

**ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE LA NAVEGACIÓN BASADA EN LA
PERFORMANCE PARA EL APROVECHAMIENTO DEL ESPACIO AÉREO
MEDIANTE LA MODIFICACIÓN DE LA RUTA AERONÁUTICA BOGOTÁ –
LETICIA (UB-689)**

*Proyecto de Grado como requisito para optar por el título de Ingeniero
Aeronáutico*

Autores:

MARÍA ALEJANDRA ALARCÓN CÁRDENAS

CRISTHIAN CAMILO LETRADO ROMERO

Tutor y director del proyecto:

JAIRO VÍCTOR MEDINA BECERRA

Ingeniero Aeronáutico

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA AERONÁUTICA

BOGOTÁ D.C.

SEPTIEMBRE DE 2016

PÁGINA DE ACEPTACIÓN

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Jurado

Jurado

Firma del Tutor - Director del Proyecto

Bogotá, D.C., __ de septiembre de 2016.

DEDICATORIAS

«Deseo dedicarle este proyecto a cada una de las personas que me apoyaron en este largo camino, las cuales nunca dejaron de creer en mí y me dieron su apoyo para continuar en este gran camino. A mi madre Janeth Cárdenas, por la fortaleza que me brindó para continuar y no rendirme en ningún momento, a mis hermanas Camila y Juliana por acompañarme y aconsejarme, a mi compañero Cristhian por su apoyo, dedicación y su pasión por la aviación y, finalmente, a mis profesores y compañeros que compartieron su conocimiento durante todo este camino.

Gracias. »

MARÍA ALEJANDRA ALARCÓN CÁRDENAS

DEDICATORIAS

«A mis padres, Luz Dary y Luis Alfredo, por comprenderme e impulsarme en los momentos en que tuve que trasnochar para trabajar duro en este proyecto; a mi hermana Laura Carolina, por acompañarme en la mesa mientras trabajaba en sus tareas de colegio; a mis abuelos maternos, Cecilia e Isidro, porque ambos son los motores en mi vida para seguir luchando en busca de mis sueños; a mi novia, Ana, por la paciencia entregada y la comprensión que me ha brindado a lo largo de este proyecto. Y por último, dedico este trabajo a mis profesores, compañeros y amigos de universidad, y a la misma aeronáutica colombiana, por abrirme las puertas hacia grandes conocimientos que, junto a mi compañera Alejandra, hemos querido plasmar en este documento.»

CRISTHIAN CAMILO LETRADO ROMERO

Bogotá, D.C., __ de septiembre de 2016.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo, de manera muy especial le agradecemos a Dios, por permitirnos aprovechar de la mejor manera el conocimiento adquirido durante más de cinco años, por no dejarnos desfallecer y por darnos la fuerza para culminar con todos los procesos requeridos para la obtención del título de Ingenieros Aeronáuticos. También queremos hacer extensivo nuestro agradecimiento a los respetados señores integrantes del jurado, por el tiempo dedicado en revisar de manera cautelosa y paciente nuestro proyecto, y por los aportes y correcciones que nos pueden brindar para mejorar nuestra visión en esta temática; al señor Ing. Jairo Víctor Medina, por aportar en gran manera a la realización de este proyecto, con su gran experiencia en el énfasis de Infraestructura y Operaciones Aeronáuticas, dándonos la inducción correspondiente a este tipo de proyectos que propenden por mejorar la operatividad en el campo aeronáutico colombiano; a la Unidad Administrativa Especial de la Aeronáutica Civil, en representación del señor Ing. Freddy Celis Ardila, orgánico del Centro Nacional de Aeronavegación, por su ayuda brindada con capacitación y orientación de la aplicación de los manuales de la OACI para la construcción de procedimientos, parte fundamental de este proyecto; a los directivos y docentes de la Fundación Universitaria Los Libertadores, y del programa de Ingeniería Aeronáutica, en cabeza del señor Ing. Andrés Felipe Giraldo, quienes gracias a su liderazgo y pensamiento, nos han transmitido el conocimiento que a bien ha servido mucho a la realización y desarrollo de este proyecto. A ustedes, muchas gracias por contribuir en nuestra formación como excelentes profesionales, y por aportar el granito de arena para cumplir nuestros sueños: ser los mejores ingenieros aeronáuticos de Colombia y trabajar en pro de la aviación colombiana.

LOS AUTORES.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS, FIGURAS Y ANEXOS	9
GLOSARIO DE ACRÓNIMOS, ABREVIATURAS Y TÉRMINOS AERONÁUTICOS..	13
ABSTRACT	16
RESUMEN	17
INTRODUCCIÓN	18
1. MARCO REFERENCIAL.....	19
1.1. MARCO CONCEPTUAL	19
1.2. MARCO HISTÓRICO	24
1.2.1. CONTEXTO INTERNACIONAL	24
1.2.2. CONTEXTO NACIONAL.....	26
1.3. MARCO INSTITUCIONAL.....	35
1.4. MARCO GEOGRÁFICO.....	35
1.5. MARCO LEGAL	36
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	38
3. JUSTIFICACIÓN.....	40
4. OBJETIVOS.....	42
4.1. OBJETIVO GENERAL.....	42
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	42
5. METODOLOGÍA.....	43
5.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	43
5.2. ETAPAS.....	43
5.2.1. PRIMER OBJETIVO ESPECÍFICO	43
5.2.2. SEGUNDO OBJETIVO ESPECÍFICO	43
5.2.3. TERCER OBJETIVO ESPECÍFICO.....	44
5.3. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	44
5.4. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	45
5.4.1. RESUMEN DE PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN.....	45
5.4.2. RESULTADO DE LA ENCUESTA APLICADA A LAS AEROLÍNEAS	46
5.4.3. MONITOREO DE LA RUTA BOGOTÁ – LETICIA (UB-689).....	50

5.4.4. PRIMEROS CÁLCULOS DE PERFORMANCE	53
5.4.5. CÁLCULOS DE DISEÑO	55
5.4.5.1. SUPERFICIES LIMITADORAS DE OBSTÁCULOS (SLO).....	55
5.4.5.2. PROCEDIMIENTO DE SALIDA.....	57
5.4.5.3. ANCHURA Y SEMIANCHURA DE ÁREA.....	61
5.4.6. RESULTADOS DE DISEÑO	65
5.4.6.1 SUPERFICIES LIMITADORAS DE OBSTÁCULOS.....	66
5.4.6.2. TRAZADO DE RUTAS Y SEMIANCHURA DE ÁREA.....	71
5.4.6.3. SEGUNDOS CÁLCULOS DE LA PROPUESTA DE LA RUTA	77
5.4.6.4. GRÁFICAS COMPARATIVAS	78
5.4.7. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN DE GRÁFICOS	81
6. PRESENTACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA	83
6.1. PRESENTACIÓN DE LA PROPUESTA	83
6.2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO (EN ETAPAS)	84
6.2.1. PRIMERA ETAPA: INVESTIGACIÓN CONCEPTUAL SOBRE LOS PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN DE RUTAS, APROXIMACIONES Y SALIDAS; NAVEGACIÓN BASADA EN LA PERFORMANCE, PERFORMANCE DE AVIACIÓN Y DOCUMENTOS NECESARIOS PARA DISEÑO DE PROCEDIMIENTOS.....	84
6.2.1.1. Manual para procedimientos de los servicios de navegación aérea. Operación de aeronaves (PANS-OPS) – Organización de Aviación Civil Internacional. Documento 8168. Vol. II: Construcción de procedimientos de vuelo visual y por instrumentos.	85
6.2.1.2. Manual para procedimientos de Navegación Basada en la Performance (PBN) – Organización de Aviación Civil Internacional. Documento 9613. Volúmenes I y II.	88
6.2.1.3. Plan Mundial de Navegación Aérea 2013 - 2028 - Organización de Aviación Civil Internacional. Documento 9750-AN/963.	91
6.2.2. SEGUNDA ETAPA: INVESTIGACIÓN SOBRE INFRAESTRUCTURA AERONÁUTICA Y PROCEDIMIENTOS DE LA RUTA ACTUAL.....	92
6.2.2.1. Aeropuerto Internacional GR. Alfredo Vásquez Cobo (SKLT).....	93
6.2.2.2. Aeropuerto Internacional El Dorado	94

6.2.3. TERCERA ETAPA: INVESTIGACIÓN CORRESPONDIENTE A LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE CADA AERONAVE (ESPECIFICACIONES GEOMÉTRICAS, DE PESO, DE PERFORMANCE, PLANTA MOTRIZ), Y CAPACIDADES DE NAVEGACIÓN.....	96
6.2.3.1. AIRBUS A318.....	98
6.2.3.2. AIRBUS A319.....	100
6.2.3.3. AIRBUS A320.....	102
6.2.4. CUARTA ETAPA: MONITOREO DE VUELOS EN LA RUTA, MEDIANTE LA APLICACIÓN <i>FlightRadar24</i>	104
6.2.5. QUINTA ETAPA: PRIMEROS CÁLCULOS DE PERFORMANCE	107
6.2.5.1. PROCEDIMIENTO.....	108
6.2.6. SEXTA ETAPA: ANÁLISIS DE LA RUTA ACTUAL.....	120
6.2.6.1. ANÁLISIS VISUAL	121
6.2.6.2. EVALUACIÓN DE ZONAS TERRITORIALES	122
6.2.6.3. MODIFICACIÓN PROPUESTA DESDE LA PARTE VISUAL	128
6.2.7. SÉPTIMA ETAPA: DISEÑO DE LA NUEVA RUTA AERONÁUTICA.....	131
6.2.7.1. REFERENCIAS Y DOCUMENTOS PARA DISEÑO.....	132
6.2.7.2. DISEÑO DE SLO.....	132
6.2.7.3. DISEÑO DE PROCEDIMIENTOS.....	145
6.2.8. OCTAVA ETAPA: SEGUNDO CÁLCULO DE PERFORMANCE PARA LA RUTA MODIFICADA	177
6.2.9. NOVENA ETAPA: ANÁLISIS FINAL Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS	177
7. CONCLUSIONES.....	179
8. BIBLIOGRAFÍA – CIBERGRAFÍA	181

LISTA DE TABLAS, FIGURAS Y ANEXOS

TABLAS

Tabla 1. Clave de Referencia de Aeródromo	23
Tabla 2. Resultados de cálculos de datos atmosféricos, velocidades, pesos, de tiempo y distancia.	54
Tabla 3. Resultados de cálculos aerodinámicos y de performance.	54
Tabla 4. Velocidad vertical (ft/min) vs. Velocidad de ascenso (KT) para SKBO	58
Tabla 5. Comportamiento de la aeronave en la superficie de ascenso de SKBO.	59
Tabla 6. Resultados del segundo cálculo para condiciones de vuelo.....	77
Tabla 7. Resultados de los segundos cálculos aerodinámicos y de performance.	78
Tabla 8. Dimensiones y pendientes de las superficies limitadoras de obstáculos.	143
Tabla 9. Medida del XTT de acuerdo a cada especificación de navegación RNAV	167
Tabla 10. Valores Intermedios (BV)	167
Tabla 11. Error técnico de vuelo.....	168
Tabla 12. RNP 4 en ruta.....	170
Tabla 13. RNP 1 básica en fase de llegada y de salida.....	170
Tabla 14. RNP APCH en todas las aproximaciones.	170
Tabla 15. RNAV 1 y 2 en todas las fases de vuelo, excepto aproximación frustrada.	170
Tabla 16. RNAV 5 en ruta.....	170
Tabla 17. XTT, ATT y semianchura de área para RNAV 1 con DME en ruta, llegada, aproximación inicial/intermedia y de salida.....	172
Tabla 18. XTT, ATT y semianchura de área para RNAV 1 con DME en ruta, llegada, aproximación inicial/intermedia y de salida.....	173
Tabla 19. XTT, ATT y semianchura de área para RNAV 2 con DME en ruta, llegada, aproximación inicial/intermedia y de salida.....	173
Tabla 20. XTT, ATT y semianchura de área para RNAV 5 con DME en ruta, llegada, aproximación inicial/intermedia y de salida.....	174

FIGURAS

Figura 1. Gráfica de capacidades RNAV (AFM)	47
Figura 2. Grafica de capacidades RNP (AFM)	47
Figura 3. Gráfica de capacidades Baro-VNAV.....	48
Figura 4. Gráfica de capacidades para sensores de navegación.....	48

Figura 5. Capacidad de integridad de sistemas.....	49
Figura 6. Capacidad de Sistema de Gestión de Vuelo (FMS)	49
Figura 7. Salida con viraje hacia el VOR/DME SOA.....	50
Figura 8. Ascenso de la aeronave.....	50
Figura 9. Inicio de estabilización de nivel de vuelo.	51
Figura 10. Vuelo estable de la aeronave, en el punto <i>DANSA</i>	51
Figura 11. Vuelo con rumbo al VOR/DME SJE.....	52
Figura 12. Vuelo estable rumbo al punto de notificación <i>PABON</i>	52
Figura 13. Aproximación a SKLT.....	53
Figura 14. Superficies Horizontal Interna, Horizontal Externa y Superficie Cónica de SKLT (Vista superior).	66
Figura 15. Detalle de las Superficies de Transición, de Ascenso y de Aproximación en SKLT. (Vista Superior)	67
Figura 16. Detalle de las Superficies Cónica y Horizontal Interna en SKLT. (Vista Lateral).....	67
Figura 17. Superficie Horizontal Interna y Cónica en SKLT (Vista frontal).....	68
Figura 18. Superficie Horizontal Externa, Interna, Cónica y de Ascenso en SKBO (Vista Superior).	68
Figura 19. Detalle de las superficies horizontal interna y cónica en SKBO (Vista lateral).....	69
Figura 20. Detalle de la superficie de ascenso en SKBO, con su respectiva evaluación de obstáculos (Vista lateral). Cotas de altura en ft.	69
Figura 21. Superficie de Ascenso en SKBO (Vista superior).....	70
Figura 22. Superficies Cónica y Horizontal Interna en SKBO (Vista Frontal).....	70
Figura 23. Construcción de espiral de viento para salida de viraje en SKLT.....	70
Figura 24. Conexión SKLT – DALOK.	71
Figura 25. Conexión SKBO – VOR/DME SKVV	72
Figura 26. Salida con viraje en SKLT.....	73
Figura 27. Salida en línea recta (con la instalación por detrás) en SKBO.....	73
Figura 28. Creación de nuevo punto de notificación CALVO y semianchura de área para la fase de vuelo en ruta, para GNSS Básico.....	74
Figura 29. Detalle de viraje en el punto de notificación PABON, con la semianchura de área correspondiente a DME/DME.	74
Figura 30. Detalle de ascenso en SKBO en RNAV 5 para navegación por VOR/DME, incluidas las distancias de tangencia, tomando como referencia la radioayuda VOR/DME SOA.	75
Figura 31. Vista general de la ruta BOGOTÁ – LETICIA (UB-689).	76
Figura 32. Gráfica comparativa de altura vs distancia.	78
Figura 33. Gráfica comparativa de consumo de combustible en litros.	79

Figura 34. Gráfica comparativa de emisiones de CO ₂ en función del tiempo.....	79
Figura 35. Gráfica comparativa de consumo específico de combustible en función del tiempo.....	80
Figura 36. Comportamiento de la velocidad vertical en función del tiempo.....	80
Figura 37. Eficiencia aerodinámica de la aeronave.....	81
Figura 38. Ubicación geográfica y detalle del aeropuerto SKLT, mediante Google Maps.....	94
Figura 39. Ubicación geográfica y detalle del aeropuerto SKBO, mediante Google Maps.....	95
Figura 40. Ilustración de un avión Airbus A318 de Avianca Brasil.....	98
Figura 41. Ilustración de las vistas del Airbus A318.....	99
Figura 42. Ilustración de un avión Airbus A319-115 de Avianca.....	100
Figura 43. Ilustración de las vistas del Airbus A319.....	101
Figura 44. Ilustración de un avión Airbus A320-232 de LAN.....	102
Figura 45. Ilustración de las vistas del Airbus A320.....	103
Figura 46. Mapa estimado de cobertura, según los estudios realizados en este proyecto.	105
Figura 47. Recorrido monitoreado de SKBO a SKLT.	107
Figura 48. Especificaciones técnicas del Airbus A319 en el libro de Excel.....	108
Figura 49. Alturas tomadas para las rutas en las que se emplea el Airbus A319 (Ejemplo).....	109
Figura 50. Muestra de la tabla ISA para todos los libros de cálculos.....	109
Figura 51. Función de Interpolación Lineal en lenguaje SQL para ser usado en Excel.....	111
Figura 52. Muestra de densidades y temperaturas tomadas a partir de las interpolaciones.....	112
Figura 53. Carta de visibilidad para SKLT.....	123
Figura 54. Mapa de la zona evaluada de SKBO.	126
Figura 55. Detalle de casco urbano de SKBO.	126
Figura 56. Detalle del terreno montañoso del Parque Nacional Natural Chingaza.	127
Figura 57. Mapa de recorrido actual en el tramo señalado.....	130
Figura 58. Mapa de recorrido propuesto por el grupo de trabajo.	131
Figura 59. Superficie horizontal interna para una pista única de número de clave 4.	135
Figura 60. Superficie horizontal interna compuesta, para dos pistas paralelas de número de clave 4.....	136
Figura 61. Superficies limitadoras de obstáculos.....	144

Figura 62. Superficies limitadoras de obstáculos de aproximación interna, de transición interna y de aterrizaje interrumpido.	145
Figura 63. Pendiente de diseño de procedimiento.....	147
Figura 64. Obstáculos muy próximos	148
Figura 65. Área de salida recta sin guía de derrota.....	149
Figura 66. . Área de salida en línea recta con corrección de derrota (sin especificar el punto de corrección de derrota).....	150
Figura 67. Área de salida en línea recta con punto de corrección de derrota	151
Figura 68. Salida en línea recta (con la instalación por delante).....	152
Figura 69. Salida en línea recta (con la instalación por detrás).....	152
Figura 70. Salida en línea recta con derrota a la línea desplazada (derrota paralela a la dirección de la pista).....	153
Figura 71. Salida en línea recta con derrota de salida desplazada (derrota divergente de la dirección de la pista)	153
Figura 72. Salida en línea recta con derrota de salida desplazada (derrota que cruza la dirección de la pista).....	154
Figura 73. Franqueamiento de obstáculos	155
Figura 74. Área sin guía de derrota	157
Figura 75. Protección del límite interior del viraje de menos de 75° (para este caso)	161
Figura 76. Inicio de la construcción del límite exterior.....	162
Figura 77. Construcción de una espiral de viento	164
Figura 78. Construcción del límite exterior de viraje después del punto P	165
Figura 79. Corte del área de tramo en línea recta, indicando las áreas primaria y secundaria.....	166
Figura 80. Distancias al punto de tangencia.....	176
Figura 81. Distancias al punto de tangencia teniendo en cuenta ángulo de divergencia de la radioayuda.....	176

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS, ABREVIATURAS Y TÉRMINOS AERONÁUTICOS

AAIM: (*Aircraft Autonomous Integrity Monitoring*) Integridad autónoma de monitoreo de aeronaves.

ACFT: (*Aircraft*) Aeronave.

AIP: (*Aeronautic Information Publication*) Publicación de Información Aeronáutica.

ATM: (*Air Traffic Management*) Gestión de tráfico aéreo.

ATS: (*Air Traffic Service*) Servicio de tránsito aéreo.

BARO-VNAV: (*Barometric Vertical Navigation*) Navegación Vertical Barométrica.

BRNAV: (*Basic Area Navigation*) Área de navegación básica.

DME: (*Distance Measuring Equipment*) Equipo medidor de distancia.

FAA: (*Federal Aviation Administration*). Administración de Aviación Federal

FL: (*Flight Level*) Nivel de vuelo.

FMS: (*Flight Management System*) Sistema de Gestión de Vuelo.

FANS: (*Future Air Navigation System*) Sistemas de navegación aérea del futuro.

FUA: (*Flexible Use of Airspace*) Uso flexible del espacio aéreo.

GNSS: (*Global Navigation Satellite System*) Sistema de navegación global por satélites.

GPS: (*Global Positioning System*) Sistema de Posicionamiento Global.

IAC: (*Instrument Approach Chart*) Carta de aproximación por instrumentos.

IFR: (*Instrument Flight Rules*) Reglas de vuelo por instrumentos. Reglas que deben observarse cuando se vuela en un mal tiempo y el piloto tiene que valerse de los instrumentos por la escasa visibilidad.

INS: (*Inertial Navigation System*) Sistema Inercial de Navegación. Sistema que percibe el movimiento del avión y produce una lectura digital de la posición.

IRS: (*Inertial Reference System*) Sistema de referencia inercial.

ISA: (*International Standard Atmosphere*) atmósfera estándar internacional.

LORAN: (*Long Range Navigation System*) Sistema de navegación de largo alcance.

MEA: (*Minimum Enroute Altitude*) Altitud mínima en ruta. Es la altitud más baja entre la navegación que asegura la cobertura de la señal de navegación aceptable.

NAVAID: (*Navigation Aid*) Ayuda a la navegación.

NDB: (*Non-Directional beacon*) Radio-faro no direccional. Método de navegación radio-enfilada a través de señales de radio emitidas desde puntos fijos.

NOTAM: (*Notice to Airmen*) Aviso a los aviadores.

OACI: Organización de la Aviación Civil Internacional.

PANS-OPS: (*Procedures for Air Navigation Services – aircraft Operations*) procedimientos de los servicios de navegación aérea – operación de aeronaves. Reglas para el diseño de procedimientos de aproximación y salida por instrumentos.

PBN: (*Performance Based Navigation*) Navegación Basada en el Performance. Es el rendimiento del avión.

PRNAV: (*Precision Area Navigation*) Área de navegación de precisión.

RAIM: (*Receiver Autonomous Integrity Monitoring*) Integridad autónoma de monitoreo de receptores.

RGCSPP: (*Review of the General Concept of Separation Panel*) Revisión del concepto general de panel de separación.

RNAV: (*Random Navigation*) Navegación de aérea. Le permite a un avión para elegir cualquier curso dentro de una red de radio-faros de navegación, en lugar de navegar directamente hacia y desde los radio-faros.

RNP: (*Required Navigation Performance*) Navegación requerida de performance. Le permite a un avión volar en una ruta específica entre dos puntos definidos en el espacio 3D.

RNPC: (*Required Navigation Performance Capacity*) Capacidad de performance de navegación requerida.

RNPSORSG: (*Required Navigation Performance Special Operational Requirements Study Group*) Navegación requerida de performance y Grupo de Estudio de Requisitos Operativos Especiales.

SID: (*Standard Instrument Departure*) Salida normalizada por instrumentos.

SKBO: Código OACI para el Aeropuerto Internacional El Dorado de Bogotá.

SKLT: Código OACI para el Aeropuerto Internacional GR. Alfredo Vásquez Cobo de Leticia.

STAR: (*Standard Terminal Arrival Route*) Rutas de llegada normalizada.

UAEAC: Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil.

VFR: (*Visual Flight Rules*) Reglas de vuelo visual. “para cuando hay buen tiempo y visibilidad.

VOR: (*Very high frequency Omni Range*) Radio-faro omnidireccional de frecuencia muy alta. Sistema de navegación que usa señales de radio pero sin datos sobre la distancia.

ABSTRACT

Through the study of Colombian airspace, currently used by airlines that comply with their flight itineraries, both commercial and cargo, was carried out a detailed analysis, especially on the conduct of each type of aircraft used in the airway Bogotá – Leticia (UB-689). This analysis took into account aircraft performance, both observable and quantitative performance that complies with their itineraries. This means that the route of each aircraft was assessed in real time through *FlightRadar24* app, which takes into account quantity indicators that define the aircraft performance (altitude, temperatures, speeds, etc.), the journey that they perform currently issued by the Special Administrative Unit of Civil Aeronautics, and the locations of the different airfields and airports in Colombia that allow to have on hand the information of the distances that each aircraft cover. After obtaining these dates, there were employed weight calculus, specific fuel consumption, aerodynamic coefficients, reference speeds, engine power and atmospheric conditions that influence in the aircraft performance, such that there can use of these calculus to obtain graphs that resume the aircraft operation and the effectiveness of the airways, to determinate which of these are in optimum and critical operability conditions. The next step was to make a graphic and quantitative modification of the airways that show a critical conduct, in accord to the obtained results in the calculus, thus allowing to make a feedback of the same calculus, but in this time with modified airways data, to take again the graphs of conduct and making a comparison with the obtained graphs in the first calculi. In this way, it was solved the issue or question that was posed in the development of this Project.

Keywords: *Airspace, airlines, flight itineraries, aircraft performance, FlightRadar24, airfields and airports, critical airways, operability, calculus, modification of airways, comparison.*

RESUMEN

Mediante el estudio del espacio aéreo colombiano, actualmente utilizado por las aerolíneas que cumplen con sus itinerarios de vuelo, tanto comercial como de carga, se realizó un análisis detallado, especialmente en el comportamiento de cada tipo de aeronave empleado en la ruta Bogotá – Leticia (UB-689). Este análisis tuvo en cuenta el desempeño, tanto el desempeño observable como el desempeño cuantitativo, de las aeronaves que cumplen con sus itinerarios. Esto quiere decir que se evaluó el recorrido de cada avión en tiempo real a través de la aplicación FlightRadar24, donde se tienen en cuenta los indicadores cuantitativos que definen la performance de cada aeronave (altitud, temperaturas, velocidades, etc.), el recorrido que éstos realizan de acuerdo con las cartas aeronáuticas que actualmente expide la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, y las ubicaciones de los diferentes aeródromos y aeropuertos de Colombia que permiten tener a la mano la información de las distancias que cada avión recorre. Después de obtenidos estos datos, se emplearon cálculos de peso, consumo específico de combustible, coeficientes aerodinámicos, velocidades de referencia, potencia de los motores y condiciones atmosféricas que inciden en el desempeño de los aviones, de tal manera que se puedan hacer uso de estos cálculos para obtener gráficos que resuman el funcionamiento de las aeronaves y la efectividad de las rutas aeronáuticas, para determinar cuáles de éstas se encuentran en condiciones de operatividad óptimas y críticas. El siguiente paso fue hacer la modificación gráfica y cuantitativa de las rutas que muestran un comportamiento crítico, de acuerdo a los resultados obtenidos en los cálculos, lo que permite que se haga una retroalimentación de los mismos cálculos, pero ésta vez con los datos de las rutas modificadas, para tomar de nuevo los gráficos de comportamiento y compararlos con los gráficos obtenidos en el primer cálculo, para sacar las conclusiones respectivas. De esta manera, se resolvió el interrogante o cuestionamiento que se ha planteado en el desarrollo de este proyecto.

