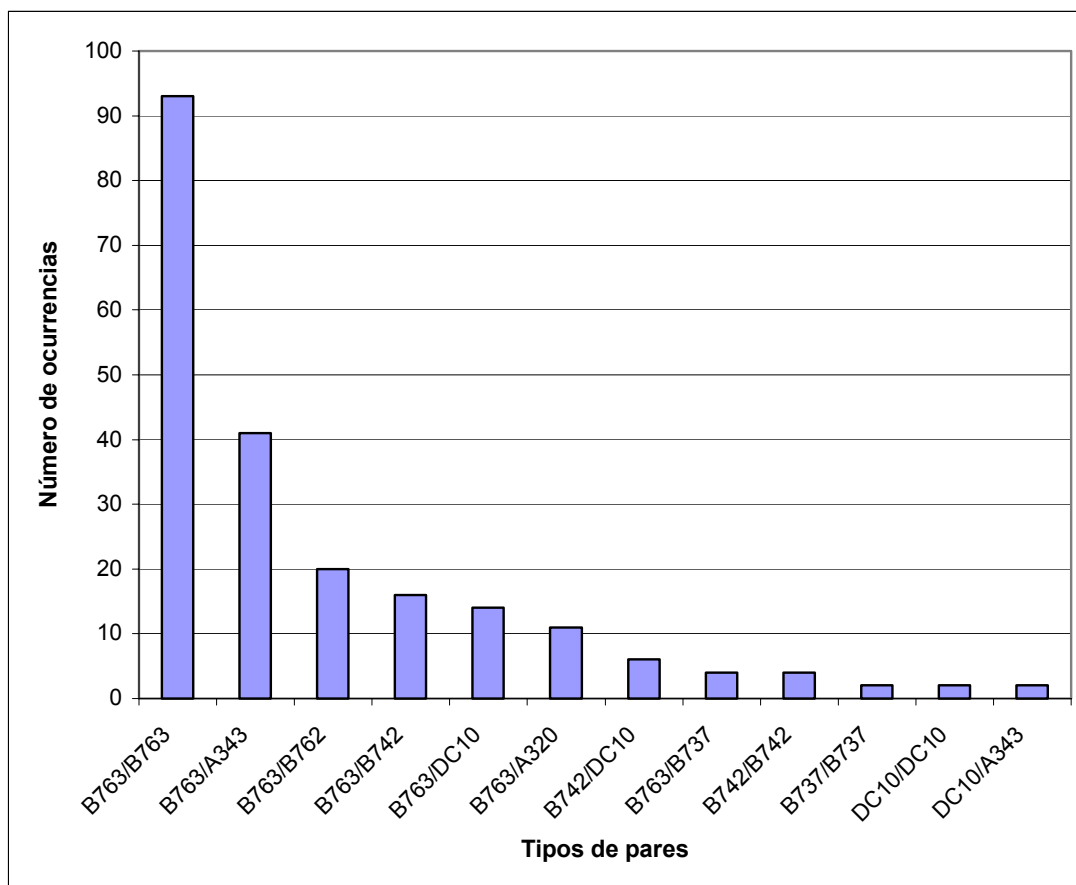


Figura 3.6.2 Frecuencia de Pares de Aeronaves para el Cálculo de $|\Delta V|$.

3.6.2 Velocidad Lateral Relativa Media $|\dot{y}|$

El valor del módulo de la velocidad lateral relativa media de pares de aeronaves volando en rutas adyacentes y que perderan la separación lateral mínima es obtenido a partir de datos de desviaciones laterales relativas y velocidades. Con esos datos, puede se obtener los valores de $|\dot{y}|$ e $|y|$ de las aeronaves y, a partir de ellos, construir un modelo y obtener la distribución de $|\dot{y}|$ para calcular el valor medio. Otro medio que podría ser usado para estimar $|\dot{y}|$ sería con los datos de ángulo en que una aeronave empieza a desviarse de su ruta, juntamente con su velocidad, y determinar el tiempo que lleva para atngir una cierta separación lateral. En la inexistencia de esos datos o de cualquier otro registro de desviación lateral, admitiéndose por hipótesis error operacional, la velocidad lateral puede ser estimada, considerando pérdida de separación lateral entre dos puntos sucesivos. Ese último procedimiento fue considerado conservador [11].