Palabras clave: Espacio aéreo, aerolíneas, itinerarios de vuelo, performance de aeronave, FlightRadar24, aeródromos y aeropuertos, rutas aeronáuticas críticas, operatividad, cálculos, modificación de rutas aeronáuticas, comparación.

INTRODUCCIÓN

A través del tiempo, el campo aeronáutico ha experimentado muchos cambios en lo que respecta al uso de la información, el diseño de nuevos prototipos, el avance en la tecnología de las comunicaciones, en la propulsión de los diferentes tipos de aerodinámicos que se han construido por más de 100 años, el estudio contundente por parte de muchos ingenieros mecánicos y aeronáuticos, especialmente desde la época de la Segunda Guerra Mundial, lo cual permitió que la aviación militar se desarrollara en gran parte para aportar también al desarrollo de la aviación civil y comercial, que es el desarrollo más común hoy en día. Este desarrollo ha intervenido esporádicamente en el desempeño de las aeronaves, ya que se han establecido nuevas maneras de propulsar una aeronave y de equiparla adecuadamente, de acuerdo a los reglamentos y directrices que las autoridades aeronáuticas mundiales como la OACI y la FAA han expedido, lo que requiere que las aerolíneas y explotadores que operan estas aeronaves deban invertir tiempo y dinero para que sus flotas estén en operación continua y cumplan la misión que cada uno de éstos se proponen.

La misión de la ingeniería en general es resolver todos los problemas cotidianos que se presentan diariamente, mediante el uso del método científico y matemático. Trayendo a acotación dicha misión, se pretende resolver un cuestionamiento mediante la investigación cuantitativa, que permita abordar el problema de la falta de rendimiento en el desempeño de las aeronaves que cumplen con sus itinerarios y que hacen uso del espacio aéreo colombiano para desarrollar su trabajo diario. De esta manera, se busca demostrar que se está desaprovechando el espacio aéreo, y que es posible solucionar este problema mediante procedimientos dictados por los manuales y cálculos de performance, con lo cual se pueda ayudar a aumentar la operatividad aeronáutica en el país, y de paso, demostrar una vez más que la ingeniería trabaja mancomunadamente con las autoridades aeronáuticas, en pro de las mismas y de los explotadores de las aeronaves.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. MARCO CONCEPTUAL

Mediante el uso del Manual de procedimientos y generalidades de la Navegación Basada en la Performance (PBN) y el Manual de Diseño de Procedimientos para los Servicios de Navegación Aérea, en su segundo Volumen, ambos expedidos por la OACI; un seguimiento de los vuelos nacionales desde Bogotá hacia Leticia mediante la aplicación vía satélite de *FlightRadar24*, donde esta aplicación suministra datos de los aviones que cumplen con esos vuelos, tales como la altura, la velocidad con la que viaja dependiendo de la fase de vuelo en la que se encuentre, la ruta aeronáutica que cubre dicha aeronave y distancia recorrida por la misma, así como las cartas aeronáuticas correspondientes a la ruta que son utilizadas por estas aeronaves, las especificaciones de las aeronaves que se utilizan en estas rutas, y utilizando las teorías que se usan en performance de aviación para determinar datos exactos de las variables que se requieren hallar, se quiere realizar un estudio sobre el rendimiento de los aviones en dichos vuelos, para optimizar su operación actual con las modificaciones de las rutas críticas que existen. Teniendo en cuenta que si se optimiza tiempo, combustible y emisiones de CO₂, con la reducción de la distancia recorrida por la aeronave, habrá un beneficio económico para las aerolíneas que realizan los vuelos, y también habrá un beneficio para los propietarios de los aeropuertos, en este caso, la UAEAC, pues si las aerolíneas saben que con la modificación de las rutas pueden beneficiarse económicamente, la oferta por parte de las aerolíneas aumentaría, lo que puede significar el aumento de la operatividad aeronáutica en el país.

El concepto de RNAV (*RNAV* es acrónimo en inglés de *Random Navigation*), es un método de navegación que permite la operación de aeronaves en cualquier trayectoria de vuelo deseada, ya sea dentro de la cobertura de las ayudas a la navegación (VOR/DME, DME/DME, LORAN C, GPS/GNSS), dentro de los límites de las prestaciones de sistemas autónomos (INS/IRS), o de una combinación de ambas posibilidades.¹

¹ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL. Documento 9613 – Manual para la Navegación Basada en el Rendimiento (PBN), Vol. 1, Bogotá: Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2010, Pág I-(XXVI).

Técnicas RNAV²

Las técnicas RNAV permiten realizar vuelos por cualquier ruta elegida, dentro de la cobertura de disponibilidad e integridad de los sistemas utilizados, sin necesidad de volar sobre puntos fijos definidos por las radioayudas terrestres. Los equipos RNAV de a bordo determinan automáticamente la posición de la aeronave procesando los datos recibidos desde uno o más sensores y guían la aeronave de acuerdo a las instrucciones apropiadas de seguimiento de la ruta establecida por los puntos de recorrido fijados.

Para la determinación de la posición de la aeronave por los equipos RNAV de a bordo, los datos de entrada pueden ser obtenidos de los siguientes sistemas de navegación:

- DME/DME
- VOR/DME
- INS
- LORAN-C (con limitaciones de uso)
- GPS (con limitaciones de uso)

La calidad de la información de posición RNAV depende de dos elementos críticos:

- La precisión de las fuentes de entrada al sistema RNAV.
- La base de datos de navegación usada por el equipo RNAV.

Los sistemas RNAV se clasifican en cuanto a su potencialidad en:

- RNAV 2D: sistema capaz de realizar navegación de área en el plano horizontal.
- RNAV 3D: sistema que respecto al anterior se le ha agregado la capacidad de guía en el plano vertical.
- RNAV 4D: sistema que respecto al anterior se le ha agregado la función tiempo.

²AGENCIA ESTATAL DE SEGURIDAD AÉREA, Gobierno de España, Ministerio de Fomento. Madrid, 2013. [En Línea]

<http://www.seguridadarea.gob.es/lang_castellano/navegacion/programas/navegacion_area/conceptos.aspx> Consultado el 22/02/2015.

Beneficios de la RNAV³

- Flexibilidad en el diseño de la estructura de rutas ATS.
- Reposicionamiento de las intersecciones de las aerovías.
- Rutas más directas = mayor flujo de tránsito aéreo.
- Optimización de maniobras de espera.
- SIDs (Salida normalizada por instrumentos) y STARs (Rutas de llegada normalizada) optimizadas.
- Mejora de los perfiles de descenso.
- Uso más eficiente del espacio aéreo disponible, con rutas más flexibles y aplicación del concepto FUA (Uso Flexible del espacio aéreo).
- Reducción de las distancias de vuelo, mayor ahorro de combustible.
- Optimización de la infraestructura de navegación basada en tierra.
- Beneficios medioambientales: menores emisiones gaseosas de las aeronaves, debido a la optimización de las trayectorias, y menor impacto acústico gracias a la modificación de las rutas de salida y llegada.

Clasificación de los sistemas RNAV en cuanto a su método de navegación⁴:

- RNAV-1 o *PRNAV* (Precision Area Navigation): que requiere del equipo de a bordo una precisión de navegación lateral y longitudinal en ruta de ± 1 NM o superior durante el 95% del tiempo de vuelo. Este nivel de precisión se puede conseguir mediante DME/DME, GNSS o VOR/DME. También se puede mantener durante cortos periodos usando sistemas inerciales.
- RNAV-2: Similar al RNAV-1, la diferencia radica en que la precisión de navegación lateral y longitudinal en ruta es de ± 2 NM durante el 95% del tiempo de vuelo.
- RNAV-5 o *BRNAV* (Basic Area Navigation): Método de navegación que requiere del equipo de a bordo una precisión de navegación lateral y longitudinal en ruta es de ± 5 NM o superior durante el 95% del tiempo del vuelo. Este nivel de precisión se puede conseguir mediante DME/DME, GNSS, VOR/DME o con sistemas inerciales.
- RNAV-10 o RNP-10, desarrollado para operar en áreas remotas y oceánicas, y no requiere ningún tipo de ayudas a la navegación de base terrestre o evaluación de la infraestructura⁵.

³AGENCIA ESTATAL DE SEGURIDAD AÉREA, Op. Cit. Consultado el 22/02/2016.

⁴ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL. Documento 9613. Op. Cit. Pág. I-(XXV).

⁵Ibíd. II-B-1-2.

Ahora bien, el concepto de PBN (por sus siglas en inglés *Performance Based Navigation*), o Navegación Basada en la Performance, especifica los requisitos de performance del sistema para la operación de una aeronave a lo largo de una ruta ATS, en un procedimiento de aproximación por instrumentos o en un espacio aéreo especificado. Es una tarea y objetivo de la Organización de Aviación Civil Internacional redefinir las diferencias regionales de las especificaciones de la navegación por Área (RNAV) y la navegación de performance requerida (RNP) dentro de las aplicaciones globalmente armonizadas respecto al PBN⁶.

El PBN abarca la aplicación de la navegación, la especificación de la misma, y la infraestructura de las ayudas a la navegación. Con respecto a la especificación de la navegación, se tiene en cuenta primero el rendimiento de los sistemas de navegación (exactitud, continuidad e integridad); segundo, las funcionalidades del sistema (por ejemplo, tipo de pantallas); tercero, infraestructuras y sensores usables, y cuarto, los requerimientos para entrenamiento y práctica de controladores y tripulantes de vuelo. Con respecto a la aplicación de la navegación, se tiene en cuenta la aplicación el cual resulta de la especificación de la navegación y la infraestructura de las ayudas a la navegación, o *NAVAID*, que permite el vuelo de una aeronave en un espacio aéreo **designado**, en una ruta o en un procedimiento con el nivel de performance requerido. Y por último, con respecto a la infraestructura de las ayudas a la navegación, se tendrán en cuenta ayudas de tipo convencional y GNSS (por sus siglas en inglés, *Global Navigation Satellite System*) o Sistema Global de Navegación Satelital⁷.

⁶ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL. Documento 9613. Op. Cit. Pág. I-(XXXVII).

⁷AERONÁUTICA CIVIL, Ponencia: Introducción al concepto de PBN - Uso práctico de sistemas GNSS. Aplicaciones en el sector de la aviación. Bogotá: Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2012, Pág 11.

Categorías de aproximación de aeronaves para diseño de procedimientos⁸

- Categoría A: velocidad aerodinámica indicada (IAS) inferior a 169 km/h (91 kt)
- Categoría B: IAS de 169 km/h (91 kt) o superior, pero inferior a 224 km/h (121 kt)
- Categoría C: IAS de 224 km/h (121 kt) o superior, pero inferior a 261 km/h (141 kt)
- Categoría D: IAS de 261 km/h (141 kt) o superior, pero inferior a 307 km/h (166 kt)
- Categoría E: IAS de 307 km/h (166 kt) o superior, pero inferior a 391 km/h (211 kt)

Claves de referencia para pistas en los diferentes aeropuertos o aeródromos⁹

Tabla 1. Clave de Referencia de Aeródromo

Elementos 1 de la clave			Elementos 2 de la clave	
Núm. de clave (1)	Longitud de campo de referencia del avión (2)	Letra de clave (3)	Envergadura (4)	Anchura exterior entre ruedas del tren de aterrizaje principal ^a (5)
1	Menos de 800 m	A	Hasta 15 m (exclusive)	Hasta 4,5 m (exclusive)
2	Desde 800 m hasta 1 200 m (exclusive)	B	Desde 15 m hasta 24 m (exclusive)	Desde 4,5 m hasta 6 m (exclusive)
3	Desde 1 200 m hasta 1 800 m (exclusive)	C	Desde 24 m hasta 36 m (exclusive)	Desde 6 m hasta 9 m (exclusive)
4	Desde 1 800 m en adelante	D	Desde 36 m hasta 52 m (exclusive)	Desde 9 m hasta 14 m (exclusive)
		E	Desde 52 m hasta 65 m (exclusive)	Desde 9 m hasta 14 m (exclusive)
		F	Desde 65 m hasta 80 m (exclusive)	Desde 14 m hasta 16 m (exclusive)

a. Distancia entre los bordes exteriores de las ruedas del tren de aterrizaje principal.

⁸ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL. Documento 9905 – Manual de Diseño de Procedimientos de Performance de Navegación Requerida con Autorización Obligatoria (RNP AR). OACI: Montreal, Canadá, 2009. Pág. 3-1.

⁹ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL. Anexo 14 - Aeródromos, Montreal: OACI, 2004. Pág. 1-8.

1.2. MARCO HISTÓRICO

1.2.1. CONTEXTO INTERNACIONAL

El Comité Especial de Sistemas de navegación aérea del futuro (FANS) identificó que el método más comúnmente utilizado en los años 1970's – 1980's para indicar la capacidad de navegación requerida es obligatorio para prescribir el transporte de ciertos equipos. Esto limitado a la óptima aplicación de los modernos equipos de a bordo. Para superar este problema, la comisión desarrolló el concepto de capacidad de performance de navegación requerida (RNPC). FANS define RNPC como un parámetro para describir las desviaciones laterales de la trayectoria seleccionada o asignada, así como la posición a lo largo de la trayectoria de la precisión fijada sobre la base de un nivel de contención adecuado.

El concepto RNPC fue aprobado por el Consejo de la OACI y fue asignado a la Revisión del Concepto General de Panel de separación (RGCSP) para más detalles. El RGCSP, en 1990, señalando que la capacidad y el rendimiento fueron claramente diferentes y que la planificación del espacio aéreo depende de la medida de rendimiento, en lugar de diseñar en la capacidad, RNPC cambio a performance de navegación requerida (RNP). El RGCSP después desarrolló el concepto RNP, ampliando aún más que sea una declaración de la performance de navegación necesario para el funcionamiento dentro de un espacio aéreo definido.

Se propuso que un determinado tipo de RNP debe definir el rendimiento de la navegación de todos los usuarios dentro del espacio aéreo a ser adecuado a la capacidad de navegación disponible en el espacio aéreo. Los tipos de RNP que se identifican mediante un único valor de precisión previsto por FANS. Si bien esto se encuentra adecuado para su aplicación en áreas remotas y oceánicas, la orientación asociada para la separación de rutas no es suficiente para aplicaciones RNAV continental; esto se debió a una serie de factores, incluyendo los ajustes de rendimiento y normas funcionales para los sistemas de navegación de las aeronaves, trabajando dentro de las limitaciones del espacio aéreo disponible, y usando una comunicación más robusta, vigilancia y medio ambiente ATM. También se debe a consideraciones prácticas derivadas desde el desarrollo gradual de la capacidad RNAV junto con la necesidad de obtener beneficios a partir de equipo instalado.

Esto dio lugar a diferentes especificaciones de capacidad de navegación con precisión de navegación común. Se señaló que esta evolución es poco probable que ponga fin a la navegación vertical (3D) y navegación en tiempo (4D), posteriormente, se aplica en la ATM para aumentar la capacidad y la eficiencia del espacio aéreo.

Las consideraciones anteriores han presentado grandes dificultades a las organizaciones responsables para la implementación temprana de las operaciones RNAV en espacio aéreo continental. En la resolución de estos, significativa confusión ha desarrollado con respecto a conceptos, terminología y definiciones. En consecuencia, una divergencia de aplicación dio lugar a una falta de armonización entre las aplicaciones RNP.

El 3 de junio de 2003, la Comisión de Aeronavegación de la OACI, al adoptar medidas sobre las recomendaciones de la cuarta reunión de Panel del Sistema Mundial de Navegación por Satélite (GNSSP), designó a la performance de navegación requerida y Grupo de Estudio de Requisitos Operativos Especiales (RNPSORSG) para actuar como centro de coordinación para abordar diversas cuestiones relacionadas con la performance de navegación requerida (RNP).

El RNPSORSG examinó el concepto RNP de la OACI, teniendo en cuenta las experiencias de aplicaciones anteriores, así como las tendencias actuales de la industria, los requisitos de las partes interesadas e implementaciones regionales existentes. Está de acuerdo en la relación entre sistemas RNP y RNAV, la funcionalidad del sistema y las aplicaciones desarrollaron el concepto PBN, que permitirá la armonización mundial de las aplicaciones existentes y crear una base para la armonización de las futuras operaciones¹⁰.

¹⁰ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL. Documento 9613. Op. Cit. Pág. I-(XII).

1.2.2. CONTEXTO NACIONAL

Colombia comenzó a ser testigo de los prodigios de la navegación aérea el 12 de junio de 1843, cuando el argentino José María Flores se elevó sobre Popayán a bordo de un globo inflado con gas de petróleo. Flores hizo un vuelo similar sobre Bogotá el 27 de octubre de 1845, desde el patio principal del colegio mayor de Nuestra Señora del Rosario. Sus hazañas tuvieron como escenario posterior las ciudades de Medellín, Barranquilla y Tunja. Veinte años después, el mexicano Antonio Guerrero ofreció una exhibición en el Parque Berrio de Medellín: allí colgado de un globo, realizó todo tipo de piruetas que hicieron las delicias de los espectadores. Los anales de la aviación civil registran asimismo al canadiense John Smith, quien hizo en Barranquilla un vuelo de acrobacia deportiva, en diciembre de 1912. Más adelante, Smith, un joven de 21 años, se trasladó a Medellín, donde, el 26 de enero de 1913, efectuó un vuelo sobre la ciudad, a bordo de un avión Farman.

Después llegó a Barranquilla el norteamericano Knox Martin, quien habiendo entablado amistad con Carlos Obregón y Ulpiano Valenzuela, los acompañó a Estados Unidos donde adquirieron un avión Curtis Standard construido en madera y tela, propulsado por un motor de 150 HP para hacer deportes, acrobacias y vuelos cortos. Esta fue la famosa aeronave en la cual Martín hizo su primer vuelo de correo el 18 de junio de 1919, al cual invitó a Mario Santo Domingo¹¹.

La primera aerolínea

En septiembre de 1919, Guillermo Echavarría Misas recibió un catálogo de los aviones fabricados por la casa de Henry Farman y sus hermanos, pioneros de la aviación francesa. Esta circunstancia hizo que Echavarría Misas motivara a su padre, Alejandro Echavarría, para que con un grupo de amigos, conformara la compañía Colombiana de Navegación Aérea.

¹¹ PÉREZ, Sonia. Convenio de Operaciones Internacionales de Salvamento y Extinción de Incendios en la Frontera Amazónica entre Colombia y Brasil. Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, Bogotá, 2001 [En línea] < <http://www.aerocivil.gov.co/Educacion/CEA/Documents/Curso%20SEI%20029%20Proyecto%201.pdf>> Consultado el 20/09/2016. Página 18.

La compañía despegó con cuatro aviones F-40 de cuatro sillars, con cabina descubierta y motor atrás, así como un avión F-60 tipo Goliat, con capacidad para 14 personas. Este era el aeroplano de moda, por haber hecho, sin escalas un vuelo desde la capital francesa hasta Casablanca en África. El 3 de septiembre de 1919, el presidente Marco Fidel Suárez suscribía un documento que otorgaba a la empresa recién constituida el derecho a transportar correo aéreo y pasajeros en el territorio Colombiano. En enero de 1920 llegaron a Cartagena los dos primeros aviones Farman. Allí fue necesario construir un hangar que pudiera recibir tanto a los aviones que tenían ruedas como a los provistos de flotadores. El hangar fue construido en Boca grande, en los terrenos donde hoy se levanta el hotel Caribe El 15 de febrero de 1920, monseñor Pedro Adán Briosci bendijo el avión "Cartagena" que, en su vuelo inaugural sobre bahía, llevó a bordo al alcalde de la ciudad, a la reina de la ciudad Tulia Martínez Martelo y a Guillermo Echavarría, gerente de la empresa aérea. El 22 de febrero se inauguraron los vuelos entre Cartagena y Barranquilla con cuatro kilos de correo. Uno de los primeros pasajeros fue el general Benjamín Herrera, quien realizó el 3 de marzo un vuelo entre las dos ciudades. Días después, el F-40 llevó de Cartagena a Barranquilla a Eduardo de la Espriella y a Mario Santo Domingo, padre, quienes fueron los primeros pasajeros con tiquete pagado que volaron a otra ciudad. Con la llegada del avión Goliat, de gran versatilidad para la época, la Compañía Colombiana de Navegación Aérea comenzó a extender sus vuelos a Santa Marta y luego a Medellín y Bogotá. Ya para entonces pilotaban las aeronaves dos aviadores franceses que habían participado en la primera guerra mundial: Jacques Jourdanet y Rene Bazín. El capitán Jourdanet tuvo que viajar de Cartagena a Medellín a través del río Magdalena y trasladarse posteriormente a lomo de mula a Bogotá para buscar terrenos, combustible, repuestos y todo lo necesario para establecer talleres y campos de aterrizaje, toda vez que en ese entonces cada compañía debía construir aeródromos para sus servicios particulares. Casi a los tres años de fundación, la compañía Colombiana de Navegación Aérea debió ser liquidada, agobiada por una serie de problemas como la crisis de los años 20, la falta de tecnología para poder mejorar el rendimiento de los aparatos franceses, los accidentes y los daños de las máquinas. A eso se sumaron imprevistos tales como la destrucción total de un avión que fue dejado amarrado a un árbol, a la orilla del Magdalena, en Puerto Berrio, tras haber sorteado varios problemas técnicos.

Cuando se disponía a partir al día siguiente 20 hacia Girardot, el capitán Bazín observó sorprendido cómo la aeronave fue hallada río abajo, luego de que un vendaval había hecho estragos en la madrugada¹².

El inicio de las comunicaciones aeronáuticas a través de la navegación por radioayudas con el auge de las aerolíneas colombianas

Después de los hermanos Wright, en Estados Unidos, y el brasileño Santos Dumont, se volvió cada vez más común la aviación. Quemada la etapa de quién inventa el mejor avión, comenzó la etapa de pensar en para que más serían buenos los aviones en el sentido práctico, y de allí a la aviación comercial el camino fue corto. Los primeros vuelos fueron del correo aéreo, y al poco tiempo se llegó a los vuelos de pasajeros. Ante la inminente popularización de la aviación como actividad comercial y la necesidad de unificación de criterios, la alternativa fue la Convención para la Reglamentación de la Navegación Aérea Internacional, reunida en París en 1919, que reglamentó los estudios, requisitos, equipos, y normas, como primer esfuerzo para formalizar la nueva actividad económica, y finalmente creó la Comisión Internacional de Navegación (también CINA) con carácter permanente.

Los primeros aviones en llegar a Colombia fueron adquiridos por Guillermo Echavarría Misas y una sociedad de barranquilleros y colonos alemanes quienes se unieron como fundadores de SCADTA (Sociedad Colombiana Alemana De Transportes Aéreos), en Diciembre 5 de 1919; ese mismo año el presidente Marco Fidel Suarez ordenó la creación de la Escuela Militar de Aviación y mediante la ley 126 de 1919 se autorizó por primera vez al poder ejecutivo para que reglamentara todo lo relacionado con la aeronavegación, ya que ni esas reglas ni la misma actividad existían antes. En un comienzo se creó la Comisión Técnica de Aviación para asesorar al Ministerio de Industria, despacho al cual estaba adscrita la Aviación Civil; al trasladar el conocimiento de los problemas de aviación al Ministerio de Guerra, se estableció una Dirección de Aviación. Otras naciones también notaron la importancia de la aviación como un medio útil para la defensa nacional, y el espacio aéreo pasó a ser propiedad de los estados.

¹² PÉREZ, Sonia. Op. Cit. Pág. 19.

Como es de notar, con seis aviones operando en todo el país no era necesario el servicio de control aéreo. SCADTA, la que se convertiría en Avianca años después, en poco tiempo se convirtió en la más próspera, entre otras, como la SACO (Sociedad Aeronáutica Colombiana) y la UMCA (Urabá, Medellín and Central Airways), la cuales compartieron los cielos nacionales en esa época.

El 14 de Julio de 1940, SCADTA dejó de existir para convertirse en Avianca, que luego compró algunos terrenos para construir sus aeropuertos (Cali, Medellín, Barranquilla y Techo), y que incluían todos los servicios administrativos necesarios, como los de comunicaciones; las estaciones meteorológicas y el personal capacitado en tierra para hacer observaciones meteorológicas eran inexistentes, reduciéndose inicialmente al personal de pilotos quienes dependían de sus propias observaciones desde la cabina o como observaciones pre-vuelo; la meteorología aún no era una ciencia aplicada en la aviación, que se encontraba en pañales; las comunicaciones se limitaban a transmisiones telegráficas de tipo administrativo entre aeropuertos. Más tarde así como aumentaba el número de aviones y rutas se hizo necesario adoptar nuevas tecnologías.

La tecnología reinante consistía en pesados equipos de radiotelegrafía de tubos termoiónicos que eran negociados por las compañías aéreas: se calentaban mucho, fallaban frecuentemente pues el calor ablandaba las soldaduras y estas se fisuraban, sus repuestos eran costosos y difíciles de conseguir; quienes los usaban eran llamados radio-operadores.

Para quienes no conocieron los tubos termoiónicos o "tubos" como se les llamaba en el argot popular: esos tubos recibían su nombre por ser artefactos de vidrio de forma cilíndrica (tubular), también llamados tubos de vacío por ser cerrados y habérseles extraído totalmente el gas de su interior, dentro de ellos existía un calentador que era un filamento arrollado finamente, de alambre de aleación de wolframio, incandescente que calentaba un electrodo cilíndrico alrededor suyo, o cátodo, y alrededor de este una o más rejillas o espirales de metal que servían para controlar los electrones que saltaban desde el cátodo hasta un último electrodo o ánodo.

Tanto metal dentro de esos bulbos hacían al artefacto muy pesado, además el filamento calentador demoraba algo en calentar al cátodo, algo así como un minuto; pero lo peor era que por ser un elemento que se calentaba tarde o temprano se quemaba.

El radio-operador debía tener conocimientos del código Morse y las abreviaturas telegráficas especializadas, ya que transmitir mensajes largos resultaba costoso en energía y en tiempo, si había muchos mensajes era preferible transmitir la mayor cantidad en el menor tiempo posible; el código de abreviaturas y claves más usado era el código Q, cuyas claves consistían de tres letras que iniciaban con la letra Q (de ahí su nombre) y el cual se usó hasta la desaparición de la telegrafía en el año 2000.

Inicialmente los mensajes trataban de la aeronave y su carga humana y material, correo y horas de salida y, cuando estaban disponibles, informes meteorológicos del destino proyectado, por parte del radio-operador, los cuales eran muy escasos y se reducían a reportar si había lluvia o niebla o si era soleado, nada más técnico que eso.

El radiotelégrafo, ahora en desuso, consistía en un transmisor de radio de gran potencia de onda continua (CW) que mediante un manipulador interrumpía, a intervalos preestablecidos la energía, electromagnética que llegaba a una gran antena desde el transmisor, formando "puntos y rayas" audible; dependiendo de la duración del pulso de señal, eran recibidos y decodificados a distancia por un radio operador entrenado que las transcribía a texto. Las antenas eran enormes esqueletos de metal paralelos que servían de soporte a una antena de alambre tendido entre ellas, a la que popularmente llamaban *cuelgatrapos* debido a su gran parecido con un tendedero de ropa.

Las señales eran suficientemente poderosas y adecuadas para los mensajes referentes al tránsito aéreo que operaba, pero con el aumento de volumen aéreo, los equipos se hicieron obsoletos, pues se hicieron necesarias mayor rapidez y mejor calidad de transmisión, lo que impulsó la investigación de nuevos materiales y nueva ingeniería.

En los años tempranos de la aviación en el mundo no existía la experiencia ni la densidad de tráfico que mostrara la necesidad del Control de Tránsito Aéreo, sin embargo, habían notado la necesidad de algunos artilugios, como el uso de fogatas en los días oscuros o nublados y aún en la noche para guiar a los pilotos del correo en rutas preestablecidas, pero no había un consenso al respecto ya que la investigación era espontánea en los inventores que por su oficio eran individualistas. Y todo estaba por inventarse para la aviación. Al no haber reglamentaciones al respecto los explotadores de la aviación comercial experimentaban, creaban como podían artificios o procedimientos o copiaban aquellos que habían observado funcionaban mejor en otros aeropuertos que hubieran conocido, o lo que se les había referido durante tertulias o en sus averiguaciones personales.

Cuando Avianca inició sus operaciones aéreas en Colombia había asumido prestación de servicios de Control, Meteorología y comunicaciones para sus aeronaves. Una de las disposiciones de la OACI, como órgano rector del transporte aéreo mundialmente aceptado, fue que los estados firmantes deberían ser responsables de la administración del espacio, sus instalaciones y su seguridad, en otras palabras serían los gobiernos respectivos los que administrarían el transporte aéreo.

Se recurrió al uso frecuencias HF para comunicaciones orales que eran compartidas por aeronaves (servicio móvil) y las estaciones del servicio fijo aeronáutico (transmisión de datos de operación y administrativos entre estaciones terrestres), el uso de telegrafía (CW) era usado por los servicios fijos de telecomunicaciones para intercambio de mensajes de progreso de vuelo y administrativos entre dependencias de control.

Después, fueron los radiofaros NDB que eran la última tecnología en ese momento, tal como ha sido la costumbre en seguridad aérea, con las mejores prestaciones que existían en el mercado de la aviónica mundial, las primeras y más confiables radioayudas pero, a pesar de ello, eran poco precisos y susceptibles a interferencia radioeléctrica ocasionada por los rayos, los cuales creaban lecturas erróneas y oscilantes en los equipos de radionavegación de abordó (el mal tiempo y la mala visibilidad eran la causa más frecuente de accidentes aéreos fatales), y la pérdida de calidad de las señales con la distancia desde el transmisor.

Estos dispositivos, a pesar de tales deficiencias que en nuestros días serían absurdas, en su momento permitieron definir rutas aéreas seguras y con relativa facilidad para ser seguidas por los pilotos experimentados y entrenados en navegación instrumental.

Ya para el año de 1974, durante el gobierno de Misael Pastrana Borrero entró en operación el radar THOMSON primario/secundario, lo cual significa técnicamente y en lenguaje llano que comparte la capacidad de detección de objetos en el aire mediante la lectura directa de un haz de radio reflejado en el dicho objeto hasta la antena del dispositivo (radar primario) y la capacidad de un segundo sistema (radar secundario) más avanzado que identifica inequívocamente el blanco, de modo que el controlador ya no tendría dudas de quien es quien en el aire. El equipo contaba con cuatro ventanas con numeración ajustable en el tablero de control junto al iconoscopio para programar cuatro códigos de radar, consistentes en cuatro cifras que el piloto debería también seleccionar en su cabina para poder ser identificado: el equipo presentaba a las aeronaves en el fondo negro con cuatro símbolos no alfa-numéricos: Una raya, un cuadro, una raya y un cuadro, dos rayas, dos cuadros, obviamente blancos.

Inicios de la Aeronáutica Civil como Unidad Administrativa Especial y su papel en la modernización de infraestructura aeronáutica.

En aquel entonces, la UAEAC como Departamento Administrativo de Aeronáutica Civil y el Fondo Aeronáutico Nacional, en el año de 1984, determinaron un convenio con la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, cuyo objetivo es establecer los términos y condiciones bajo los cuales la FAA proveerá ayuda al DAAC/FAN, para el desarrollo y modernización de la infraestructura de la aviación civil de la República de Colombia, en las áreas Gerencial, Operativa y Técnica.

Dentro del plan de modernización del estado en 1992 se reestructuran, suprimen y fusionan entidades de la rama ejecutiva de orden nacional como el Ministerio de Transporte mediante el decreto 2171 de Diciembre 30; en 1993 se dictan varias disposiciones sobre transporte, y se redistribuyen competencias de recursos entre la nación y las entidades territoriales, se modifica la estructura de la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil y se determinan sus funciones.

Esas disposiciones no se hacen esperar, se tramita rápidamente su puesta en marcha. En 1994 el Departamento Administrativo de Aeronáutica Civil (DAAC) se reestructura y pasa a ser dependencia del ministerio de transportes, ya no de la presidencia como departamento administrativo, se convierte en Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (UAEAC), su Director es el doctor Fernando Zarama Vásquez, y la doctora Doralba Barco gerencia el aeropuerto de Rionegro.

Se crean las Direcciones Regionales de Aeronáutica, lo cual permite agilizar la solución de los problemas al descentralizar la administración ya que las necesidades de los aeropuertos no deben hacer fila entre todas las bases del país, lo cual dejaba pocas probabilidades a los aeropuertos de provincia. La nueva Aerocivil asimila a muchos de los trabajadores anteriores, prescinde de otros y crea nuevos cargos: el viejo Departamento Administrativo de Aeronáutica Civil desaparece y pasa de inmediato al olvido¹³.

¹³ VILLOTA, Belfor. Historia breve del Control Aéreo en Colombia. [En línea]
<<http://atchistory.blogspot.com.co/search/label/HISTORIA%20DEL%20ATC>> Consultado el 21/09/2016.

En el momento en que la UAEAC es creada bajo la nueva estructuración del estado, empiezan a realizarse estudios para la implementación de radioayudas DME/DME, a través del Reordenamiento Institucional y Plan de Expansión del Sistema Aeroportuario, documento publicado en 1994, donde se presenta una propuesta de reordenamiento y financiamiento del sector aeronáutico, donde se busca mejorar la infraestructura aeroportuaria y de navegación aeronáutica, dando a entender que para ese entonces, el sistema requería ser modernizado y se necesitaba ampliar la cobertura de ese entonces para garantizar la confiabilidad del sistema nacional integrado, incluyendo que los niveles de mantenimiento no eran suficientes y ha existido un rezago frente al desarrollo tecnológico internacional. En ese momento, los sistemas con los que se contaban (NDB, VOR/DME, VOR e ILS) registraban porcentajes de obsolescencia mayores al 40%, y con cobertura menor del 56%, lo que llevó a implementar las radioayudas DME/DME, en aquel momento las más avanzadas en temas de navegación¹⁴.

Para el año 2001, la UAEAC implementó una red satelital que ha permitido al país mantener comunicación con todas las aeronaves que surcan el territorio nacional y con países vecinos. Dicho salto tecnológico consiste en mantener un sistema de comunicaciones satelital, independiente a los servicios prestados por otras compañías para el manejo de los servicios de transmisión de voz, datos y video. La compañía norteamericana Hughes Network Systems instaló 33 antenas para la recepción satelital de la información, lo cual ha permitido tener conexión entre los diferentes aeropuertos del país y las aeronaves que sobrevuelan el espacio aéreo colombiano¹⁵.

Finalmente, para el año 2009, la UAEAC implementó los sistemas de navegación RNAV/RNP, específicamente el RNAV-5, que es el actual sistema que trabaja para la navegación aérea en Colombia, tomando como punto de partida la reestructuración de las rutas aeronáuticas, para abolir por completo los sistemas convencionales que actualmente trabajan conjuntamente con el sistema actual.

¹⁴ DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. Reordenamiento Institucional y Plan de Expansión del Sistema Aeroportuario. Bogotá, 1994. [En Línea] <<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/CONPES/Econ%C3%B3micos/2727.pdf>> Consultado el 21/09/2016. Página 7.

¹⁵ PRIETO, Carlos. Era Satelital Llegó a la Aerocivil. Artículo de El Tiempo. Bogotá, 2000. [En Línea] <<http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-1246947>> Consultado el 21/09/2016.

1.3. MARCO INSTITUCIONAL

La entidad a cargo de este proyecto es la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, ente regulador que es semindependiente al Ministerio de Transporte, encargada de realizar todas las funciones de reglamentación, gestión y planeación para desarrollar las actividades aéreas en el país, haciendo cumplir también todos los estatutos que son expedidos por los entes reguladores internacionales, como la FAA (*Federal Aviation Administration*) y la Organización de Aviación Civil Internacional – OACI. Igualmente, una de sus funciones principales es la de coordinar con el Ministerio de Transporte la definición de políticas y planes generales de aeronáutica civil y transporte aéreo, dentro del plan global del transporte, propendiendo por el desarrollo aeronáutico y aeroportuario del país.¹⁶

1.4. MARCO GEOGRÁFICO

Este punto no aplica en el proyecto, ya que no afectará directamente una población o una región cuando se ejecute la propuesta.

¹⁶AERONÁUTICA CIVIL, Funciones de la Aerocivil. Bogotá, 2015. [En Línea]
<<http://www.aerocivil.gov.co/Aerocivil/NEntidad/Paginas/Funciones.aspx>> Consultado el 04/12/2015.

1.5. MARCO LEGAL

Las referencias legales tenidas en cuenta para este proyecto son los siguientes:

Normas nacionales:

- Respecto a los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia: Parte Cuarta del RAC – Normas de Aeronavegabilidad y Operación de Aeronaves, numerales 4.2.2.3, 4.5.6.29, 4.6.3.12 y 4.15.2.17.3, que hablan sobre los requisitos de instrumentación y equipos para aeronaves civiles, requisitos de equipos de comunicaciones tanto en reglas de vuelo VFR como IFR, y sobre las especificaciones de operación del explotador, respectivamente; Parte Sexta del RAC – Gestión de Tránsito Aéreo, numerales 6.10.2 y 6.10.3, que hablan sobre el establecimiento de las Rutas ATS basadas en especificaciones de navegación RNAV/RNP (PBN) y sobre las operaciones RNAV/RNP en áreas terminales, respectivamente, y Parte Decimoquinta del RAC – Servicios de Información Aeronáutica, numerales 15.5.1.1.1, 15.5.3.5 y 15.8.1.2.1, que hablan sobre el inicio, publicación y expedición de los NOTAM.
- Respecto a las Circulares, Boletines Técnicos o Documentos expedidos por la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (UAEAC): Boletín Técnico BT-5100-069-002, que habla sobre el procedimiento para la aprobación de aeronaves y operadores para operaciones especiales RNAV/RNP bajo el concepto PBN; Documento 9613 – Manual de Navegación Basada en la Performance, Volumen I y Circular Informativa N° 5103-082-036, que habla de los Procedimientos para la aprobación de las operaciones RNAV, publicado el 25 de agosto de 2015.

Normas internacionales:

- Manual para procedimientos de los servicios de navegación aérea. Operación de aeronaves (PANS-OPS) – Organización de Aviación Civil Internacional. Documento 8168. Vol. II: Construcción de procedimientos de vuelo visual y por instrumentos.
- Manual para procedimientos de Navegación Basada en la Performance (PBN) – Organización de Aviación Civil Internacional. Documento 9613. Volúmenes I y II.
- Resolución A37-11 – Organización de Aviación Civil Internacional, Metas globales de la Navegación Basada en la Performance.

- Concepto operacional de gestión de tránsito aéreo mundial - Organización de Aviación Civil Internacional. Documento 9854.
- Plan Mundial de Navegación Aérea 2013 - 2028 - Organización de Aviación Civil Internacional. Documento 9750 - AN/963.
- Manual de Servicios de Aeropuertos – Organización de Aviación Civil Internacional. Documento 9137.
- Anexo 14 de la OACI – Aeródromos.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente en Colombia, existen algunas rutas que son consideradas críticas, debido a que dichas rutas no contribuyen a que el rendimiento de las aeronaves que las utilizan sea más óptimo, dadas las circunstancias económicas por baja oferta y demanda de los vuelos que se desarrollan sobre estas rutas, y desde el punto de vista de ingeniería, se considera también que esas rutas poseen distancias innecesarias, es decir, que la aeronave recorre distancias adicionales, con lo cual esto perjudica de manera operativa y económicamente a los explotadores de dichas aeronaves, en este caso, las aerolíneas que cubren estas rutas pueden sufrir bajas económicas debido a que el consumo de combustible aumenta considerablemente, y así mismo, los costos por mantenimiento pueden elevarse debido a que las aeronaves están en mayor tiempo de operación. Para este caso, la ruta Bogotá – Leticia (UB-689) en su salida posee un recorrido que, teniendo en cuenta los avances en materia de navegación aeronáutica, es innecesario, dado que requiere hacer contacto con la radioayuda en tierra VOR/DME de Soacha, por lo cual el aumento de la distancia para iniciar la fase en ruta es considerable. Hablando en groso modo, dicha distancia supera los 30 km, que aunque a los ojos de muchas personas sea una distancia insignificante, por la frecuencia de los vuelos semanales, y dado a entender que hay tres aerolíneas que actualmente operan en esa ruta, la supresión de esa distancia puede ser traducida a reducción de costes por mantenimiento, combustible, emisión de gases de dióxido de carbono y, posiblemente, aumento de operatividad en las frecuencias que estas aeronaves realizarían en la propuesta que el grupo de trabajo quiere dar a conocer.

Con la propuesta que se plantea en este trabajo, teniendo en cuenta los detalles del problema, se espera que la operatividad aumente en los sitios más remotos y con rutas de grandes distancias, ya que al plantear mejorar la eficiencia y el rendimiento de las aeronaves mediante la reducción de distancias y tiempos en los recorridos, permite que las aerolíneas que poseen dificultades económicas puedan tener más posibilidades de poder desarrollar los vuelos en la ruta que le ha sido asignada, pues la reducción de tiempos de vuelo permite economizar combustible, tiempo de servicio, y por ende costos de mantenimiento, lo que le permite a la aerolínea ser más eficaz al poder brindarle el servicio a los usuarios que lo requieran, en menos tiempo y con costos estables o bajos.

La pregunta que plantea el problema es la siguiente:

¿Se pueden modificar rutas aeronáuticas mediante el concepto de la Navegación Basada en la Performance y los métodos matemáticos de los conceptos de Performance de los aviones para mejorar el desempeño y la operatividad aérea en la ruta Bogotá – Leticia (UB-689)?

3. JUSTIFICACIÓN

La justificación del proyecto está dada en la motivación de la realización de nuevas investigaciones en el campo de las operaciones aeronáuticas, desde el punto de vista de la ingeniería, con el fin de brindar soluciones de optimización y mejora en los procesos que conlleva este tipo de actividad en el medio aeronáutico, especialmente con el propósito de beneficiar a las dos partes que actúan en este medio, es decir, al ente regulador y a los propietarios o explotadores de las aeronaves, de tal manera que la eficiencia y la operatividad en el mismo medio aumente, propendiendo por un desarrollo más económico y dinámico en el campo aeronáutico colombiano, en materia de infraestructura y operaciones aeronáuticas. También se puede considerar una justificación el tener en cuenta más a fondo el rol de un ingeniero aeronáutico en la misma materia, puesto que el comportamiento en vuelo de una aeronave, también materia de estudio de un ingeniero de esta rama, es un factor clave para aportar soluciones que ayuden a mejorar la misma infraestructura que está siendo utilizada para el desarrollo de las operaciones aéreas.

Las ventajas y las desventajas del proyecto frente al tema son los siguientes:

- Ventajas relacionadas con sensores específicos y el método de desarrollo del espacio aéreo¹⁷:
 - Reduce la necesidad de mantener sensores específicos para las rutas y procedimientos, y sus costos asociados. Por ejemplo, mover una sola instalación terrena VOR puede afectar a decenas de procedimientos, como el VOR se puede utilizar en las rutas, aproximaciones VOR, aproximaciones frustradas, etc. Adición de nuevos procedimientos con sensores específicos aumentará este costo, y el rápido crecimiento en los sistemas de navegación disponibles haría rutas y procedimientos con sensores específicos inasequibles;
 - Evita la necesidad de desarrollar sensores específicos para las operaciones con cada nueva evolución de los sistemas de navegación, los cuales serían costos prohibitivos;
 - Permite un uso más eficiente del espacio aéreo (trazado de rutas, eficiencia en el consumo de combustible y la reducción del ruido);
 - Se aclara cómo se utilizan los sistemas RNAV, y

¹⁷ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL. Documento 9613. Op. Cit. Pág. I-(II).

- Facilita el proceso de aprobación operacional para los operadores al ofrecer un conjunto limitado de especificaciones de navegación destinados para su utilización.
- Desventajas:
 - En el proceso de transición de los sistemas convencionales a los sistemas RNAV para implementación del PBN es posible que la operatividad en el tema de las comunicaciones se vea afectada en su transcurso, ya que Colombia no ha hecho una completa transición de sus sistemas. A la fecha, la implementación completa de navegación RNAV/RNP no se ha realizado, debido a que el nuevo diseño de la malla estructural de las rutas ATS aún no ha sido completado. En el transcurso de la implementación inicial del RNAV-5, esta ha venido trabajando a la par con las rutas convencionales, por lo que aún no se ha realizado la total transición de navegación, de acuerdo a las bases CNS/ATM que la OACI aprobó hace algunos años.

De acuerdo con las ventajas y desventajas que se han mostrado anteriormente, se considera que este proyecto es completamente viable, ya que permite de manera flexible poder rediseñar el espacio aéreo para un uso más eficiente de éste, para beneficio del progreso de la operatividad aeronáutica en el país.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Proponer una modificación concreta y válida de la ruta aeronáutica BOGOTÁ – LETICIA (UB-689), aplicando el concepto de Navegación Basada en la Performance, para aumentar el aprovechamiento del espacio aéreo y mejorar la operatividad aeronáutica en Colombia.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Encontrar información pertinente sobre conceptos teóricos PBN, sobre diseño de rutas aéreas, cartografía, sobre los equipos utilizados en la ruta elegida, así como las especificaciones técnicas y variables cuantitativas como velocidades y alturas empleadas en cada uno de los vuelos.
- Realizar un seguimiento a la ruta aeronáutica de acuerdo con la información investigada, mediante un análisis de esas rutas, y mediante cálculos referentes a la performance (rendimiento, consumo específico de combustible, rango, endurance, etc.), teniendo en cuenta que ya se investigaron los datos cuantitativos correspondientes.
- Al haber realizado dicho análisis de la ruta actual, proceder a plantear la modificación de dicha ruta aeronáutica mediante un nuevo diseño de la ruta, incluyendo un segundo cálculo de performance con los datos modificados, y de acuerdo a esos resultados, comparar los resultados finales con los resultados del objetivo anterior, para concluir finalmente.

5. METODOLOGÍA

5.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación empleado para este proyecto es la investigación cuantitativa, ya que se deben emplear medios matemáticos tradicionales para medir los resultados de manera concluyente.

5.2. ETAPAS

5.2.1. PRIMER OBJETIVO ESPECÍFICO

Las tareas o etapas que se van a ejecutar para cumplir el primer objetivo son las siguientes:

- Primera etapa: Realizar la investigación y lectura sobre la conceptualización de la Navegación Basada en la Performance, sobre Performance en aviación y sobre los documentos necesarios para diseño de procedimientos en rutas aeronáuticas.
- Segunda etapa: Realizar la investigación de información sobre la ruta elegida, en todo lo que respecta a infraestructura aeronáutica (datos de aeropuertos, infraestructura de navegación, obstáculos actuales, terrenos, ubicación y planes maestros) y procedimientos en ruta.
- Tercera etapa: Realizar la investigación correspondiente a las especificaciones técnicas de cada aeronave, se tendrán en cuenta especificaciones geométricas, de peso, de performance, planta motriz, y de acuerdo a cada aerolínea que opera en la ruta elegida, investigar las capacidades de navegación con las que cuenta su flota.

5.2.2. SEGUNDO OBJETIVO ESPECÍFICO

Las tareas o etapas que se van a ejecutar para cumplir el segundo objetivo son las siguientes:

- Cuarta etapa: Monitorear los vuelos hacia los diferentes aeropuertos mediante la aplicación FlightRadar24. Este monitoreo consta de investigar qué aeronaves son utilizadas en las rutas correspondientes, duración del vuelo, ruta recorrida, altitudes en las diferentes etapas de vuelo, distancias y velocidades.
- Quinta etapa: Culminada la tercera etapa donde se obtienen datos importantes, se realizan los cálculos de performance con las distancias iniciales de las rutas, es decir, sin que las rutas hayan sido modificadas, para obtener resultados numéricos.

- Sexta etapa: Realizar el análisis de la ruta actual, de tal manera que permita realizar un segundo cálculo. Este análisis se hará visual, ya que se busca realizar la modificación de la ruta de acuerdo con el recorrido investigado, en donde el grupo de estudio se pondrá de acuerdo para determinar qué modificación se le hace a la ruta, a modo de reducir la distancia y llegar al mismo punto.

5.2.3. TERCER OBJETIVO ESPECÍFICO

Las tareas o etapas que se van a ejecutar para cumplir el tercer objetivo son las siguientes:

- Séptima etapa: Se plantea el diseño de la nueva ruta aeronáutica, previa aplicación de las directrices para diseño de procedimientos que la OACI expide, mediante el Documento 8168, Volumen II, y otros manuales. Dicho planteamiento consiste en la realización de planos, junto con los procedimientos y cálculos correspondientes a pendientes de ascenso y aproximación, diseño de SLO, evaluación de obstáculos y semianchura de área.
- Octava etapa: Se realiza el segundo cálculo de performance con las rutas aéreas modificadas, teniendo en cuenta los mismos parámetros del primer cálculo, con datos diferentes.
- Novena etapa: Obtenidos los resultados de los cálculos, se hace una comparación de los datos de ambos cálculos, para sacar las conclusiones respectivas.

5.3. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

La técnica empleada para la recolección de información es la técnica de observación, puesto que se utilizó software de automatización de datos que arrojó los ítems cuantitativos utilizados en este proyecto, y también permitió la observación de las rutas aeronáuticas en tiempo real para desarrollar el respectivo análisis.

5.4. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

5.4.1. RESUMEN DE PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN

La investigación ejecutada en el tema informativo arrojó resultados con gran variabilidad, resultados que en gran manera influyen en las circunstancias geográficas y topográficas del área terrestre por donde la ruta actual y la ruta propuesta se desempeñan, ya que se requiere tener en cuenta los obstáculos terrestres que interfieren en el normal desarrollo de las operaciones aeronáuticas, y los antecedentes por los cuales estos terrenos se han visto comprometidos con recientes accidentes y/o incidentes aéreos.

Los resultados también incluyen las distancias recorridas actualmente entre tramos de fases de vuelo, y las distancias recorridas modificando la ubicación de puntos de notificación, lo cual permitirá que haya una menor distancia recorrida en total, y de esta manera se pueda saber con exactitud si la aeronave recorre menos distancia que en la actual ruta que se utiliza. En primera instancia, se realizó la investigación sobre las dimensiones de las pistas de cada aeropuerto (elevación, temperaturas, dimensiones de franja, ubicación de radioayudas y obstáculos), con el propósito de aplicar estos datos en la construcción posterior de Superficies Limitadoras de Obstáculos. Se investigó también acerca de las aeronaves empleadas actualmente, en lo que respecta a especificaciones técnicas, desempeño y especificaciones de navegación con las que cuentan, de acuerdo a cada aerolínea involucrada actualmente en esta ruta, destacando que no todas las aerolíneas cuentan con los mismos sistemas de navegación de las aeronaves, debido a los altos costos de los equipos con los que deben contar para navegar en dicha especificación de navegación. También se realizó la investigación de cada una de las mediciones de superficies limitadoras de obstáculos, elemento esencial para la normal operación de los aeropuertos, de acuerdo al Anexo 14 y el Documento 9137, ambos expedidos por la OACI. Se incluye también la investigación sobre anchura y semianchura de área, ya que por especificación de navegación los tramos de ruta poseen diferentes anchuras y áreas tope que la aeronave no debe sobrepasar para no afectar la navegación y la comunicación con los servicios de tránsito aéreo, y los cálculos respectivos a dichas anchuras, teniendo en cuenta el Documento 8168, volumen II, también expedido por la OACI.