3.6.2.1 Aplicación en el Corredor Santiago–Lima

En el corredor Santiago–Lima, debido a la inexistencia de cualquier tipo de datos de desviaciones laterales, la velocidad lateral fue calculada, considerando la pérdida de la separación lateral entre puntos de notificación sucesivos debido a un hipotético error operacional.

Considerando que las rutas son paralelas con los puntos de notificación en líneas imaginarias perpendiculares a las rutas, dos valores aproximados para $\overline{|\dot{y}|}$ pueden ser obtenidos. Las distancias aproximadas entre MOXES–SORTA y ILMAR–IREMI es de 252 MN. Una aeronave que pierde la separación lateral entre esos puntos y las rutas UL302 y UL780 teniendo una separación lateral de 50 MN, tendrá una desviación aproximada de 11° . Con una velocidad media de 455 nudos, la velocidad $\overline{|\dot{y}|}$ resultante es de 87 nudos. Igualmente, entre SORTA–SULNA y IREMI–ATEDA, con una distancia media de 580 MN, el ángulo de desvío de la aeronave de su ruta es de aproximadamente 5° , que resulta en la velocidad $\overline{|\dot{y}|} = 40$ nudos. Para el cálculo del riesgo de colisión en el corredor fue adoptado el valor conservativo de $\overline{|\dot{y}|} = 87$ nudos.

3.6.3 Velocidad Vertical Relativa Media $\overline{|\dot{z}|}$

Es la velocidad más difícil de ser estimada, por no se tener datos para cálculos directos. El método básico aplicado es obtener la relación entre $|z|$ y $|\Delta z|$ para pequeñas desviaciones de la altitud determinada de pares de aeronaves, obtenidos de datos de radar, y extrapolar para valores de separación padrón. Para esta estimativa son necesarios datos precisos de radar. Para los datos de $|\Delta z|$ disponibles, de Europa, el valor de $\overline{|\dot{z}|}$ es casi constante. En la Tabla 5.16 de la Referencia 17 son presentados esos valores. Levando-se en cuenta incertidumbres de estimativas, el valor medio de 1,5 nudos fue usado tanto en la Europa Continental como en el atlántico Norte. Debido la inexistencia de datos colectados y considerando que en la análisis de riesgo de las regiones SAT, NAT, NOPAC, Canarias fueron utilizadas $\overline{|\dot{z}|} = 1,5$ nudos, este valor fue utilizado en el cálculo del riesgo del corredor Santiago–Lima.

3.7 Estimativas de la Probabilidad de Superposición Lateral, $P_y(S_y)$

El parámetro a_2 de la cola de la densidad Doble Doble Exponencial fue determinado través de análisis paramétrica. Las Referencias 10, 11 y 12 muestran que la probabilidad de superposición lateral puede ser aproximada por una función que tiene máximo para $a_2 = S_y$, cuando α es suficientemente pequeño. En los trabajos citados arriba, $P_y(S_y)$ dado por la

ecuación (3.3.12) fue calculado con $S_y = 50 MN$ como función de α y a_2 en lo intervalo $[1,00 \times 10^{-5}, 1,00 \times 10^{-3}]$ para α y, en el intervalo $[20, 75]$ para a_2 . Resumiendo, tenemos los siguientes valores:

$$\begin{aligned} \alpha &= 1,346 \times 10^{-4}, \\ a_1 &= 3,338, \\ a_2 &= 50. \end{aligned} \quad (3.7.1)$$

La utilización de la ecuación (3.3.12) con los valores arriba ha dado el valor presente de $P_y(S_y) = 7,0795 \times 10^{-8}$.