Finalmente, se tienen en cuenta las actuales cartas de navegación STAR e IAC, incluidas en el AIP de cada aeropuerto involucrado, con el fin de aplicar los respectivos procedimientos de llegada y de aproximación visual o por instrumentos. Al tener reunida toda esta información, se realiza el respectivo diseño de procedimientos.

5.4.2. RESULTADO DE LA ENCUESTA APLICADA A LAS AEROLÍNEAS

Los resultados de la encuesta fueron los siguientes:

- Operadores actuales de la ruta: Avianca Colombia S.A. y LATAM Colombia.
- Aeronaves utilizadas por Avianca en dicha ruta: Airbus A320-233, A319-132, A319-115, A318-112 y A318-111. Las aeronaves Airbus A330 y Boeing 787-8 se utilizan como alterno en ruta.
- Capacidad RNAV (AFM): Todas las aeronaves cuentan con capacidades RNAV/RNP 10, RNAV 5/2/1 y P-RNAV.
- Capacidad RNP (AFM): Todas las aeronaves cuentan con capacidades RNP 4/2/1 y RNP APCH.
- Capacidad Baro-VNAV (AFM): Todas las aeronaves cuentan con capacidad Baro-VNAV (AFM).
- Sensores de navegación: Todas las aeronaves cuentan con sensores de navegación VOR/DME, DME/DME, INS o IRS, y con GPS Primario dual TSO C129A/C145A/C146A.
- Integridad de los sistemas: Todas las aeronaves cuentan con integridad RAIM o AAIM y FDE.
- Sistema de Gestión de Vuelo o *Flight Management System* (FMS): Todas las aeronaves cuentan con sistema de gestión de vuelo dual.

Nota aclaratoria: Debido a demoras en la respuesta a la encuesta, no se pudo obtener información respecto a la aerolínea LATAM, con lo cual el resto del proyecto se basó en los resultados de la encuesta de capacidades que arrojó Avianca.

Teniendo en cuenta estos resultados, para el diseño de procedimientos se tuvieron en cuenta todas las capacidades de navegación.

Figura 1. Gráfica de capacidades RNAV (AFM)

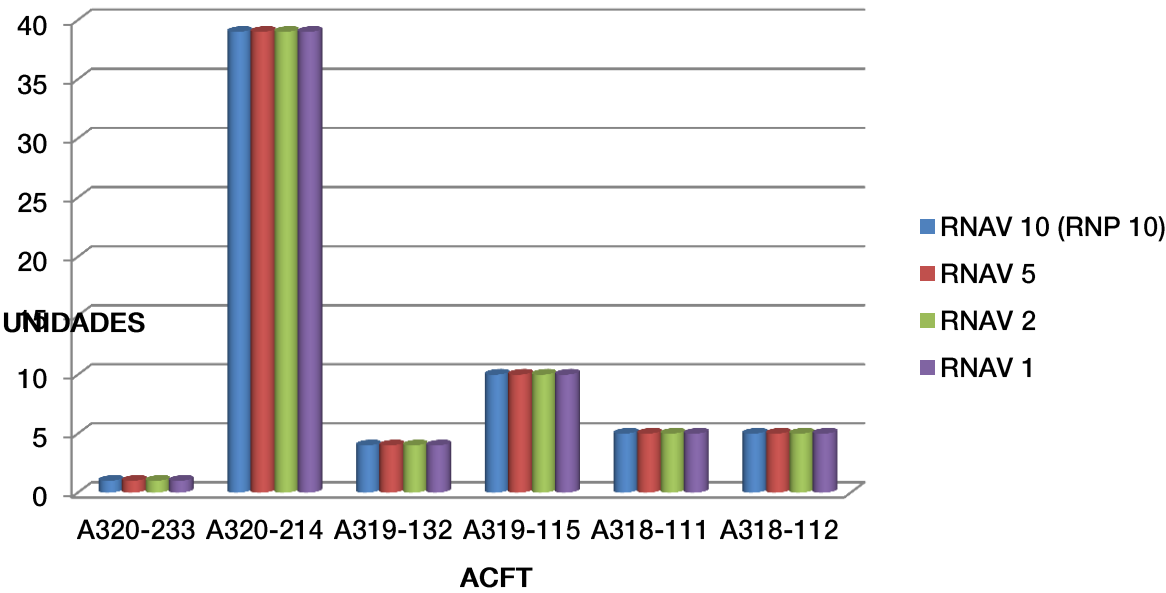


Figura 2. Grafica de capacidades RNP (AFM)

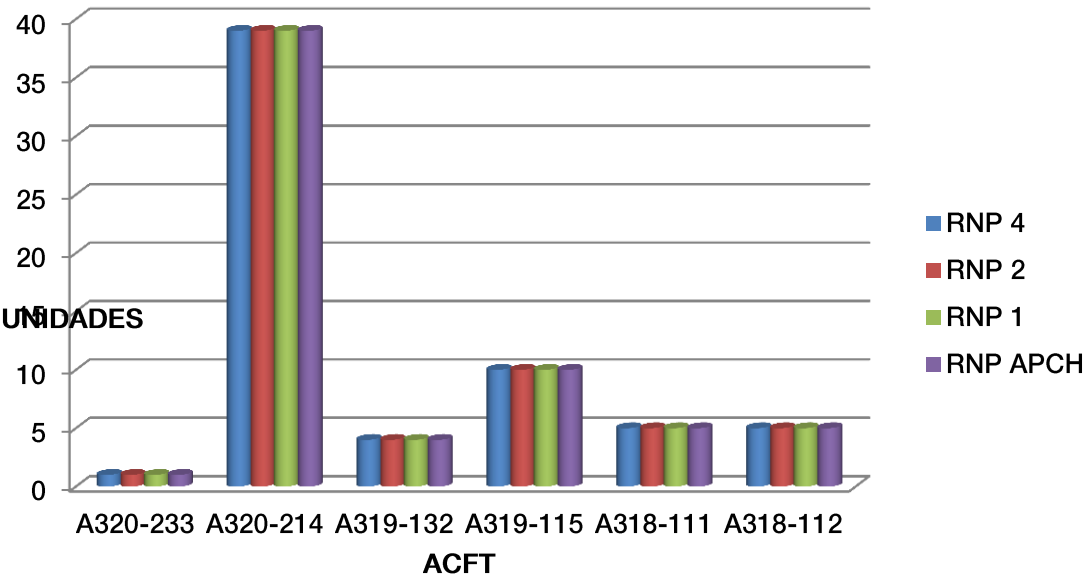


Figura 3. Gráfica de capacidades Baro-VNAV.

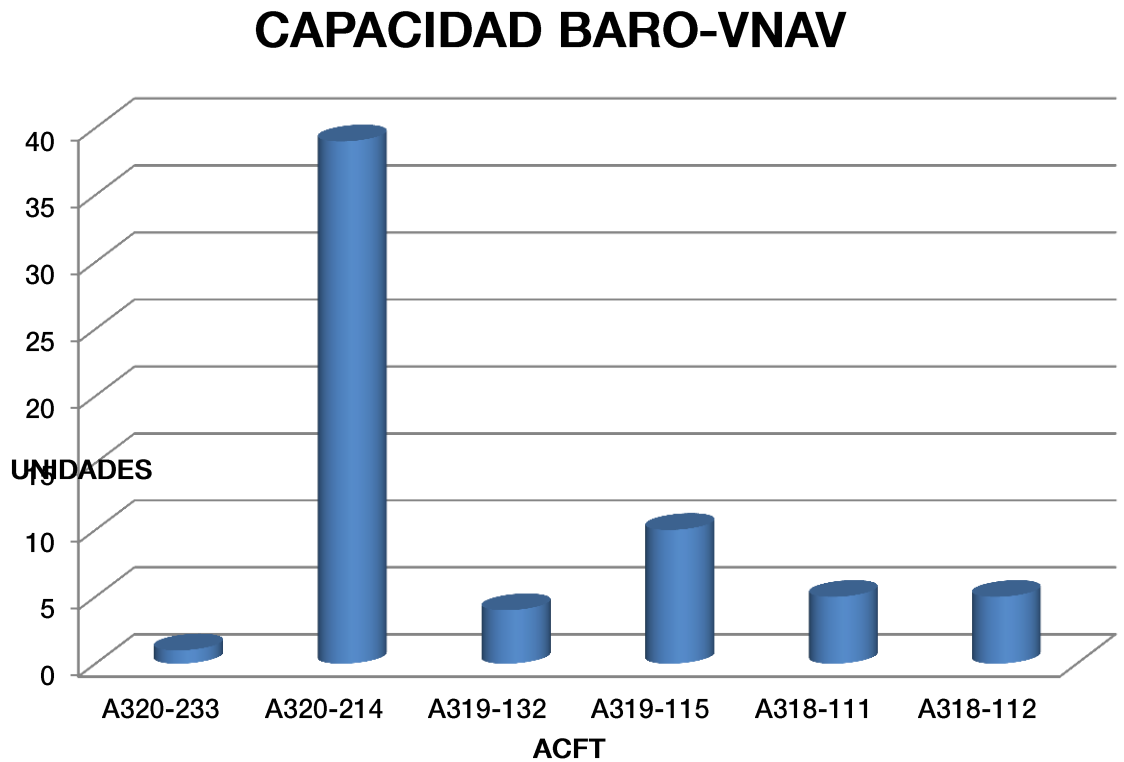


Figura 4. Gráfica de capacidades para sensores de navegación.

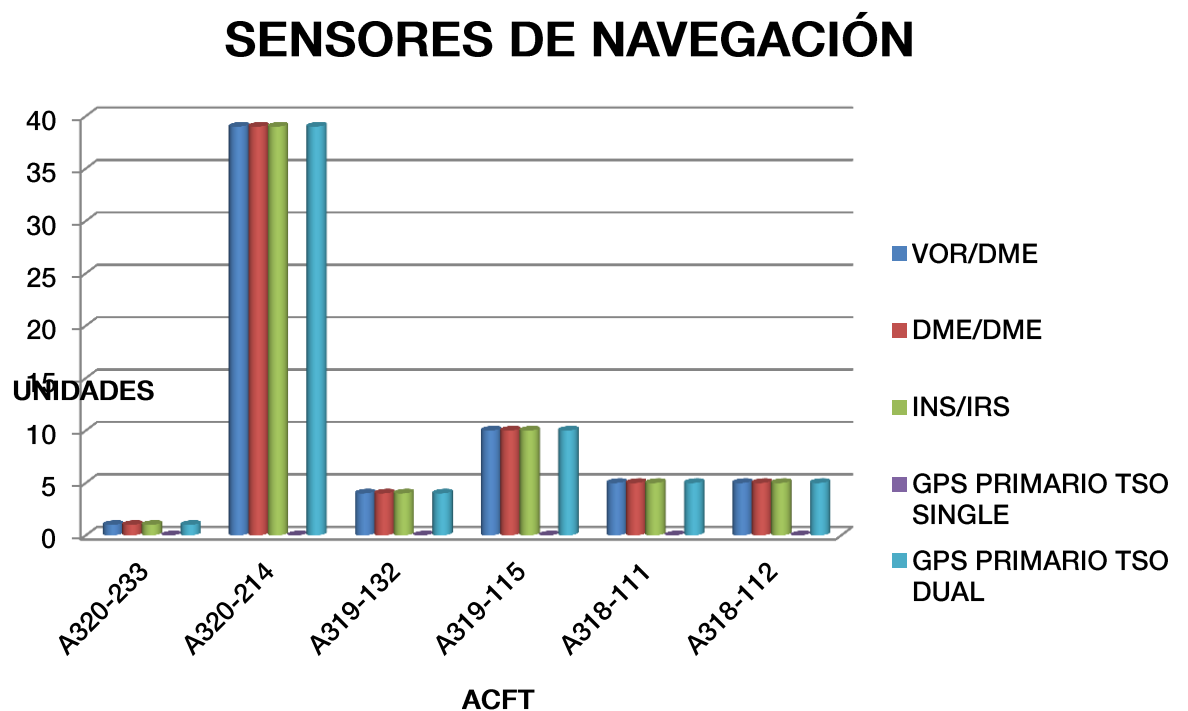


Figura 5. Capacidad de integridad de sistemas

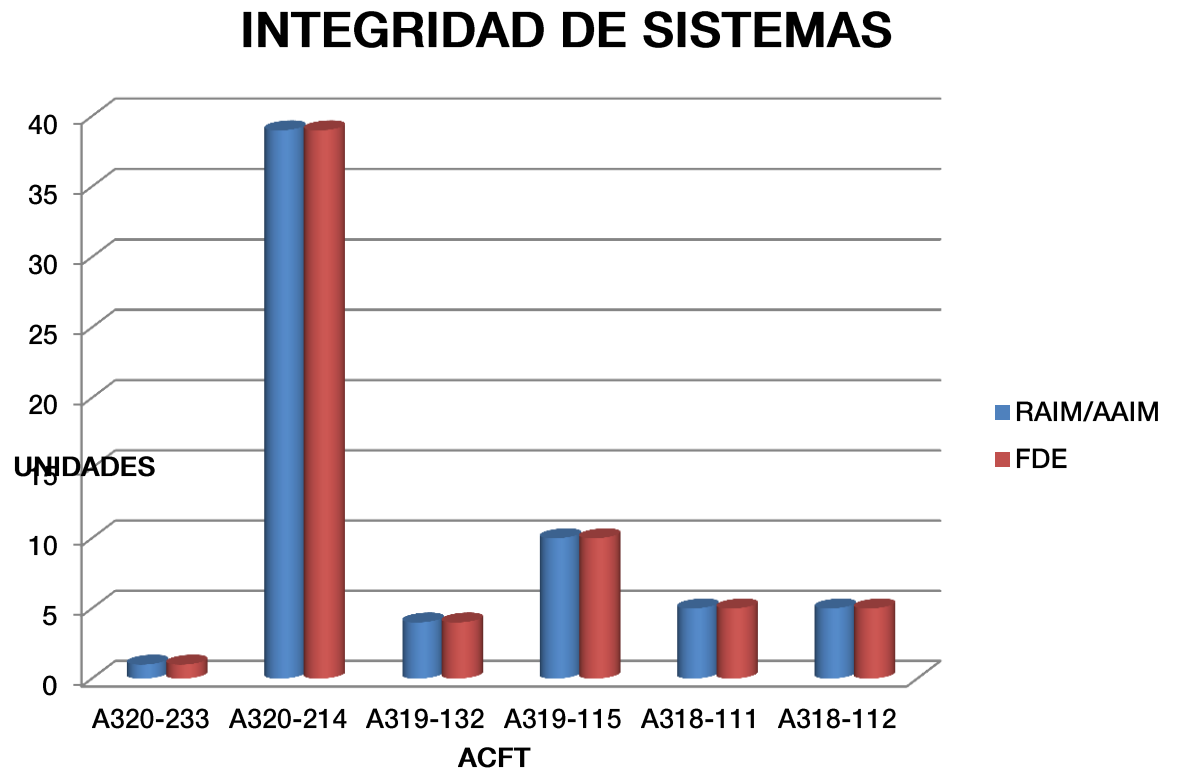
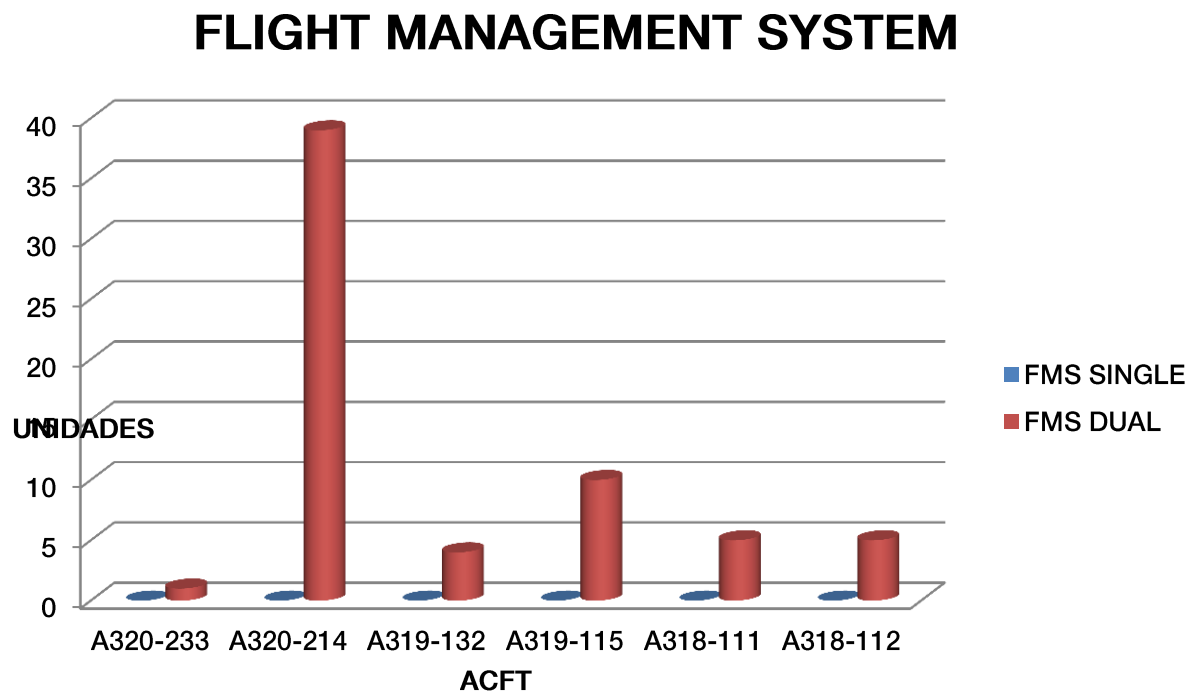


Figura 6. Capacidad de Sistema de Gestión de Vuelo (FMS)



5.4.3. MONITOREO DE LA RUTA BOGOTÁ – LETICIA (UB-689)

Las siguientes figuras muestran el comportamiento de la aeronave en la ruta, incluyendo los datos para los cálculos de performance (altura, velocidad, velocidad vertical, etc.)

Figura 7. Salida con viraje hacia el VOR/DME SOA.

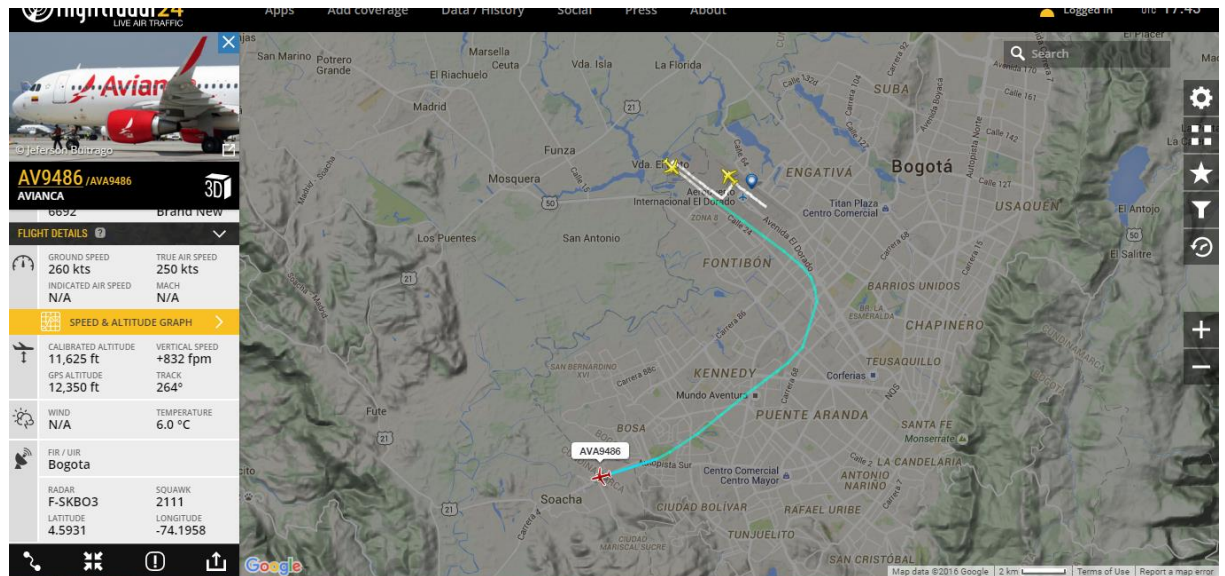


Figura 8. Ascenso de la aeronave.

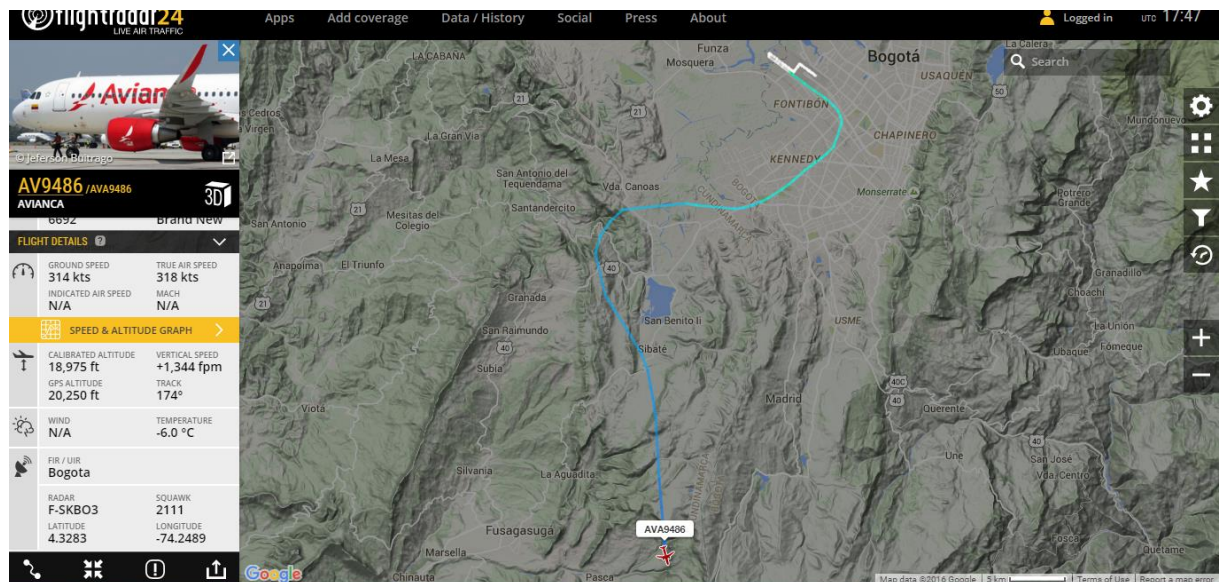


Figura 9. Inicio de estabilización de nivel de vuelo.

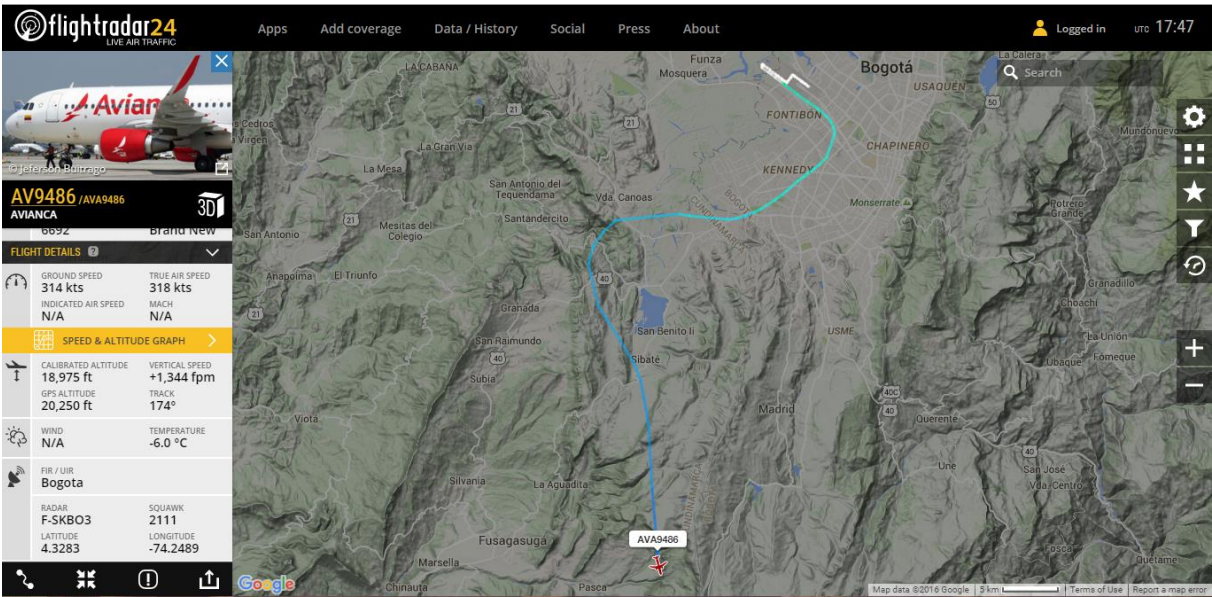


Figura 10. Vuelo estable de la aeronave, en el punto DANSA.

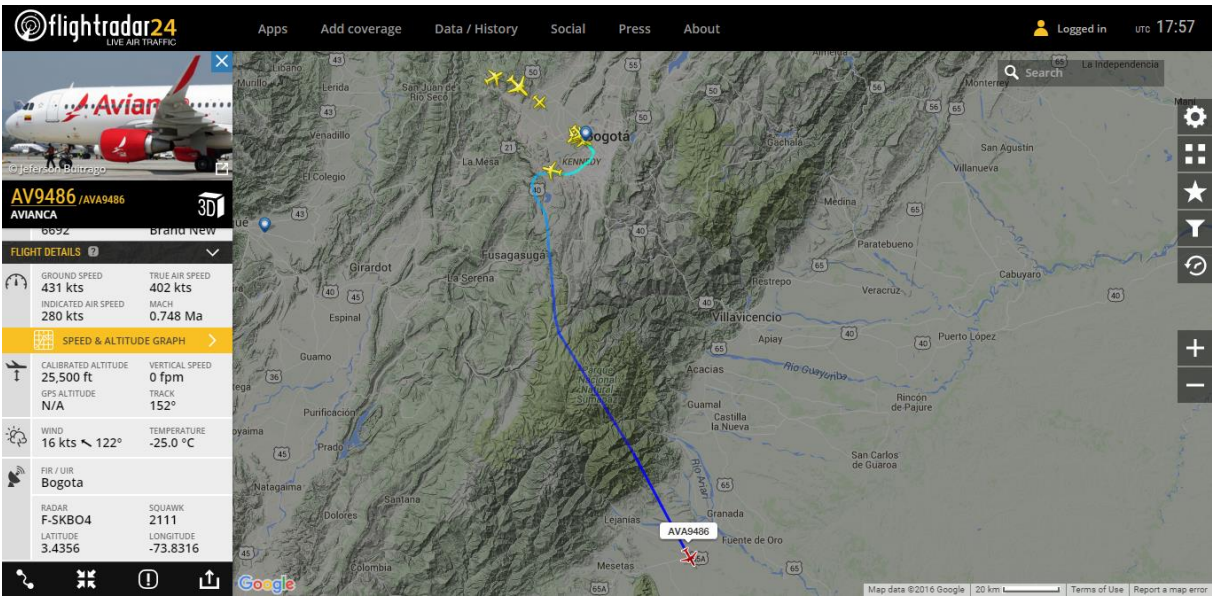


Figura 11. Vuelo con rumbo al VOR/DME SJE.

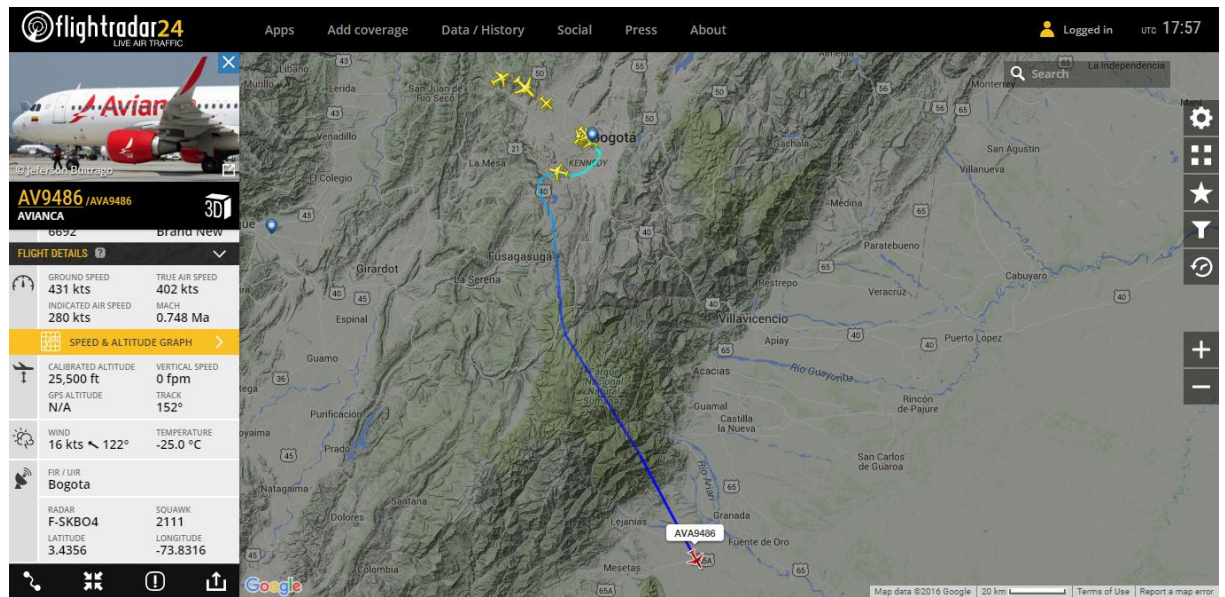


Figura 12. Vuelo estable rumbo al punto de notificación PABON.

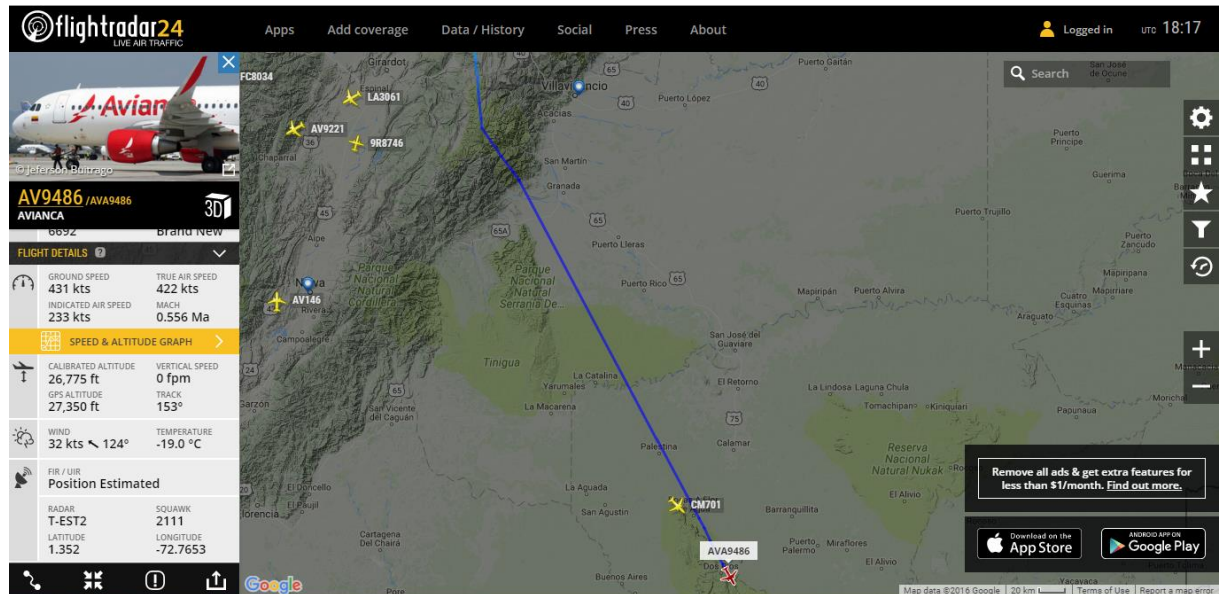
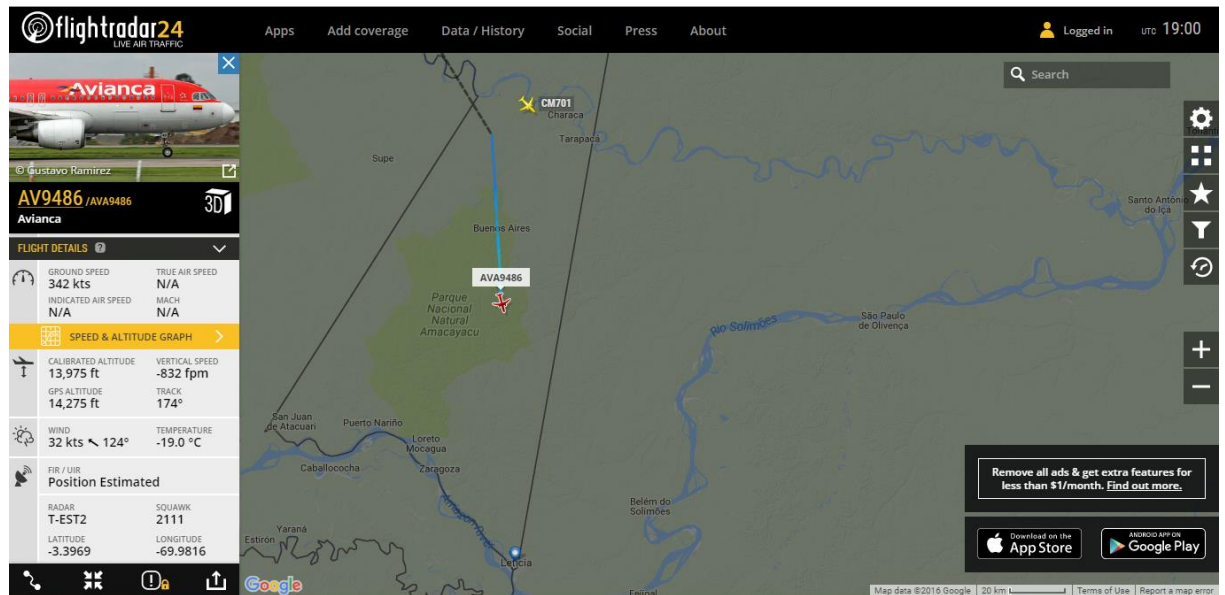


Figura 13. Aproximación a SKLT.



5.4.4. PRIMEROS CÁLCULOS DE PERFORMANCE

De acuerdo a las formulas descritas desde la página 96 hasta la página 104 de este documento, los resultados de los cálculos fueron los siguientes:

Constantes de cálculos de performance:

$$AR = 9.488$$

$$K = 0.0359$$

$$\rho_{SL} = 2,38 \times 10^{-3} \text{ slugs/ft}^3$$

$$T_{SL} = 288.16 \text{ K}$$

$$C_{L_{MAX}} = 1.6$$

$$e = 0.93$$

$$m_{\text{fuel}} = 1863.37 \text{ lbm}$$

Tabla 2. Resultados de cálculos de datos atmosféricos, velocidades, pesos, de tiempo y distancia.

ρ_{∞}	T_{∞}	V_{∞}	W	t	RC	M	d
1.67E-03	265.10	421.95	171947.53	0.05	13.87	0.38	18.40
1.31E-03	250.53	536.72	171869.19	0.12	22.40	0.48	41.55
1.15E-03	242.84	573.86	171809.83	0.17	20.27	0.51	26.96
1.05E-03	237.59	678.50	171657.71	0.28	0.00	0.61	83.71
1.00E-03	235.06	712.26	171590.50	0.33	0.00	0.64	58.80
1.00E-03	235.06	712.26	171467.65	0.43	0.00	0.64	67.26
1.00E-03	235.06	712.26	171406.23	0.48	0.00	0.64	67.70
1.00E-03	235.06	712.26	171242.43	0.62	0.00	0.64	90.71
1.05E-03	237.59	712.26	171076.68	0.75	0.00	0.64	105.77
1.32E-03	250.97	648.12	170460.47	1.28	-16.00	0.58	429.36
1.55E-03	260.44	577.23	170456.66	1.33	-13.87	0.52	56.13
2.02E-03	277.45	465.84	170439.59	1.43	-13.87	0.42	94.57
Distancia total							1140.92

Tabla 3. Resultados de cálculos aerodinámicos y de performance.

h	C_L	L [lbf]	θ	σ	TSFC _{jet}	$C_{D,0}$	C_D	T_R	$E_{m\acute{a}x}$
11625.00	0.88	171947.53	0.92	0.70	0.56	0.02767	0.0553	10841.91	15.860
18975.00	0.69	171869.19	0.87	0.55	0.60	0.00003	0.0171	4263.70	40.310
22850.00	0.69	171809.83	0.84	0.48	0.61	0.02757	0.0446	11131.33	15.435
25500.00	0.54	171657.71	0.82	0.44	0.65	0.00002	0.0105	3332.72	51.507
26775.00	0.51	171590.50	0.82	0.42	0.66	0.02486	0.0343	11487.27	14.937
26775.00	0.51	171467.65	0.82	0.42	0.66	0.00002	0.0094	3158.24	54.292
26775.00	0.51	171406.23	0.82	0.42	0.66	0.02486	0.0343	11480.49	14.930
26775.00	0.51	171242.43	0.82	0.42	0.66	0.00002	0.0094	3149.95	54.363
25500.00	0.49	171076.68	0.82	0.44	0.66	0.02268	0.0312	10952.20	15.620
18750.00	0.47	170460.47	0.87	0.56	0.64	0.00002	0.0078	2855.73	59.691
13975.00	0.50	170456.66	0.90	0.65	0.62	0.02642	0.0354	12053.89	14.141
5400.00	0.59	170439.59	0.96	0.85	0.58	0.00002	0.0125	3608.84	47.228
Z	V_R	$U_{m\acute{a}x}$	U_{min}	$V_{m\acute{a}x}$	V_{min}	V_{STALL}	W_{FW}	α	
3.6412	274.91	2.6725	0.3742	734.709	102.865	279.4533	52.47	1.88	
7.7359	400.59	3.9251	0.2548	1572.362	102.056	299.6139	130.81	2.39	
9.6484	447.24	4.3869	0.2280	1961.989	101.949	316.6180	190.17	2.02	
8.7312	425.21	4.1719	0.2397	1773.924	101.921	359.2621	342.29	0.00	
10.2398	460.19	4.5200	0.2212	2080.063	101.811	366.5961	409.50	0.00	
10.4564	464.76	4.5678	0.2189	2122.920	101.746	366.3254	532.35	0.00	
10.3733	462.58	4.5495	0.2198	2104.507	101.675	366.1938	593.77	0.00	
9.7513	448.28	4.4104	0.2267	1977.081	101.643	347.4875	757.57	0.00	
9.8374	450.15	4.4299	0.2257	1994.092	101.616	333.5855	923.32	0.00	
8.1882	410.55	4.0392	0.2476	1658.311	101.642	309.2861	1539.53	-1.41	
7.7309	398.63	3.9239	0.2548	1564.172	101.590	308.4074	1543.34	-1.38	
7.7350	398.63	3.9249	0.2548	1564.586	101.563	308.3670	1560.41	-1.71	

5.4.5. CÁLCULOS DE DISEÑO

Datos de relevancia general:

- Categoría del Airbus A318/19/20: Categoría C. 121 kt o más, pero menos de 140 kt de IAS¹⁸.

5.4.5.1. SUPERFICIES LIMITADORAS DE OBSTÁCULOS (SLO)

1) Superficie Horizontal Externa

El diseño de la superficie horizontal externa se basa en el centro de la unidad aeroportuaria sobre la cual se va a trabajar, y aplicado únicamente para los aeropuertos que tengan pistas con número de clave de referencia 4, de acuerdo a la clasificación hecha por la OACI. En este caso, tanto SKLT como SKBO poseen a 4 como número de clave de referencia, 4C y 4E, respectivamente.

Como se aclara en la información sobre cada una de las superficies, la superficie horizontal externa contará con un radio de 15 km con centro en la mitad de las instalaciones del aeropuerto, realizando el respectivo análisis de obstáculos que sean iguales o mayores a 150 m respecto a la elevación de dicho aeropuerto.

Ubicación de los obstáculos respecto al ARP de cada aeropuerto:

Obstáculos iguales o mayores a 150 m (492 ft) en la zona SKLT: No hay obstáculos con elevación mayor a 150 m.

Obstáculos iguales o mayores a 150 m (492 ft) en la zona SKBO:

- Torre Colpatría, a 13,12 km, con rumbo 147°. Cuenta con una altura de 199 m (652,72 ft)¹⁹.
- Edificio BD Bacatá, a 13,63 km, con rumbo 149°. Consta de dos edificios, el primero tiene una altura de 200 m (656 ft), y el segundo de 270 m (885.6 ft)²⁰.
- Edificio del Centro de Comercio Internacional, a 12,59 km, con rumbo 143°. Cuenta con una altura de 192 m (629,76 ft)²¹

¹⁸ AIRBUS, Toulouse, Francia. 2013. [En Línea]

<http://www.airbus.com/fileadmin/media_gallery/files/tech_data/General_information/Airbus_ICA_O-ARC_FAA-ADG_App-Cat-Feb2013.pdf> Consultado el 23/06/16.

¹⁹ ARQHYS ARQUITECTURA. Dimensiones Torre Colpatría, Bogotá. 2014. [En Línea]

<<http://www.arqhys.com/construccion/torre-colpatria.html>> Consultado el 03/07/16.

²⁰ EDIFICIOS BD BACATA. Dimensiones del edificio. Bogotá, 2015. [En Línea]

<<http://www.bdbacata.com/index.php/noticias/276-los-cuatro-rascacielos-que-le-cambiaran-la-cara-a-bogota>> Consultado el 03/07/16.

- Edificio Avianca, a 13,69 km, con rumbo 152°. Cuenta con una altura de 160,97 m (528 ft)²².
- Cerro de Monserrate, a 14,55 km, con rumbo 144°. Cuenta con una altura de 605 m (1984,4 ft). Elevación: 3152 m (10338,56 ft)²³.
- Cerro del Alto del Cable, a 13,09 km, con rumbo 134°. Cuenta con una altura de 622,51 m (2041,83 ft). Elevación: 3170 m (10397,6 ft)²⁴.
- Páramo de Las Moyas, a 14,6 km, con rumbo 116°. Cuenta con una altura de 652,51 m (2140,23 ft). Elevación: 3200 m (10496 ft).

2) Superficie horizontal interna

Para clave 4, en aproximación visual, las medidas de la superficie horizontal interna son las siguientes:

- Altura: 45 m
- Radio 4000 m

Dichas mediciones se realizan desde el punto de referencia de cada caso. Para el caso del proyecto, los puntos de referencia están ubicados en las cabeceras de cada una de las pistas involucradas; en el caso específico de SKBO, se juntan dos superficies horizontales internas, formando una sola superficie válida.

3) Superficie Cónica

Para clave 4, en aproximación visual, las medidas de la superficie cónica son las siguientes:

- Pendiente: 5%
- Altura: 100 m

La medición es tomada teniendo en cuenta los límites de la superficie horizontal interna, hallada anteriormente.

²¹ WIKIMAPIA. Dimensiones Edificio Davivienda, Bogotá, 2009. [En Línea]
<<http://wikimapia.org/4470055/es/Edificio-Centro-de-Comercio-Internacional>> Consultado el 03/07/16.

²² SKYSCRAPERPAGE.COM. Edificio Avianca, Bogotá, 2010. [En Línea]
<<http://skyscraperpage.com/cities/?buildingID=917>> Consultado el 03/07/16

²³ INSTITUTO DISTRITAL DE TURISMO. Santuario de Monserrate. Bogotá, 2012. [En Línea]
<<http://www.bogotaturismo.gov.co/santuario-de-monserrate>> Consultado el 03/07/16.

²⁴ LOBO-GUERRERO, Alberto. La Falla de Bogotá en Cundinamarca. Artículo PDF. [En Línea]
<http://www.logemin.com/eng/Download/pdf/23_Falla_de_Bogota_en_Cundinamarca_completo.pdf> Consultado el 03/07/16.

4) Superficie de aproximación

Para clave 4, en aproximación visual, las medidas de la superficie de aproximación son las siguientes:

- Longitud de borde interior: 150 m
- Distancia desde el umbral: 60 m
- Divergencia (a cada lado): 15%
- Primera sección:
 - Longitud: 2500 m
 - Pendiente: 3,33% (Convencional)
- Segunda sección: No aplica
- Sección Horizontal: No aplica.

5) Superficie de Transición:

La pendiente de la superficie de transición, usada en este caso, es del 20%.

5.4.5.2. PROCEDIMIENTO DE SALIDA

6) Superficie de ascenso en el despegue:

Para la superficie de ascenso en el despegue, no existen dimensiones y pendientes como los que se tienen en cuenta para las restantes superficies, en la tabla. Sin embargo, de acuerdo con los criterios que el Anexo 14 exige para el diseño de la superficie de ascenso, se procederá a evaluar los obstáculos que podrían interferir en el ascenso de la aeronave, teniendo en cuenta las pendientes de diseño de procedimientos, franqueamiento de obstáculos, altitudes mínimas de sector y en ruta, entre otros factores.

Siguiendo los parámetros anteriores, es de destacar que para empezar a diseñar la superficie de ascenso en el despegue, como diseño de procedimiento de salida, es necesario definir qué tipo de salida se empleará en la operación ejecutada, teniendo en cuenta el aeropuerto de salida de los aviones. En el caso del aeropuerto de Leticia, la salida empleada será una salida con viraje, y dicho viraje será con un punto de viraje no definido por el sobrevuelo de una instalación; para el caso del aeropuerto de Bogotá, se realizará una salida recta sin guía de derrota.

Datos para construcción de superficie de ascenso en SKLT:

- Pendiente de diseño de procedimiento (PDG): 5%²⁵.
- MOC: 295 ft.
- Pendiente de la superficie de identificación de obstáculos (OIS): 2,5%
- Longitud del área primaria de despegue: 1500 m.

Datos para construcción de superficie de ascenso en SKBO:

- Pendiente de diseño de procedimiento (PDG): 8,2%²⁶.
- MOC: 295 ft.
- Separación mínima vertical para obstáculos: 200 ft.
- Pendiente de la superficie de identificación de obstáculos (OIS): 2,5%
- Longitud del área primaria de despegue: 17,46 km.

Las tablas de velocidades verticales y de ascenso de las aeronaves, de acuerdo con las pendientes publicadas en las AIP de cada aeropuerto, son las siguientes²⁷:

Tabla 4. Velocidad vertical (ft/min) vs. Velocidad de ascenso (KT) para SKBO

Gr. (%)		KTS	90	120	150	180	210	230
PDG	6.7	ft/min	611	814	1018	1221	1425	1561
ATS	8.2		747	996	1246	1495	1744	1910

Como la pendiente de ascenso o de diseño de procedimiento (PDG) ya está predefinida, para concretar dicha definición se tendrá en cuenta el comportamiento de la aeronave en dicho ascenso, cumpliendo con la pendiente elegida, con el objetivo de determinar si la aeronave no corre ningún peligro al momento de sobrepasar los obstáculos detectados. Para alcanzar el objetivo anteriormente mencionado, se elegirá la velocidad óptima con la que la aeronave debe ascender a medida que va recorriendo la longitud de la superficie de ascenso, y se considera óptima porque es la velocidad con la que contará para una mayor elevación sobre los mismos puntos en los que se sitúan los obstáculos. Los resultados de dichos cálculos son los siguientes:

²⁵ Aeronáutica Civil. AIP – SKLT. Op. Cit. Página 11.

²⁶ Aeronáutica Civil. AIP – SKBO. Op. Cit. Página 46.

²⁷ Ibíd. Página 45.

A una distancia de 17459,92 m:

Tabla 5. Comportamiento de la aeronave en la superficie de ascenso de SKBO.

Vel. Ascenso		Vel. Vertical		Tiempo		Altura (ft)
KT	Km/h	ft/min	m/min	h	M	
90	166,68	747	227,74	0,10	6	4481,92
120	222,24	996	303,65	0,078	4,68	4461,14
150	277,8	1246	379,87	0,0628	3,768	4694,828
180	333,6	1495	455,79	0,0523	3,138	4691,52
210	388,92	1744	531,70	0,044	2,64	4604,07
230	425,96	1910	582,31	0,0409	2,454	4687,05

Por lo cual, haciendo un resumen de los resultados, se considera que para las superficies de ascenso de SKLT y SKBO, la aeronave debe despegar a las velocidades de 130 y 150 KT, respectivamente.

Ascenso inicial: Conexión SKBO – CALVO – VOR/DME SKVV

El recorrido total desde el Aeropuerto Internacional Eldorado (BOG – SKBO) hasta el VOR/DME de VVC, es de 108,47 km (58,56 NM). El nivel de vuelo máximo que la aeronave alcanza, al pasar por el VOR/DME de VVC es de FL-245, teniendo en cuenta que estaría usando espacio aéreo de clase “A” (navegación en alturas de 17500 ft a FL-245). Asumiendo que deben apoyarse procedimientos RNAV SID, se crea un punto de notificación obligatoria, o punto de recorrido en este trayecto, ya que es el punto que determina el final del procedimiento de salida desde SKBO. El punto creado se denominará *CALVO*, y éste se encuentra ubicado a 48,47 km de distancia al VOR/DME de VVC.

Denominación de puntos de recorrido²⁸

Los puntos de recorrido que se emplean para apoyar procedimientos RNAV SID, STAR y de aproximación por instrumentos se designarán mediante un “nombre-clave” único de cinco letras y fácil de pronunciar o un nombre clave de cinco caracteres alfanuméricos. Se aplican los siguientes principios:

²⁸ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL. Documento 8168 – Operación de Aeronaves, Vol. II. Montreal, Canadá: OACI, 2006. Página III-5-1-5.

a) los puntos de recorrido se designarán mediante un nombre-clave de cinco caracteres alfanuméricos, sólo si se utilizan para puntos de recorrido únicos de un aeródromo al que se le haya asignado adecuadamente un indicador de lugar de cuatro letras (de conformidad con el Doc 7910);

b) en los casos siguientes se aplicará, de conformidad con el Anexo 11, un “nombre-clave” único de cinco letras y fácil de pronunciar:

1) para un punto de recorrido final de una SID;

2) para un punto de recorrido inicial de una STAR;

3) para puntos de recorrido comunes a más de un área de control terminal o que se empleen en un procedimiento común a más de un aeropuerto y que no se utilicen para la fase en ruta; y

4) para puntos de recorrido con fines ATC

Coordenadas de punto significativo

Las coordenadas utilizadas para la ubicación exacta del punto *CALVO* son coordenadas de tipo WGS 84. De acuerdo a la información suministrada por SkyVector, las coordenadas exactas de este punto son: 4°19'45,6" N 73°38'42,6" W.