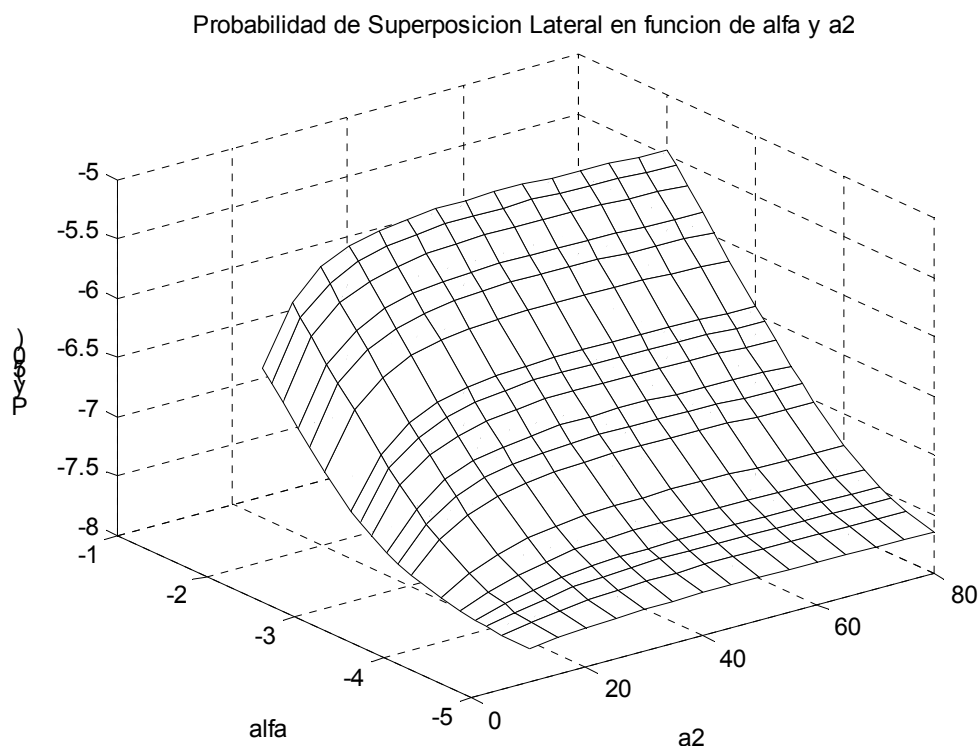


Figura 3.7.1 Probabilidad de superposición lateral en función de α y a_2

3.8 Sumario y Comparación de Valores de los Parámetros

La Tabla 3.8.1 muestra los valores de los parámetros para el cálculo del riesgo de colisión lateral para varias regiones para comparación con el corredor Santiago–Lima.

Tabla 3.8.1 Sumario de los Parámetros del Modelo de Colisión para el Riesgo Lateral.

Parámetros	Espacio Aéreo				
	SAT	NAT	NOPAC	Canarias	San-Lim
Tipo de RNP	10	12,6	10	5	10

S_y	50	60	50	43	50
$P_y(S_y)$	$7,858 \times 10^{-8}$		$9,66 \times 10^{-8}$		$7,0795 \times 10^{-8}$
$P_z(0)$	0,57	0,5	0,38	$0,39/0,5^2$	0,504
λ_x	193,12	185,93	232,11	139,76	168,76
λ_y	174,45	165,27	213,27	121,52	157,17
λ_z	55,43	52,25	63,80	42,53	51,90
$\tilde{S}_x$	80				80
$E_y(mismo)$	0,2562				0,028
$E_y(oposto)$	0				0
$ \overline{V} $	475	480	480	450	455
$ \overline{\Delta V} $	20	13	29	20	17
$ \dot{y} $	42	80	42,22	20	87
$ \dot{z} $	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

Nota: Dimensiones de la aeronave en pies y velocidades relativas en nudos.

3.9 Resultados para el Riesgo de Colisión Lateral

Las estimativas para los parámetros del modelo de riesgo de colisión, listados en la Tabla 3.8.1, pueden ser ahora substituidas en la ecuación del modelo de riesgo de colisión para el corredor Santiago–Lima, para la región comprendida por las rutas UL780 y UL302. Son considerados los casos para el tráfico aéreo actual y para un período de 10 anos.

$$N_{ay} = \{P_y(S_y)E_y(mismo)\} \times P_z(0) \frac{\lambda_x}{\tilde{S}_x} \left\{ \frac{|\overline{\Delta V}|}{2\lambda_x} + \frac{|\dot{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\dot{z}|}{2\lambda_z} \right\}$$

Por lo tanto,

$$N_{ay} = 7,3350 \times 10^{-10}.$$

El valor de $7,3350 \times 10^{-10}$ representa el riesgo de colisión para el tráfico actual de las rutas UL780 y UL302, debido a la pérdida de separación lateral.