Teniendo en cuenta la distancia que recorre la aeronave desde SKBO hasta el VOR/DME, y el PDG que emplea al momento de despegar de SKBO, la aeronave excedería el nivel de vuelo máximo que comprende dicho espacio aéreo, es decir, la altura a esa pendiente sería de 29175 ft, aproximadamente.

Como la altura máxima que comprende el nivel de vuelo es de 24500 ft, mediante una regla de tres se hallará el recorrido que la aeronave debe hacer para nivelar altura y establecer nivel de vuelo FL-245:

$$\begin{array}{l} 108,47 \text{ km} \xrightarrow{8,2\%} 29174,09 \text{ ft} \\ x \xrightarrow{8,2\%} 24500 \text{ ft} \\ x = \frac{108,47 \times 24500}{29174,09} = 91,0917 \text{ km} = 49,18 \text{ NM} \end{array}$$

La distancia en la que la aeronave asciende en un PDG de 8,2%, hasta FL-245, es de 91,09 km, o 49,18 NM.

5.4.5.3. ANCHURA Y SEMIANCHURA DE ÁREA

GNSS Básico:

Cálculo de XTT y ATT para especificaciones de navegación RNP:

- Para RNP 4:

$$\begin{aligned} XTT_{RNP4} &= 7,4 \text{ km} \\ [3.1] \text{ ATT}_{RNP4} &= 0,8 (7,4) = 5,92 \text{ km} \end{aligned}$$

- Para RNP 1/RNP APCH en aproximaciones frustradas:

$$\begin{aligned} XTT_{RNP1} &= XTT_{RNPAPCHAFR} = 1,9 \text{ km} \\ [3.2] \text{ ATT}_{RNP1} &= \text{ATT}_{RNPAPCHAFR} = 0,8 (1,9) = 1,52 \text{ km} \end{aligned}$$

- Para RNP APCH en aproximaciones finales:

$$\begin{aligned} XTT_{RNPAPCHAF} &= 0,56 \text{ km} \\ [3.3] \text{ ATT}_{RNPAPCHAF} &= 0,8 (0,56) = 0,448 \text{ km} \end{aligned}$$

Cálculo de ATT para especificaciones de navegación RNAV, de acuerdo con la tabla 8

- ATT en ruta y terminal:

$$[3.4] \text{ ATT}_{RNAV5ER} = 0,8 (4650) = 3720 \text{ m} = 3,72 \text{ km}$$

$$[3.5] \text{ ATT}_{RNAV2ER} = \text{ATT}_{RNAV1ER} = 0,8 (3704) = 2963,2 \text{ m} = 2,9632 \text{ km}$$

- ATT únicamente terminal:

$$[3.6] \text{ ATT}_{RNAV2T} = \text{ATT}_{RNAV1T} = 0,8 (1852) = 1481,6 \text{ m} = 1,4816 \text{ km}$$

Cálculo de Semianchura de área:

- Semianchura en ruta:

$$(\frac{1}{2} A/W)_{\text{RNAV5}_{\text{ER}}} = 1,5 (4650) + 3704 = 10679 \text{ m} = 10,68 \text{ km}$$

$$(\frac{1}{2} A/W)_{\text{RNP4}_{\text{ER}}} = 1,5 (7400) + 3704 = 14804 \text{ m} = 14,8 \text{ km}$$

$$(\frac{1}{2} A/W)_{\text{RNAV2}_{\text{ER}}} = (\frac{1}{2} A/W)_{\text{RNAV1}_{\text{ER}}} = 1,5 (3804) + 3704 = 9410 \text{ m} = 9,41 \text{ km}$$

$$(\frac{1}{2} A/W)_{\text{RNP1}_{\text{ER}}} = 1,5 (1900) + 3704 = 6554 \text{ m} = 6,554 \text{ km}$$

- Semianchura terminal:

$$(\frac{1}{2} A/W)_{\text{RNAV5}_{\text{T}}} = 1,5 (4650) + 1852 = 8827 \text{ m} = 8,827 \text{ km}$$

$$(\frac{1}{2} A/W)_{\text{RNP4}_{\text{T}}} = 1,5 (7400) + 1852 = 12952 \text{ m} = 12,95 \text{ km}$$

$$(\frac{1}{2} A/W)_{\text{RNAV2}_{\text{T}}} = (\frac{1}{2} A/W)_{\text{RNAV1}_{\text{T}}} = 1,5 (1752) + 1852 = 4480 \text{ m} = 4,48 \text{ km}$$

$$(\frac{1}{2} A/W)_{\text{RNP1}_{\text{T}}} = 1,5 (1900) + 1852 = 4702 \text{ m} = 4,702 \text{ km}$$

- Semianchura de aproximación final y aproximación frustrada:

$$(\frac{1}{2} A/W)_{\text{RNAV5}_{\text{AF}}} = 1,5 (4650) + 926 = 7901 \text{ m} = 7,9 \text{ km}$$

$$(\frac{1}{2} A/W)_{\text{RNP4}_{\text{AF}}} = 1,5 (7400) + 926 = 12026 \text{ m} = 12,02 \text{ km}$$

$$(\frac{1}{2} A/W)_{\text{RNP1}_{\text{AF}}} = (\frac{1}{2} A/W)_{\text{RNP}_{\text{APCH}_{\text{AFR}}}} = 1,5 (1900) + 926 = 3776 \text{ m} = 3,77 \text{ km}$$

$$(\frac{1}{2} A/W)_{\text{RNP}_{\text{APCH}_{\text{AF}}}} = 1,5 (560) + 926 = 1766 \text{ m} = 1,766 \text{ km}$$

DME/DME

Se calcula el DTT con $\alpha = 90^\circ$ debido a que se utilizan dos pares en dicho procedimiento:

$$\begin{aligned} \text{DTT} = 2\sigma &= 2 \frac{\sqrt{(0,085^2 + 0,05^2) + (0,085^2 + 0,05^2)}}{\sin 90} = \frac{2 (0,13946)}{\sin 90} = 0,27892 \text{ NM} \\ &= 0,5165 \text{ km} \end{aligned}$$

ATT general para todas las capacidades de navegación:

$$\text{ATT} = \sqrt{0,5165^2 + 0,463^2} = \sqrt{0,4811} = 0,693 \text{ km}$$

XTT en ruta:

$$XTT_{RNAV5_{ER}} = \sqrt{0,5165^2 + 4,630^2 + 0,463^2} = \sqrt{21,91} = 4,681 \text{ km}$$

$$XTT_{RNP4_{ER}} = \sqrt{0,5165^2 + 3,704^2 + 0,463^2} = \sqrt{14,0012} = 3,768 \text{ km}$$

$$XTT_{RNAV2_{ER}} = \sqrt{0,5165^2 + 1,852^2 + 0,463^2} = \sqrt{3,9110} = 1,977 \text{ km}$$

$$XTT_{RNAV1_{ER}} = XTT_{RNP1_{ER}} = \sqrt{0,5165^2 + 0,926^2 + 0,463^2} = \sqrt{1,3386} = 1,156 \text{ km}$$

XTT terminal:

$$XTT_{RNAV2_T} = \sqrt{0,5165^2 + 1,852^2 + 0,463^2} = \sqrt{3,9110} = 1,977 \text{ km}$$

$$XTT_{RNAV1_T} = XTT_{RNP1_T} = XTT_{RNP_{APCH_T}} = \sqrt{0,5165^2 + 0,926^2 + 0,463^2} = \sqrt{1,3386} \\ = 1,156 \text{ km}$$

XTT para aproximación final y frustrada (RNP APCH):

$$XTT_{RNP_{APCH_{AF}}} = XTT_{RNP_{APCH_{AFR}}} = \sqrt{0,5165^2 + 0,463^2 + 0,463^2} = \sqrt{0,6955} = 0,833 \text{ km}$$

Semianchura de área:

- **Semianchura en ruta:**

$$(\frac{1}{2} A/W)_{RNAV5_{ER}} = 1,5 (4681) + 3704 = 10725,5 \text{ m} = 10,72 \text{ km}$$

$$(\frac{1}{2} A/W)_{RNP4_{ER}} = 1,5 (3768) + 3704 = 9356 \text{ m} = 9,35 \text{ km}$$

$$(\frac{1}{2} A/W)_{RNAV2_{ER}} = 1,5 (1977) + 3704 = 6669,5 \text{ m} = 6,6695 \text{ km}$$

$$(\frac{1}{2} A/W)_{RNAV1_{ER}} = (\frac{1}{2} A/W)_{RNP1_{ER}} = 1,5 (1156) + 3704 = 5438 \text{ m} = 5,43 \text{ km}$$

- **Semianchura en área terminal:**

$$(\frac{1}{2} A/W)_{RNAV2_T} = 1,5 (1977) + 1852 = 4817,5 \text{ m} = 4,81 \text{ km}$$

$$(\frac{1}{2} A/W)_{RNAV1_T} = (\frac{1}{2} A/W)_{RNP1_T} = (\frac{1}{2} A/W)_{RNP_{APCH_T}} = 1,5 (1156) + 1852 \\ = 3586 \text{ m} = 3,58 \text{ km}$$

- Semianchura en área de aproximación y aproximación frustrada:

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{2} A/W\right)_{RNP_{APCH_{AF}}} &= \left(\frac{1}{2} A/W\right)_{RNP_{APCH_{AFR}}} = 1,5 (833) + 926 = 2175,5 \text{ m} \\ &= 2,17 \text{ km} \end{aligned}$$

VOR/DME (Únicamente para RNAV 5)

Utilizando los mismos valores para hallar el DTT para navegación DME/DME, el resultado es el siguiente:

$$DTT = 2\sigma = 2\sqrt{0,085^2 + 0,05^2} = 0,1972 \text{ NM} = 0,3652 \text{ km}$$

Los cálculos pertinentes para el diseño del procedimiento en este proyecto son los siguientes.

Datos a tener en cuenta:

$$\alpha_{VOR} = 4,5^\circ$$

$$DTT = 365,2 \text{ m}$$

$$D1 = 17613,07 \text{ m}$$

$$D_{CALVO} = 66602,27 \text{ m}$$

$$D2 = 60000 \text{ m}$$

Cálculos:

$$\theta_{CALVO} = \arctan\left(\frac{D2}{D1}\right) = \arctan\left(\frac{60000}{17613,07}\right) = \arctan(3,4065) = 73,64^\circ$$

$$\begin{aligned} VT_{CALVO} &= D1 - D_{CALVO} \cos(\theta_{CALVO} + \alpha) = 17613,07 - 66602,27 \cos(73,64 + 4,5) \\ &= 17613,07 - 13688,16 = 3924,90 \text{ m} \end{aligned}$$

$$DT_{CALVO} = DTT \cos \theta_{CALVO} = 365,2 \cos 73,64 = 102,86 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} AVT_{CALVO} &= D2 - D_{CALVO} \sin(\theta_{CALVO} - \alpha) = 60000 - 66602,27 \sin(73,64 - 4,5) \\ &= 2236,7 \text{ m} \end{aligned}$$

$$ADT_{DANSA} = DTT \sin \theta_{DANSA} = 365,2 \sin 73,64 = 350,41 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} XTT_{CLAVO} &= \sqrt{VT_{CALVO}^2 + DT_{CALVO}^2 + FTT^2 + ST^2} \\ &= \sqrt{3924,9^2 + 102,86^2 + 4630^2 + 463^2} = 6088,24 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ATT_{\text{CALVO}} &= \sqrt{AVT_{\text{CALVO}}^2 + ADT_{\text{CALVO}}^2 + ST^2} = \sqrt{2236,7^2 + 350,41^2 + 463^2} \\ &= 2310,84 \text{ m} \end{aligned}$$

Semianchura de área

El cálculo de la semianchura para este procedimiento es el siguiente (únicamente en ruta):

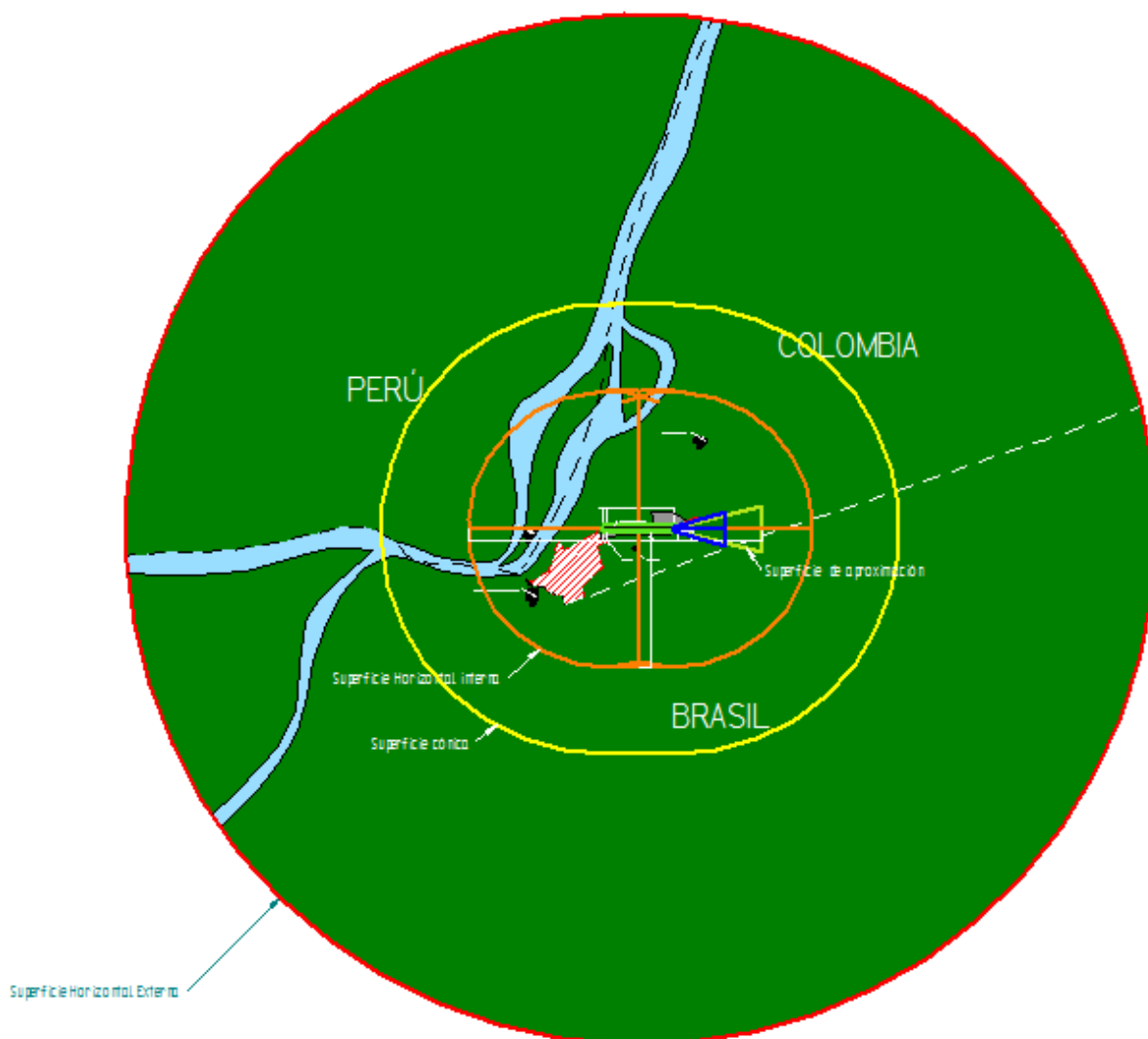
$$(\frac{1}{2} A/W)_{\text{CALVO}} = 1,5 XTT_{\text{CALVO}} + BV = 1,5 (6088,24) + 1852 = 10984,36 \text{ m}$$

5.4.6. RESULTADOS DE DISEÑO

Los resultados de diseño no solo incluyen la conformación de la ruta como tal. También incluyen los mismos diseños de SLO, planos de salida y aproximación de la aeronave, así como el comportamiento de las rutas, clasificadas por capacidades de navegación.

5.4.6.1 SUPERFICIES LIMITADORAS DE OBSTÁCULOS²⁹

Figura 14. Superficies Horizontal Interna, Horizontal Externa y Superficie Cónica de SKLT (Vista superior).



²⁹ Ilustraciones realizadas por los autores de este proyecto.

Figura 15. Detalle de las Superficies de Transición, de Ascenso y de Aproximación en SKLT. (Vista Superior)

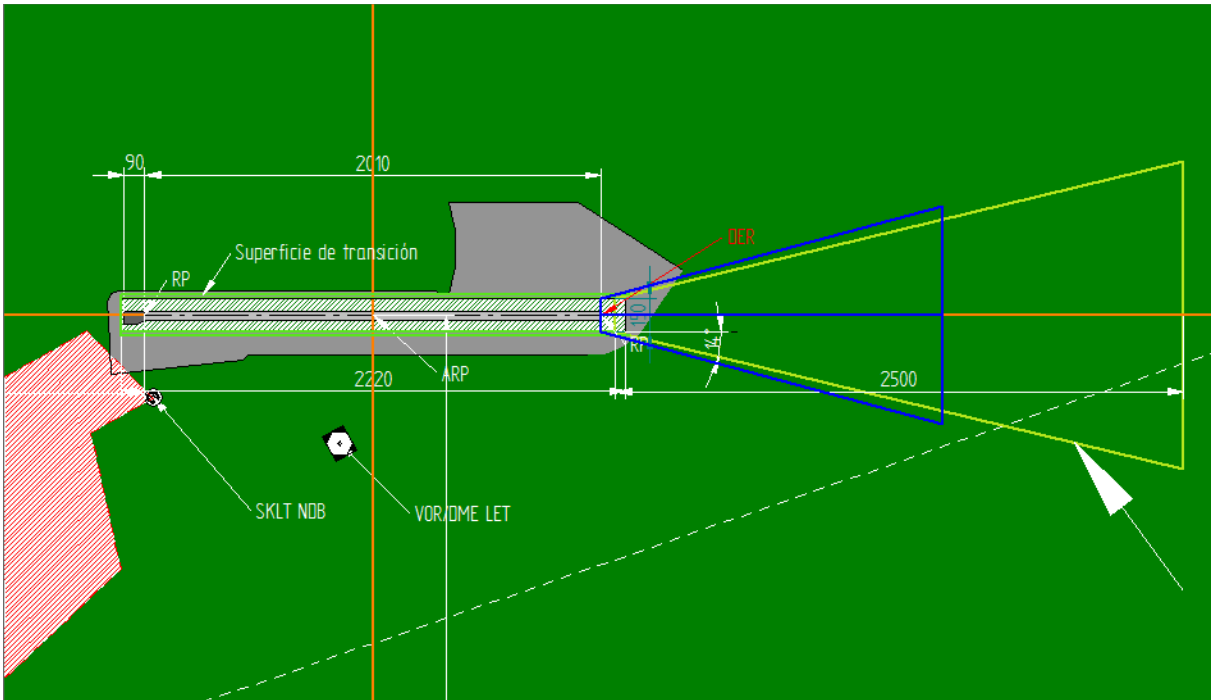
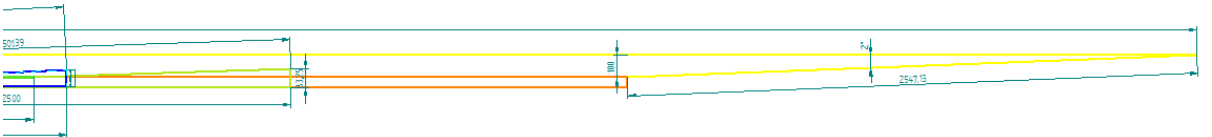


Figura 16. Detalle de las Superficies Cónica y Horizontal Interna en SKLT. (Vista Lateral)



Este diagrama ilustra la zona de mantenimiento de la Estación de Bombeo de Agua Potable de la C.A.D. de la ciudad de Bogotá. Se muestra un mapa de la zona con una red de carreteras y una zona de mantenimiento delimitada por una línea roja. La zona de mantenimiento incluye la Estación de Bombeo de Agua Potable, el Parque Nacional y el Parque de las Hadas. Se indican también las superficies de aproximación, horizontal interna, horizontal externa y cónica. Las etiquetas incluyen: Estación de Bombeo de Agua Potable, Parque Nacional, Parque de las Hadas, Superficie de aproximación, Superficie horizontal interna, Superficie horizontal externa, Superficie cónica, Red de zona de mantenimiento, Estación de Bombeo de Agua Potable, Parque Nacional, Parque de las Hadas, Superficie de aproximación, Superficie horizontal interna, Superficie horizontal externa, Superficie cónica.

Figura 19. Detalle de las superficies horizontal interna y cónica en SKBO (Vista lateral).

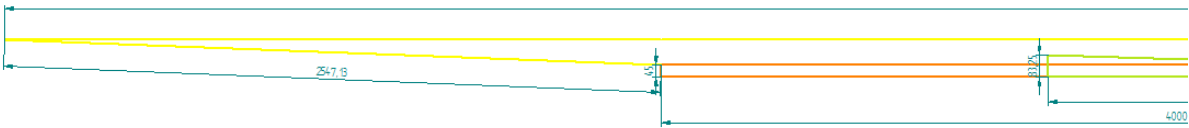


Figura 20. Detalle de la superficie de ascenso en SKBO, con su respectiva evaluación de obstáculos (Vista lateral). Cotas de altura en ft.

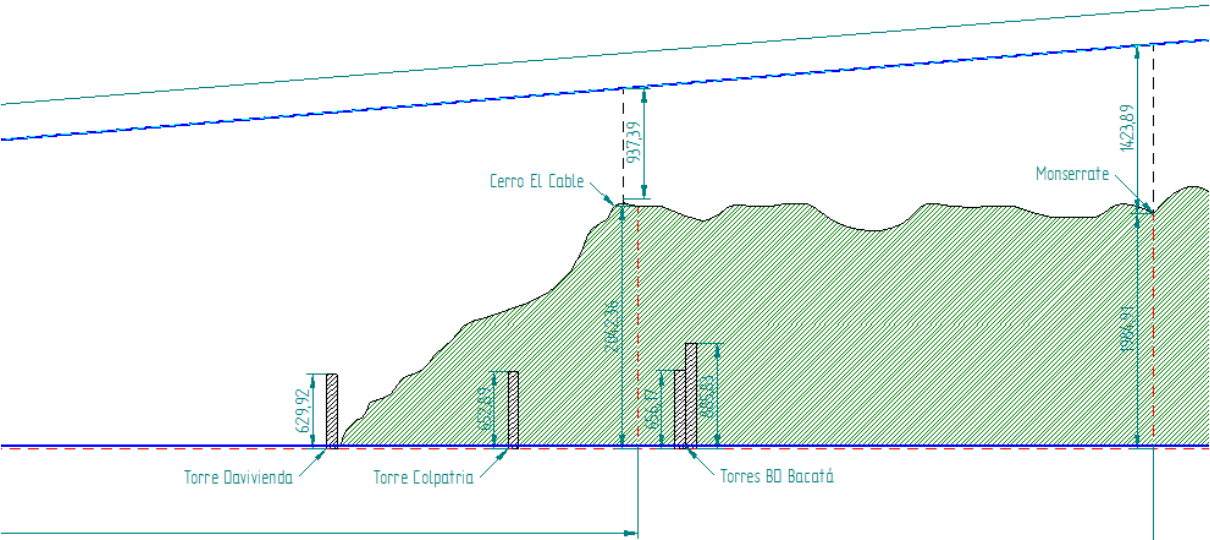


Figura 21. Superficie de Ascenso en SKBO (Vista superior)

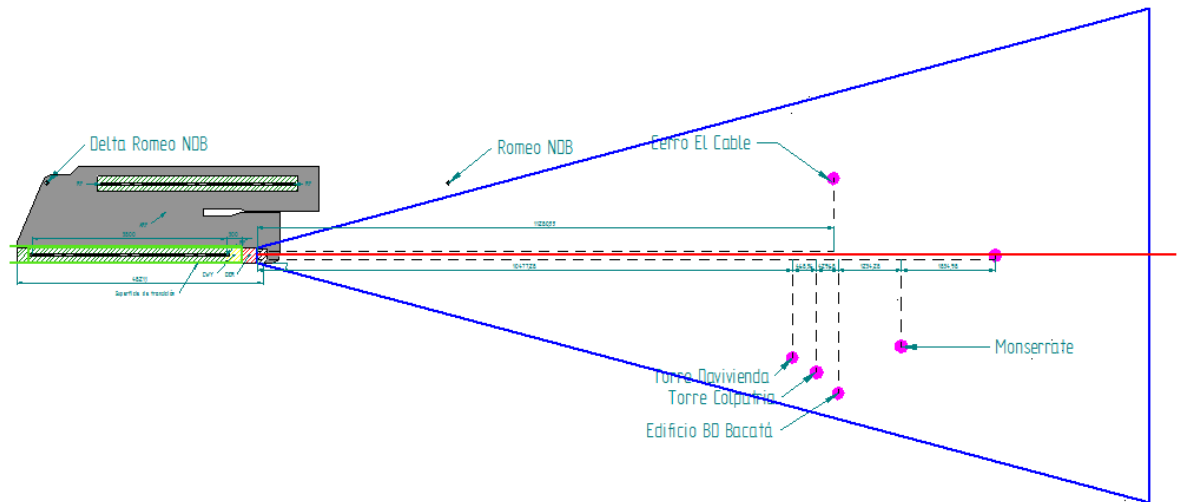


Figura 22. Superficies Cónica y Horizontal Interna en SKBO (Vista Frontal).

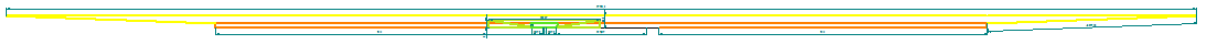
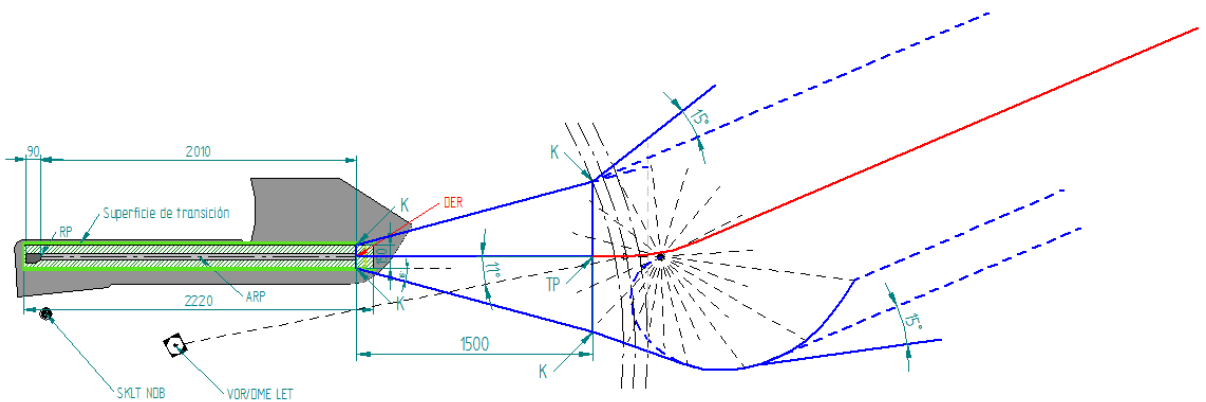
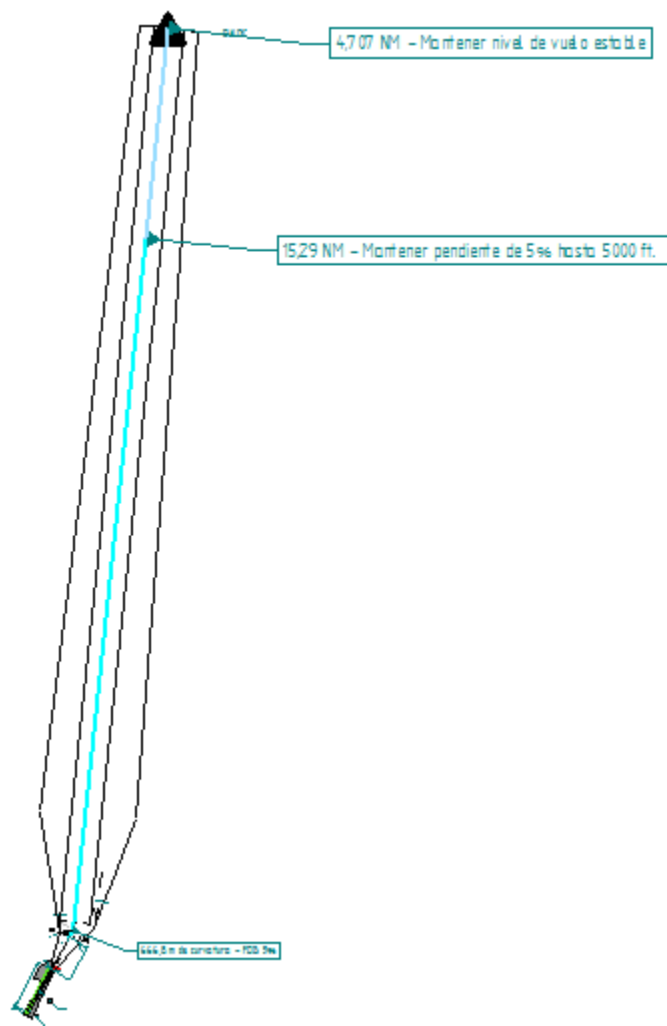


Figura 23. Construcción de espiral de viento para salida de viraje en SKLT.



5.4.6.2. TRAZADO DE RUTAS Y SEMIANCHURA DE ÁREA³⁰

Figura 24. Conexión SKLT – DALOK.



³⁰ Ilustraciones realizadas por los autores de este proyecto.

Figura 25. Conexión SKBO – VOR/DME SKVV

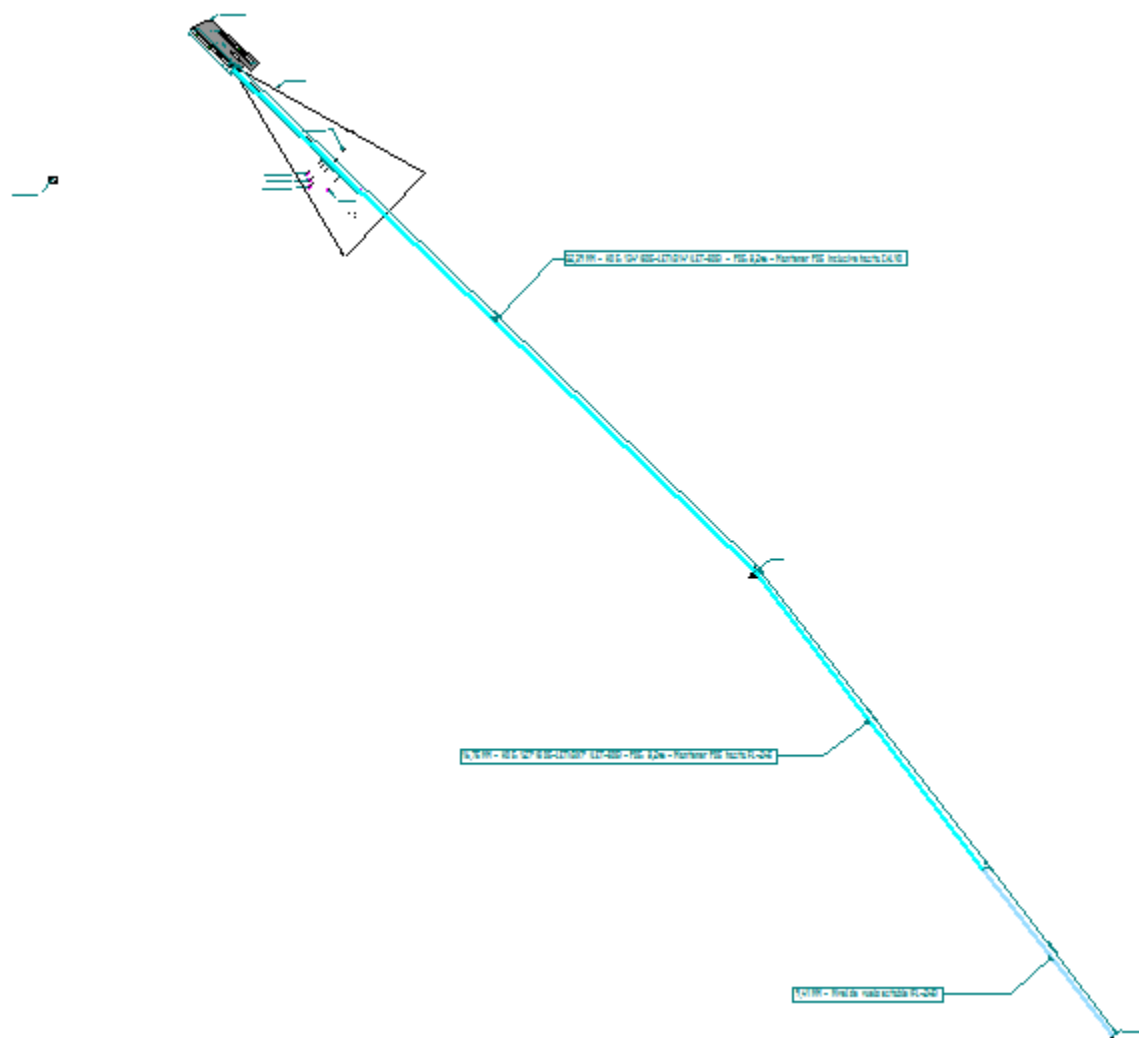


Figura 26. Salida con viraje en SKLT.

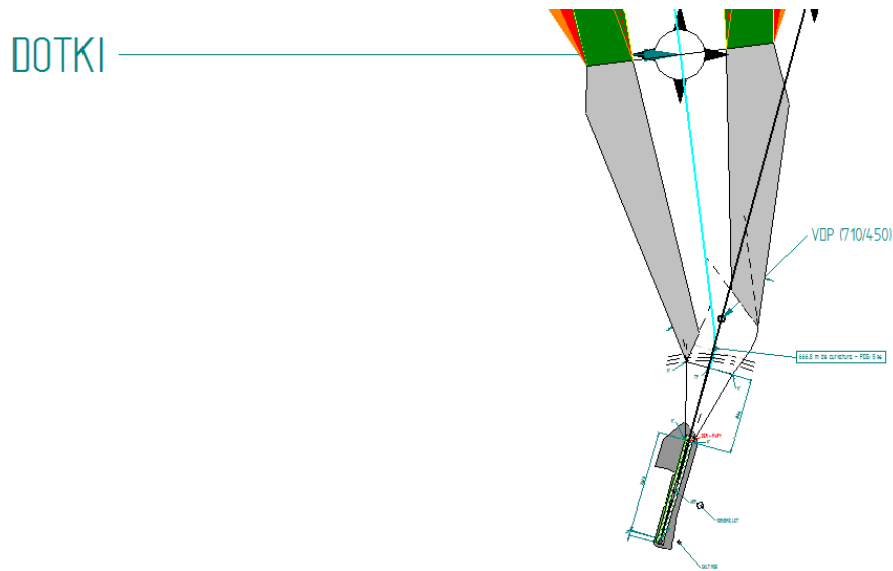


Figura 27. Salida en línea recta (con la instalación por detrás) en SKBO.

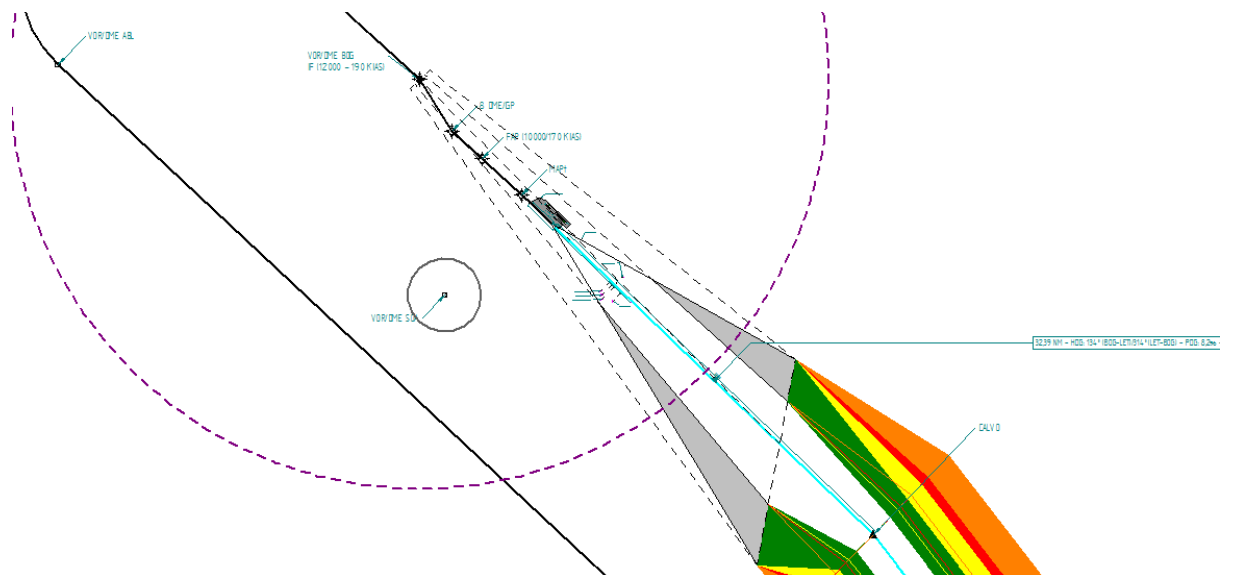


Figura 28. Creación de nuevo punto de notificación CALVO y semianchura de área para la fase de vuelo en ruta, para GNSS Básico.

El color naranja representa la semianchura para RNAV 5, el color rojo para RNP 4, el color amarillo para RNAV 2/1 y el color verde para RNP 1.

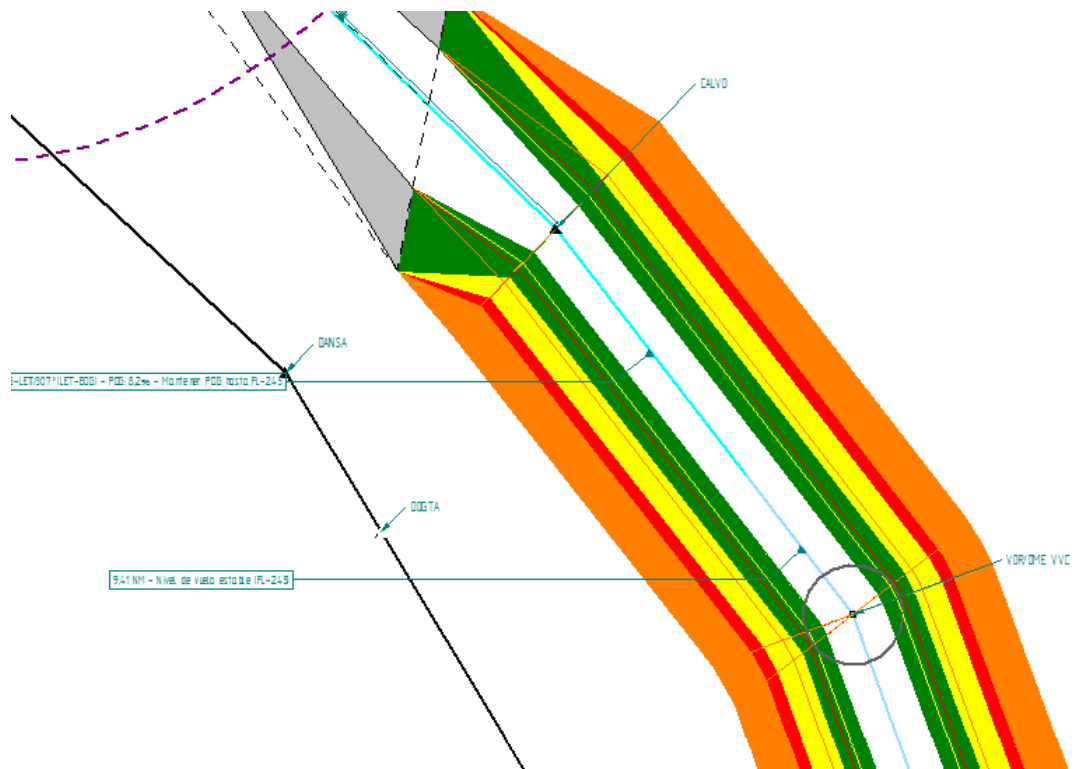
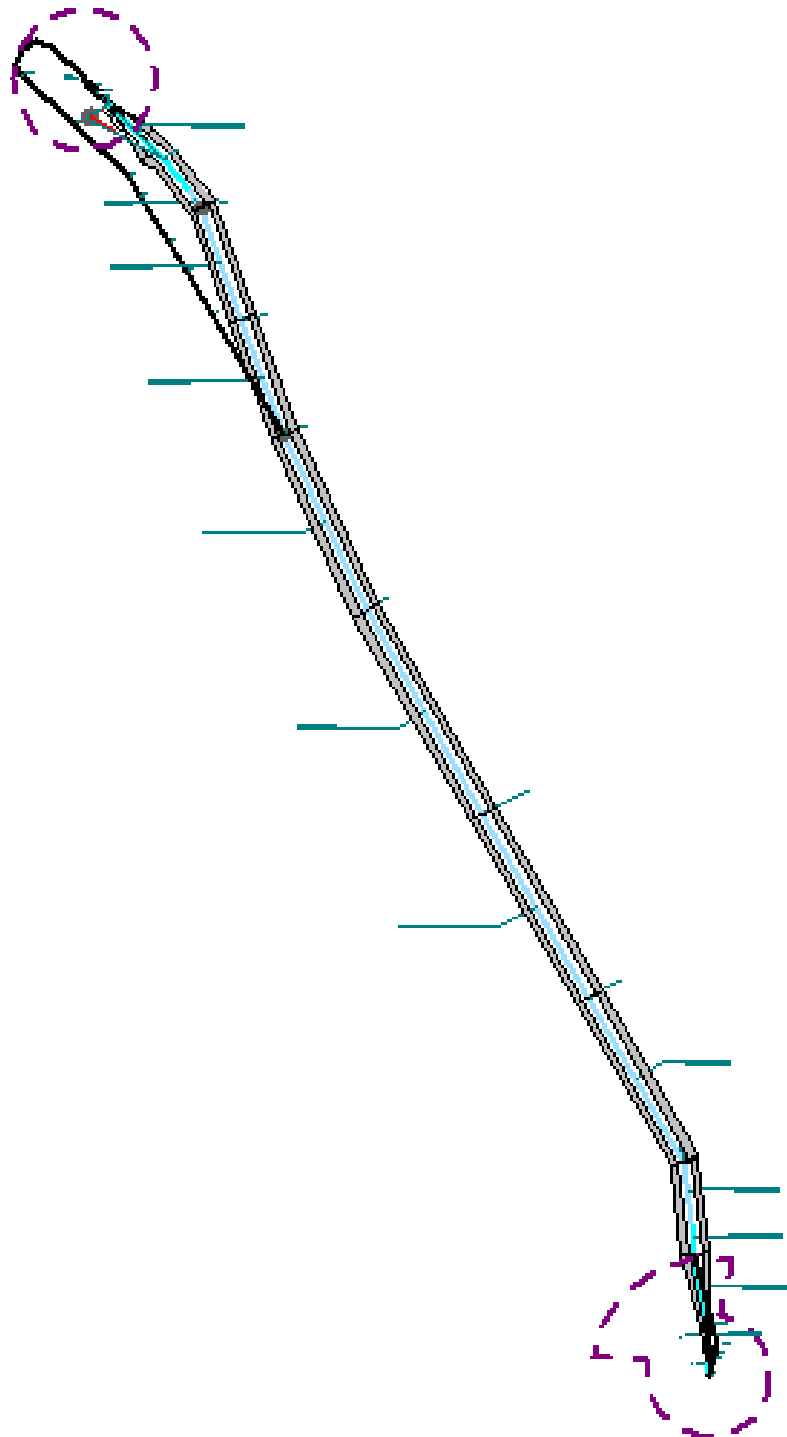


Figura 29. Detalle de viraje en el punto de notificación PABON, con la semianchura de área correspondiente a DME/DME.



[illegible]

Figura 31. Vista general de la ruta SKBO – SKLT.



El recorrido total de la aeronave para la ruta BOGOTÁ – LETICIA (UB-689) es de 1116,331 km, es decir, 602,9 NM.

5.4.6.3. SEGUNDOS CÁLCULOS DE LA PROPUESTA DE LA RUTA

Altura

Teniendo en cuenta los tramos de la ruta que se diseñó, durante sus fases de vuelo, junto con las pendientes de ascenso y aproximación para cada aeropuerto correspondiente, se calcularon las alturas de cada punto, considerando que las alturas hacen parte esencial de los cálculos obtenidos.

Para cada tramo de la ruta, se tomaron las distancias, y cada una de las distancias fue multiplicada por el porcentaje de la pendiente correspondiente a la fase de vuelo.

Se emplea la misma tabla que se utilizó en el numeral 5.4.3. de este capítulo, para definir con exactitud el desempeño de la aeronave si operase en la ruta propuesta.

Tabla 6. Resultados del segundo cálculo para condiciones de vuelo

ρ_{∞}	T_{∞}	V_{∞}	W	t	RC	M	d
1.44E-03	60.00	421.95	171947.53	0.13	34.60	0.38	18.40
1.09E-03	31.03	536.72	171869.19	0.18	12.72	0.48	41.55
1.09E-03	17.44	573.86	171809.83	0.21	0.02	0.51	26.96
1.09E-03	92.60	678.50	171657.71	0.33	0.00	0.61	83.71
1.09E-03	96.30	712.26	171590.50	0.46	0.00	0.64	58.80
1.09E-03	151.86	712.26	171467.65	0.65	0.00	0.64	67.26
1.09E-03	183.35	712.26	171406.23	0.89	0.00	0.64	67.70
1.09E-03	166.67	712.26	171242.43	1.10	0.00	0.64	90.71
1.09E-03	148.16	712.26	171076.68	1.29	0.00	0.64	105.77
1.39E-03	46.98	648.12	170460.47	1.32	-30.22	0.58	429.36
1.58E-03	25.25	577.23	170456.66	1.33	-20.33	0.52	56.13
2.24E-03	96.69	465.84	170439.59	1.35	-44.20	0.42	94.57
Distancia Total							1116.33

Tabla 7. Resultados de los segundos cálculos aerodinámicos y de performance.

h	C_L	L [lbf]	θ	σ	TSFC _{jet}	$C_{D,0}$	C_D	T_R	E_{max}
16137.60	1.01	171864.72	0.89	0.61	0.56	0.03700	0.0740	12531.85	13.714
24483.00	0.83	171797.19	0.83	0.46	0.60	0.00003	0.0249	5144.24	33.396
24500.00	0.73	171761.04	0.83	0.46	0.61	0.02835	0.0474	11178.90	15.365
24500	0.52	171595.54	0.83	0.46	0.65	0.00002	0.0098	3214.75	53.378
24500	0.47	171435.90	0.83	0.46	0.66	0.02332	0.0313	11378.59	15.067
24500	0.47	171196.36	0.83	0.46	0.66	0.00002	0.0080	2904.85	58.935
24500	0.47	170907.15	0.83	0.46	0.66	0.02328	0.0312	11343.91	15.066
24500	0.47	170644.25	0.83	0.46	0.66	0.00002	0.0079	2886.18	59.125
24500	0.47	170410.55	0.83	0.46	0.66	0.02325	0.0312	11316.99	15.058
17257.35	0.44	170412.96	0.88	0.58	0.65	0.00002	0.0071	2715.42	62.758
13365.33	0.49	170459.25	0.91	0.66	0.62	0.02867	0.0373	12953.64	13.159
5400.00	0.59	170530.31	0.96	0.85	0.58	0.00002	0.0125	3612.13	47.210
Z	V_R	U_{max}	U_{min}	V_{max}	V_{min}	V_{STALL}	W_{FW}	α	
11.0998	479.71	4.7069	0.2125	2257.904	101.916	273.5102	135.28	4.70	
15.6038	568.22	5.5835	0.1791	3172.678	101.768	293.4167	202.81	1.36	
13.8019	534.05	5.2505	0.1905	2804.034	101.715	353.2491	238.96	0.00	
12.4320	506.24	4.9823	0.2007	2522.275	101.607	378.7411	404.46	0.00	
10.2520	459.46	4.5227	0.2211	2078.020	101.589	416.3177	564.10	0.00	
10.1628	457.32	4.5029	0.2221	2059.291	101.561	416.4560	803.64	0.00	
12.1142	498.99	4.9180	0.2033	2454.064	101.462	374.3612	1092.85	0.00	
16.3139	578.75	5.7094	0.1752	3304.289	101.368	325.4425	1355.75	0.00	
15.7080	567.54	5.6021	0.1785	3179.453	101.308	288.8876	1589.45	0.00	
16.7664	586.16	5.7882	0.1728	3392.780	101.268	262.6553	1587.04	-2.67	
11.0435	475.54	4.6948	0.2130	2232.569	101.289	252.4145	1540.75	-2.02	
8.4856	416.82	4.1124	0.2432	1714.149	101.357	245.8687	1469.69	-5.44	

5.4.6.4. GRÁFICAS COMPARATIVAS

Figura 32. Gráfica comparativa de altura vs distancia.

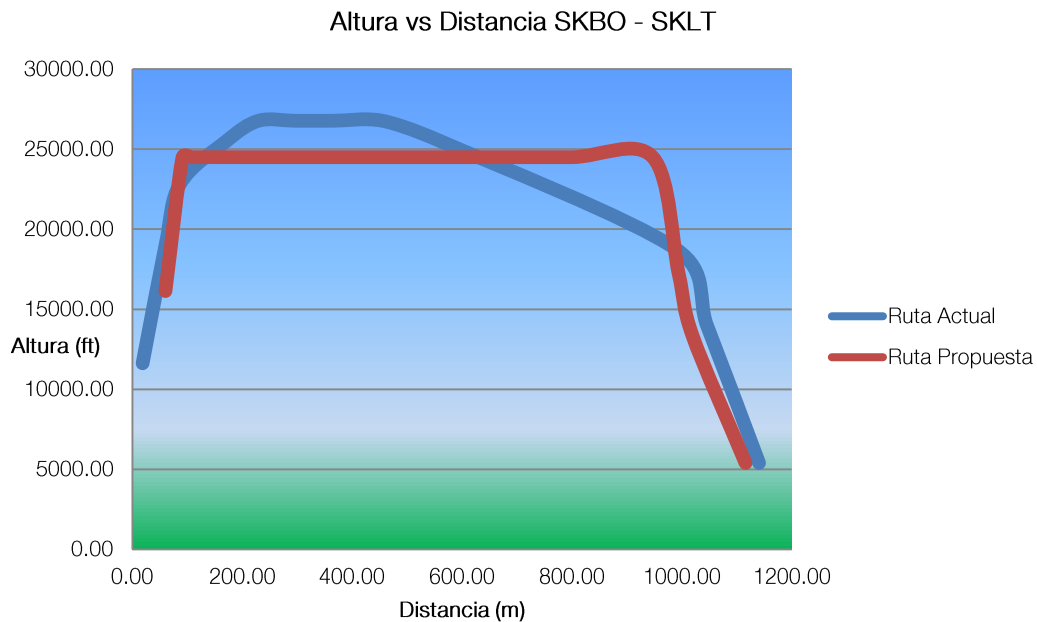


Figura 33. Gráfica comparativa de consumo de combustible en litros.