El riesgo de colisión fue estimado para tasas de crecimiento del tráfico de 2, 4 y 6% para el período 2002 a 2012.

Como pueden ser observados en la Figura 3.9.1, los valores del riesgo de colisión se sitúan bajo del limite de 5×10^{-9} , asumido como nivel de seguridad deseado (TLS).

Fue encontrado el valor de $7,3350 \times 10^{-10}$ para el riesgo de colisión para el tráfico actual de las rutas UL780 y UL302, debido a la pérdida de separación lateral.

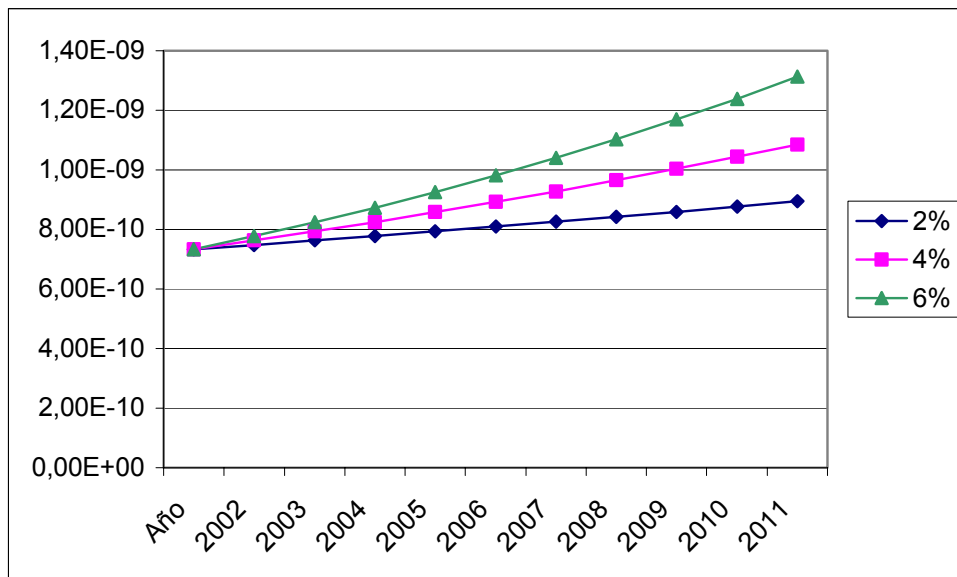


Figura 3.9.1 Riesgo de Colisión con Tasas de Crecimiento Anual de 2, 4, y 6%.

4. CONCLUSIONES

4.1 Análisis de Datos

Las desviaciones laterales deberán ser obtenidas de acuerdo con los procedimientos de los programas de monitoreo elaborados de acuerdo con las especificaciones de la RNP.

Cálculos precisos para la ocupación exigen una mayor precisión en los tiempos reportados. Para una ventana de 10 minutos, una diferencia de tiempo de ± 1 minuto reportada para una misma aeronave en el mismo punto, corresponde a un error de $\pm 10\%$ en el espacio para el cálculo de la ocupación que, en términos absolutos, no es sin valor. En el caso del corredor analizado, estas diferencias no deben introducir errores importantes; eso puede no ser verdad en el caso de corredores densamente utilizados. Por lo tanto, debe ser hecho un entrenamiento y la tomada de conciencia del personal involucrado en la colecta de datos, para que esos puedan ser obtenidos y los con alta confiabilidad.

4.2 Velocidades Medias

Por la inexistencia de datos de velocidad autorizada, estas fueron obtenidas de tiempos colectados en los puntos de notificación. Algunas inconsistencias en los datos colectados fueron verificadas en los archivos de la FIR Santiago y de la FIR Lima. Para los puntos comunes, SORTA y IREMI, los datos fornecidos en cada FIR no son compatibles en muchos vuelos reportados. Se notaran también varios registros idénticos repetidos en las rutas UL302 y UL780. En varios días del período de colecta de datos hechos en la FIR Santiago, los tiempos entre dos puntos son constantes, independiente del tipo de aeronave y del nivel de vuelo, obteniendo de esa manera velocidades medias iguales y velocidades relativas constantes.

No fueron disponibles informaciones, o datos de desviaciones laterales o verticales del corredor Santiago–Lima, que pudiesen ser utilizados en la estimativa de la velocidad lateral relativa media y velocidad vertical relativa media. Consecuentemente, la velocidad lateral relativa media fue estimada admitiéndose error operacional, y para la velocidad vertical relativa media fue utilizado el mismo valor de otras regiones donde el riesgo de colisión fue analizado.

4.3 Análisis del Riesgo

De acuerdo con los resultados obtenidos en esa análisis, la RNP10 podrá ser implementada en las rutas UL302 y UL780.

Procedimientos operacionales deberán ser desarrollados de forma a se evitar que las aeronaves, utilizando las rutas UV1 y UW303, convergentes en posición ILMAR, tengan sus separaciones laterales reducidas en relación a las aeronaves volando en la ruta UL302.

5. LISTA DE ACRÓNIMOS

AAD – ASSIGNED ALTITUDE DEVIATION
ACC – AREA CONTROL CENTRE
ASE – ALTIMETRY SYSTEM ERROR
ATC – AIR TRAFFIC CONTROL
ATS – AIR TRAFFIC SERVICE
CAR/SAM – CARIBBEAN/SOUTH AMERICA REGION
CARSAMMA – CARIBBEAN/SOUTH AMERICA REGION MONITORING AGENCY
CRM – COLLISION RISK MODEL
DE – DOUBLE EXPONENTIAL (EXPONENCIAL DOBLE)
DDE –DOUBLE DOUBBLE EXPONENTIAL (DOBLE DOBLE EXPONENCIAL)
EUR – EUROPEAN REGION
FIR – FLIGHT INFORMATION REGION
FL – FLIGHT LEVEL
FMS – FLIGHT MANAGEMENT SYSTEM
FTE – FLIGHT TECHNICAL ERROR
G – GAUSS
HDG – HEADING
HF – HIGH FREQUENCY
MASPS – MINIMUM AIRCRAFT SYSTEM PERFORMANCE SPECIFICATION
MN – MILHA NÁUTICA (NAUTICAL MILE)
MNPS – MINIMUM NAVIGATION PERFORMANCE SPECIFICATIONS
NAT – NORTH ATLANTIC REGION
NOPAC – NORTH PACIFIC
RNP –REQUIRED NAVIGATION PERFORMANCE
RVSM – REDUCED VERTICAL SEPARATION MINIMUM OF 300M (1000 FT)
BETWEEN FL290 AND FL410 INCLUSIVE
SAT – SOUTH ATLANTIC
TLS – TARGET LEVEL OF SAFETY
TVE – TOTAL VERTICAL ERROR
VHF – VERY HIGH FREQUENCY

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Manual on Required Navigation Performance (RNP), ICAO, DOC 9613-AN/937, Second Edition, 1999.
2. Manual on Airspace Planning Methodology for the Determination of Separation Minima, Doc 9689-AN/953, ICAO, Montreal, First Edition – 1998.
3. International Standards and Recommended Practices AIR TRAFFIC SERVICES Air Traffic Control Service Flight Information Service Alerting Service, Annex 11 to the Convention on International Civil Aviation, ICAO, Montreal, Twelfth Edition – July 1998.
4. P.G. Reich, Analysis of Long-Range Air Traffic Systems: Separation Standards, Part I, Journal of Navigation (UK), Vol. 19, No. 115, pp. 88 – 98 *apud* Risk Assessment of RNP10 and RVSM in the South Atlantic Flight Identification Regions – ARINC, 2551 Riva Road, Annapolis, MD, 21401-7465, USA.
5. P.G. Reich, Analysis of Long-Range Air Traffic Systems: Separation Standards, Part II, Journal of Navigation (UK), Vol. 19, No. 116, pp. 169 – 193 *apud* Risk Assessment of RNP10 and RVSM in the South Atlantic Flight Identification Regions – ARINC, 2551 Riva Road, Annapolis, MD, 21401-7465, USA.
6. P.G. Reich, Analysis of Long-Range Air Traffic Systems: Separation Standards, Part III, Journal of Navigation (UK), Vol. 19, No. 117, pp. 331 – 347 *apud* Risk Assessment of RNP10 and RVSM in the South Atlantic Flight Identification Regions – ARINC, 2551 Riva Road, Annapolis, MD, 21401-7465, USA.
7. Documenting the Rationale Supporting 50 NM Route Spacing in North Pacific Airspace, RGCSP/10-WP/22, ICAO, Montreal, May 2000 *apud* Risk Assessment of RNP10 and RVSM in the South Atlantic Flight Identification Regions – ARINC, 2551 Riva Road, Annapolis, MD, 21401-7465, USA.
8. Capabilities of FANS-1/A Aircraft which can Lead to Separation Standards Reductions, RGCSP-WG/A-IP/17, Shizuoka, Japan, September 1994 *apud* Risk Assessment of RNP10 and RVSM in the South Atlantic Flight Identification Regions – ARINC, 2551 Riva Road, Annapolis, MD, 21401-7465, USA..
9. Analysis of 50 NM Lateral Separation, Appendix to the PAC SUPP Amendment Proposal in 1998, APAC-S 95/13, ICAO Bangkok Office, 1998 *apud* Risk Assessment of RNP10

- and RVSM in the South Atlantic Flight Identification Regions – ARINC, 2551 Riva Road, Annapolis, MD, 21401-7465, USA.
10. Air Traffic Services Planning Manual, First Edition – 1984, ICAO Montreal, Appendices A – C to Part II, Section 2, Chapter 4, ICAO, Montreal, Doc 9426-AN/924.
 11. Risk Assessment of RNP10 and RVSM in the South Atlantic Flight Identification Regions, ARINC, Annapolis, MD, USA, May 2001.
 12. L. Davies and A. Sharpe, Review of the North Atlantic Lateral Collision Risk Model, Air Traffic Control Quarterly. Vol. 1 No.3, pp. 225 –254, 1993 *apud* Risk Assessment of RNP10 and RVSM in the South Atlantic Flight Identification Regions – ARINC, 2551 Riva Road, Annapolis, MD, 21401-7465, USA.
 13. K. Slater, 1999 Lateral collision Risk Estimate for NAT MNPS Airspace, NAT SPG/36 MWG WP/6 (Revised), ICAO, Paris, May 2000 *apud* Risk Assessment of RNP10 and RVSM in the South Atlantic Flight Identification Regions – ARINC, 2551 Riva Road, Annapolis, MD, 21401-7465, USA.
 14. NAT SPG Mathematicians’ Working Group, Risk Assessment and System Performance Monitoring for the Verification and Operation of a 300 m (1000 ft) Vertical Separation Minimum in the Minimum Navigation Performance Specifications Airspace of the North Atlantic Region, Supplement to NAT Doc 002, Draft Version 2.0, 12th March 1996 *apud* Risk Assessment of RNP10 and RVSM in the South Atlantic Flight Identification Regions – ARINC, 2551 Riva Road, Annapolis, MD, 21401-7465, USA.
 15. EUROCONTROL Mathematicians Drafting Group, Mathematical Supplement to the Guidance Material on the Implementation of a 300 m VSM in the European RVSM Airspace, EUROCONTROL, Brussels, in preparation *apud* Risk Assessment of RNP10 and RVSM in the South Atlantic Flight Identification Regions – ARINC, 2551 Riva Road, Annapolis, MD, 21401-7465, USA.
 16. M. Dacre, S. Owens and P. Smith, Trial Risk Assessment for RVSM in the London and Scottish FIRs, EUROCONTROL MDG/17-DP/4, July 2000 *apud* Risk Assessment of RNP10 and RVSM in the South Atlantic Flight Identification Regions – ARINC, 2551 Riva Road, Annapolis, MD, 21401-7465, USA.
 17. Review of the General Concept of Separation Panel, Report of the Sixth Meeting, ICAO, Montreal, December 1988.

18. Manual on Implementation of a 300 m (1000 ft) Vertical Separation Minimum Between FL290 and FL410 Inclusive, ICAO, Montreal, Doc 9574, 1st edition 1992, 2nd edition 2000.