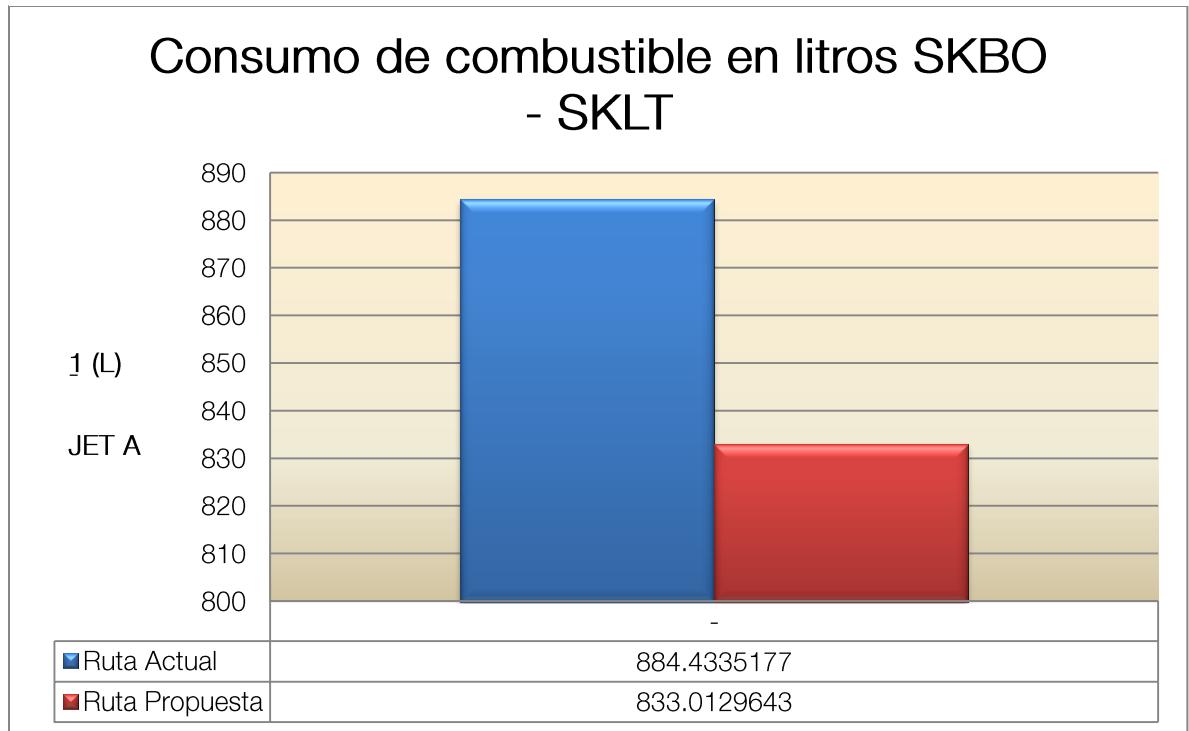


Figura 34. Gráfica comparativa de emisiones de CO₂ en función del tiempo.

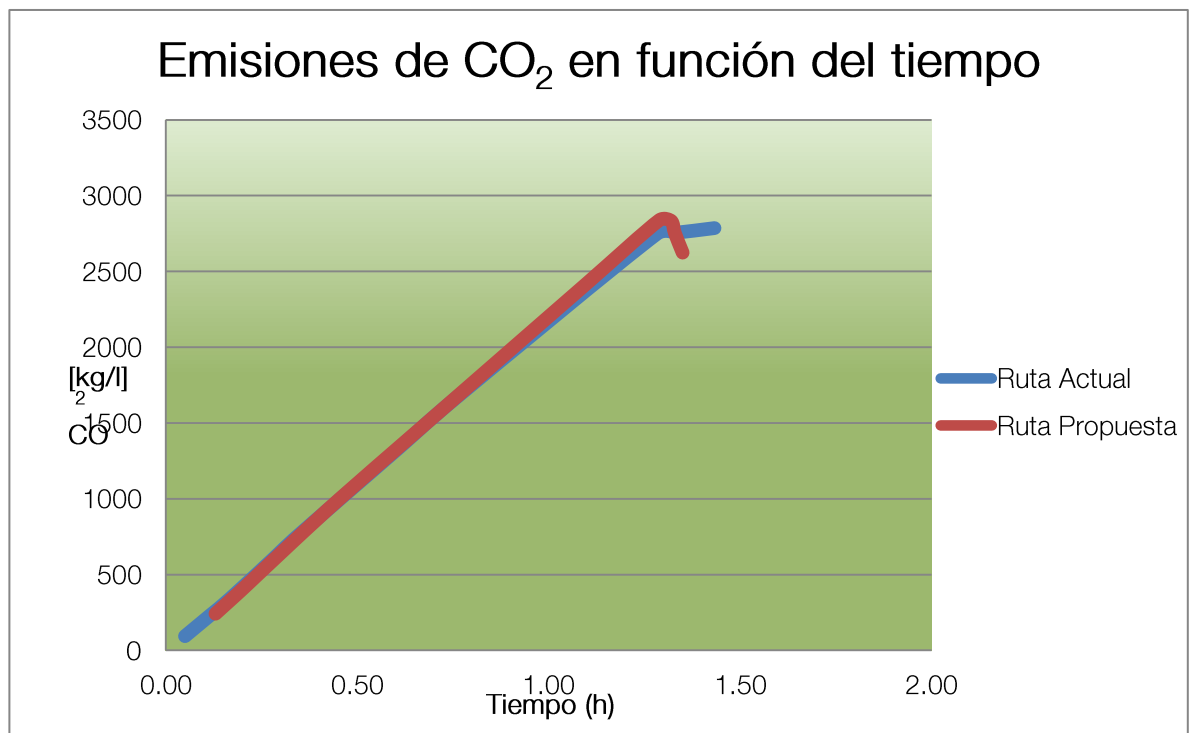


Figura 35. Gráfica comparativa de consumo específico de combustible en función del tiempo.

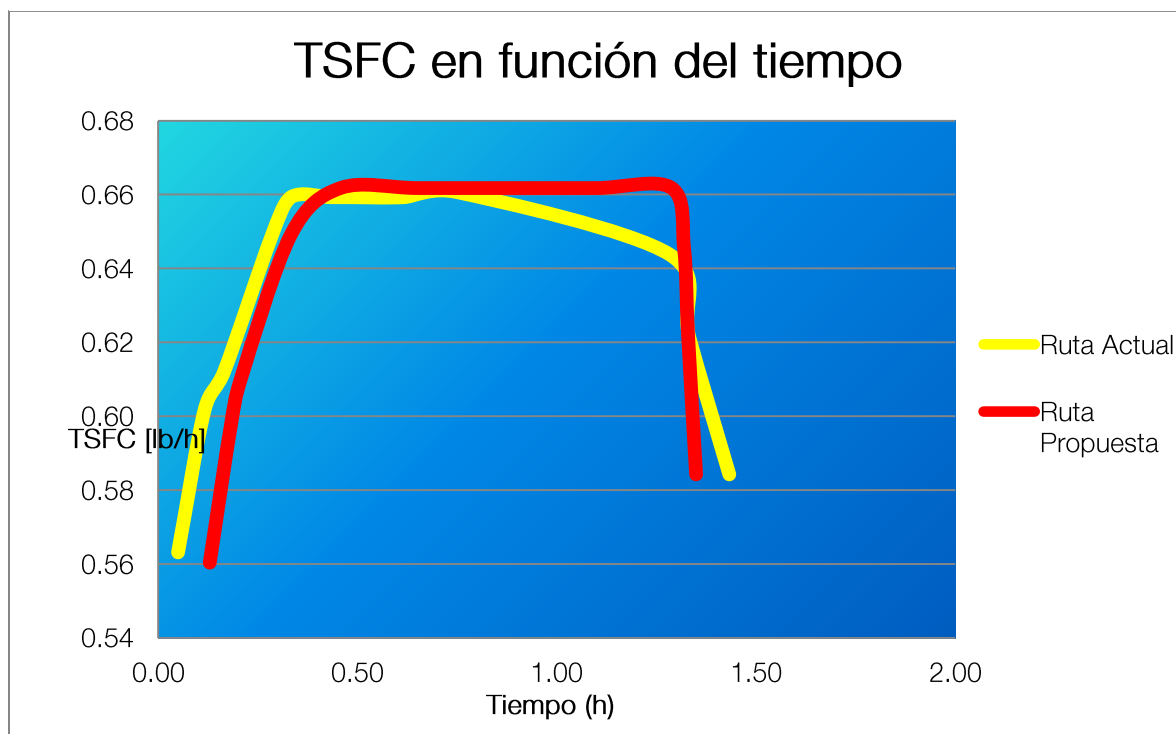


Figura 36. Comportamiento de la velocidad vertical en función del tiempo.

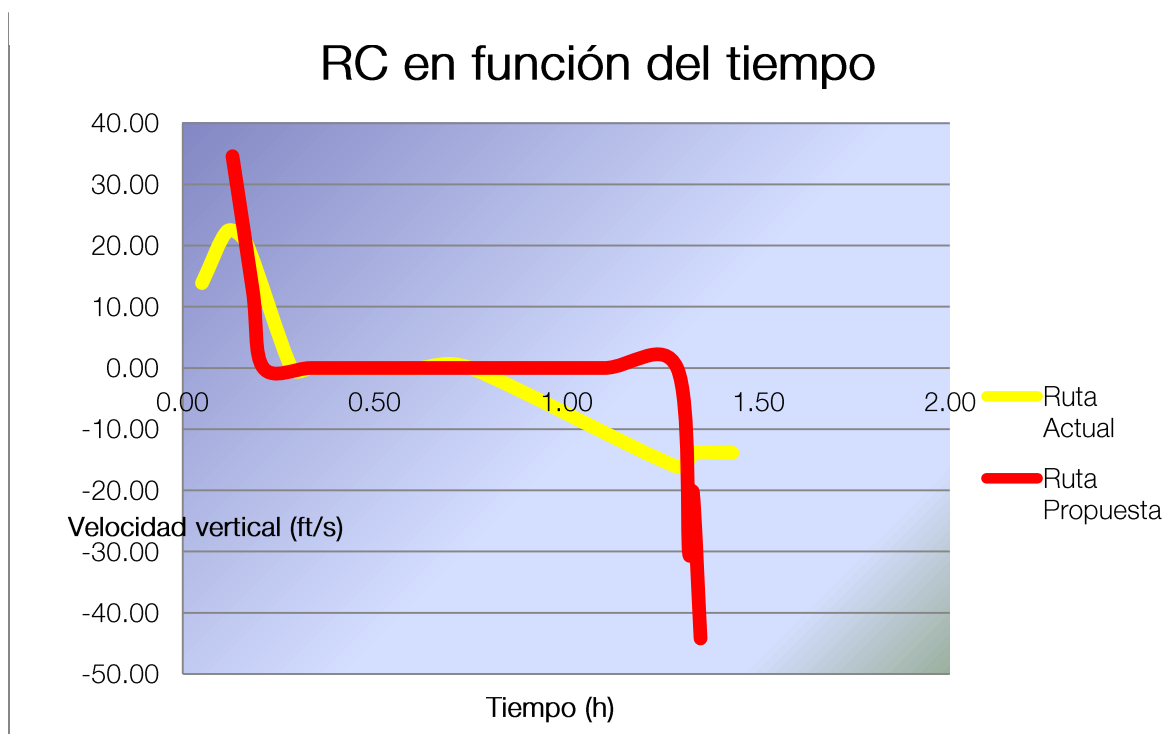
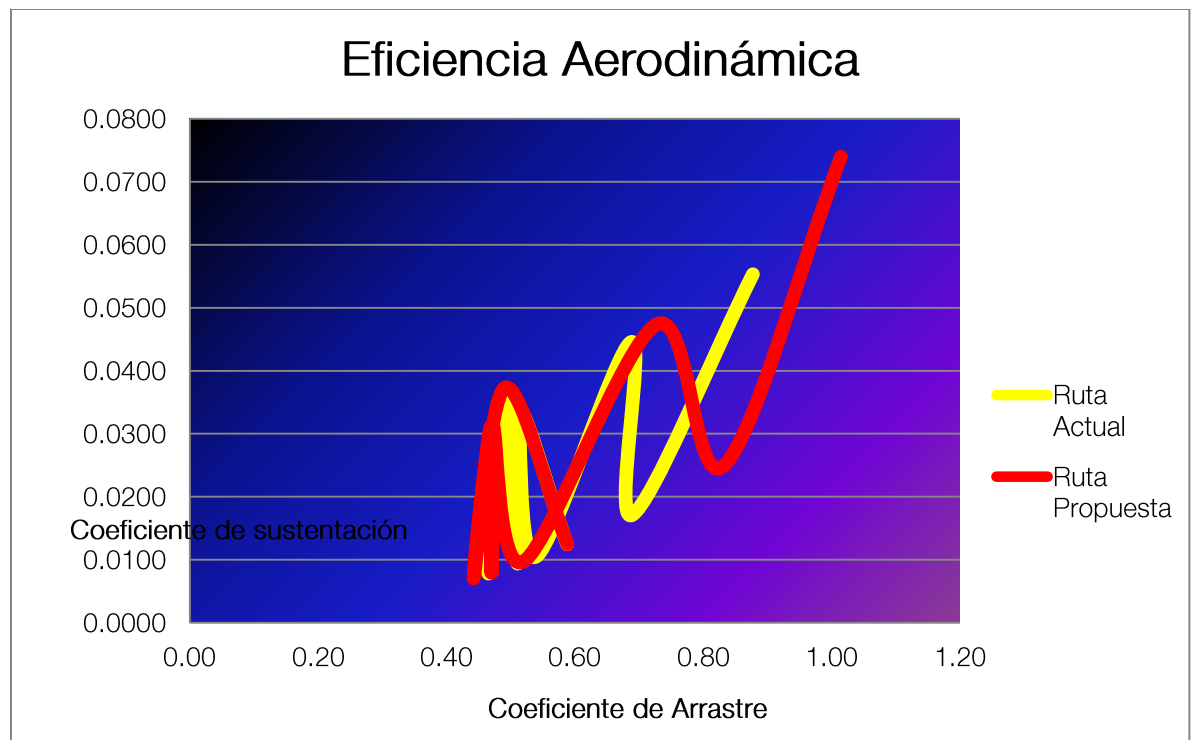


Figura 37. Eficiencia aerodinámica de la aeronave.



5.4.7. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN DE GRÁFICOS

La idea principal de diseñar una nueva ruta para conectar los aeropuertos de Bogotá y Leticia es la de reducir la distancia de navegación de la aeronave, lo que implica que haya menor consumo de combustible, menor tiempo de vuelo y, por ende, menor emisión de CO₂. Las gráficas que anteriormente se anexaron a los resultados son la prueba de que se ha cumplido con la idea principal.

La figura 32 muestra el comportamiento del vuelo de la aeronave en cuestión de alturas y distancias recorridas, tanto actualmente como en la propuesta de diseño planteada por el grupo. Dicha gráfica muestra efectivamente que la ruta propuesta es más efectiva que la ruta actual, puesto que la ruta propuesta recorre 1116,33 km en total, incluyendo las distancias que se efectúan en el procedimiento de salida desde SKBO, mientras que la ruta actual es recorrida en 1140,92 km, excediéndose en 24,59 km. Dicha distancia excedida se traduce en un mayor consumo de combustible, mostrado en los cálculos y en la figura 33, donde la ruta actual consume 884,43 L, mientras que la ruta planteada consumiría 51,42 L menos, con un consumo de 833,01 L por vuelo.

Igualmente, las emisiones de CO₂ se reducen, teniendo en cuenta que por cada 16 kg de combustible consumido tipo JET A-1, que es el combustible utilizado en aviación, se emiten 16 kg de CO₂ (3,15 kg de CO₂/L)³¹, por lo que en el recorrido actual se emiten 2785,97 kg de CO₂, mientras que en el recorrido propuesto se emiten 2625,99 kg, reduciendo las emisiones un 5,74%. Así mismo, se evaluaron los comportamientos del consumo específico de combustible y de la velocidad vertical en función del tiempo, en las figuras 35 y 36. El consumo específico de combustible de la ruta actual es variable en la fase de vuelo en ruta, mientras que la propuesta muestra un comportamiento constante hasta el momento en que empieza a realizar el procedimiento de aproximación, donde desciende también constantemente y de manera rápida, por estar en función de un menor tiempo respecto a la ruta actual; para la velocidad vertical de la aeronave, la ruta propuesta muestra que las pendientes de ascenso y aproximación son adecuadas para la ejecución de esos procedimientos, por lo cual se considera que la operación de la aeronave será segura. Y hablando de la eficiencia aerodinámica, en temas de performance, los coeficientes de sustentación y de arrastre aumentan para la ruta propuesta, notando que las curvas para cada ruta tienen la misma geometría, es decir, que dichos coeficientes tienen una amplitud en común y que en vuelo se comportan de igual manera. La amplitud que se menciona se relaciona con el peso de la aeronave, puesto que la aeronave en la ruta propuesta está con mayor peso que en la ruta actual, mencionando de nuevo que la ruta actual consume más combustible. Se recuerda que el peso total de la aeronave también incluye el peso por carga paga, el peso estructural y el peso del combustible en toda su capacidad, por lo tanto, al haber mayor consumo de combustible, menor será el peso de la aeronave, y al haber menor peso, los coeficientes disminuyen.

³¹ TREKKING CHILE, Santiago, 2012. [En línea] <<http://www.trekkingchile.com/fair-chile/es/viajar-calculo-co2.php>> Consultado el 10/08/2016.

6. PRESENTACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA

6.1. PRESENTACIÓN DE LA PROPUESTA

La propuesta esencialmente consiste en modificar la ruta actual BOGOTÁ – LETICIA (UB-689), mediante el diseño de una nueva ruta que permita disminuir el consumo de combustible, el tiempo de vuelo, la distancia recorrida y la emisión de gases de dióxido de carbono, lo cual implica que las operaciones aeronáuticas de dicha ruta sean más efectivas, beneficiando tanto a los operadores de las aeronaves como a los aeropuertos, pues puede permitir el aumento de las frecuencias de los vuelos, puede significar un ahorro económico para las aerolíneas, e inclusive, beneficiando al medio ambiente. Mediante la investigación de documentos relacionados sobre el diseño de rutas, de la navegación basada en la performance, los anexos correspondientes y los planes maestros de los aeropuertos involucrados, se establece la base teórica para iniciar el trabajo, dividido en nueve tareas específicas, para cumplir con los objetivos específicos trazados al inicio del desarrollo de este proyecto. Finalmente, con este proyecto se busca aportar una idea a la UAEAC, destacando que actualmente dicho organismo, en su Centro Nacional de Aeronavegación, ha venido trabajando desde hace varios años en un nuevo diseño de la infraestructura completa en materia de aerovías. De esta manera, como profesionales en ingeniería aeronáutica, se pretende aportar un granito de arena que haga la diferencia, en pro del avance de la aviación colombiana, en materia de infraestructura y operaciones aeronáuticas.

6.2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO (EN ETAPAS)

6.2.1. PRIMERA ETAPA: INVESTIGACIÓN CONCEPTUAL SOBRE LOS PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN DE RUTAS, APROXIMACIONES Y SALIDAS; NAVEGACIÓN BASADA EN LA PERFORMANCE, PERFORMANCE DE AVIACIÓN Y DOCUMENTOS NECESARIOS PARA DISEÑO DE PROCEDIMIENTOS.

En la primera etapa de este proyecto se realizó una investigación de tipo conceptual acerca de los procedimientos de construcción de las rutas aeronáuticas, aproximaciones y salidas, debido a que dicha realización y diseño de las rutas debe seguir unos procesos estipulados en los Documentos 8168 y 9613 de la OACI, que, de acuerdo a los avances tecnológicos que han sufrido los sistemas de navegación y comunicación de las aeronaves, establecen pautas, sugerencias y normas para la construcción de las aerovías, teniendo en cuenta los conceptos básicos de espacio aéreo, geografía, rendimiento de los sistemas de navegación y rendimiento de vuelo de la aeronave.

Esta primera etapa es un paso fundamental en el desarrollo del proyecto, ya que es preciso entender todos los conceptos que así mismo lo abarcan, pues en los procedimientos que están contenidos en el manual hay mucha terminología y conceptos manejados de tipo técnico-aeronáutico que requieren ser entendidos, para llevar a cabo los procedimientos con seguridad y eficacia. Los documentos consultados para la realización de este proyecto, con su respectivo aporte son los siguientes:

6.2.1.1. Manual para procedimientos de los servicios de navegación aérea. Operación de aeronaves (PANS-OPS) – Organización de Aviación Civil Internacional. Documento 8168. Vol. II: Construcción de procedimientos de vuelo visual y por instrumentos.

Este manual, elaborado por la Organización de Aviación Civil Internacional, tiene como objetivo servir de guía a especialistas en procedimientos³². Consta de dos volúmenes: el Volumen I conceptualiza los procedimientos de vuelo que cada aeronave cumple en la trayectoria de las rutas utilizadas, y el volumen II permite ayudar al especialista a construir los procedimientos de vuelo VFR e IFR, para diseñar rutas aeronáuticas, y sus respectivos procedimientos de aproximación y salida. En este caso, el manual describe las áreas esenciales y los requisitos de franqueamiento de obstáculos para poder realizar con seguridad operaciones de vuelo regulares. Proporciona orientación básica a los Estados y a los explotadores y organismos que producen cartas de vuelo por instrumentos, lo que contribuirá al logro de métodos uniformes en todos los aeródromos en los que se utilicen procedimientos de vuelo por instrumentos³³. El aporte que realiza a este proyecto es el de establecer todos los criterios que son necesarios para rediseñar las rutas que necesitan su modificación correspondiente, de tal manera que tenga las garantías de seguridad y operatividad que los entes aeronáuticos exigen, en pro del normal desarrollo de las operaciones aéreas.

El contenido tomado de este manual es el siguiente:

- **PARTE I – ASPECTOS GENERALES**
 - Sección 1. Definiciones, abreviaturas y unidades de medida, en sus capítulos 1, 2 y 3, respectivamente³⁴.

³²ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL. Documento 8168 Op. Cit. Pág. XV.

³³Ibíd. Pág. XV.

³⁴Ibíd. Pág. III.

- Sección 2. Principios generales. Los capítulos tomados en cuenta para esta sección son: Capítulo 1 (Generalidades), que habla de los elementos básicos a tener en cuenta para la construcción de rutas aeronáuticas, mencionando a las áreas y espacios, franqueamiento de obstáculos, ejemplos de cálculo; marcaciones, derrotas y radiales; precisión de la utilización del sistema de navegación, aumento de altitudes/alturas para zonas montañosas, precisión de las cartas, presentación de obstáculos destacados y cotas en las caras, base de datos de las características de las aeronave que van a utilizar las rutas, y la promulgación. Capítulo 2 (Puntos de referencia de área terminal), que abarca los temas de las generalidades en la toma de puntos de referencia, puntos de referencia de área terminal, tolerancia de los puntos de referencia y área de tolerancia de los puntos de referencia determinados por intersecciones, tolerancia del punto de referencia para otros tipos de instrumentos de navegación, tolerancia del punto de referencia en la vertical de una estación, aplicación operacional de puntos de referencia para la planificación de los puntos de vuelo, utilización de los puntos de referencia para el descenso y consiguiente franqueamiento de obstáculos, y área de protección para VOR y NDB. Capítulo 3 (Construcción del área de viraje), que tiene en cuenta las generalidades de la misma, y la construcción de los límites interior y exterior del viraje. Capítulo 4 (Garantía de calidad), que contiene los subcapítulos que hablan acerca de las generalidades, procesos de los procedimientos de vuelo por instrumentos, obtención de la información para el diseño de procedimientos, diseño de procedimientos, documentación del diseño de procedimientos, validación en tierra y en vuelo, calificaciones y formación de diseñadores de procedimientos, y el diseño automatizado de procedimientos³⁵.

³⁵ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL. Documento 8168 Op. Cit. Pág. III.

- **PARTE II – PROCEDIMIENTOS CONVENCIONALES**
 - Sección 3. Criterios en ruta. Abarca un capítulo único que habla sobre las generalidades, las áreas de franqueamiento de obstáculos, construcción de áreas para rutas VOR y NDB, altitud mínima en ruta (MEA), y la promulgación. También contiene dos apéndices, el apéndice A que trata de un método perfeccionado para construcción de áreas de franqueamiento de obstáculos para rutas VOR y NDB, y el apéndice B para Cálculos Estadísticos en áreas primaria y secundaria, con ángulos de ensanchamiento³⁶.
- **PARTE III – PROCEDIMIENTOS RNAV Y PROCEDIMIENTOS BASADOS EN SATÉLITES**
 - Sección 1. Principios fundamentales. De siete capítulos que componen esta sección, se eligen los siguientes: Capítulo 1 (Conceptos RNAV) que toma los subcapítulos que hablan de las generalidades, error técnico de vuelo, valores intermedios, área de franqueamiento de obstáculos, y puntos de referencia. Capítulo 2 (Procedimientos RNAV con GNSS básico), con subcapítulos de generalidades y XTT, ATT y semianchura de área. Capítulo 3 (Procedimientos RNAV con DME/DME) que incluyen los mismos subcapítulos del capítulo anterior, pero adicionando los requisitos de los equipos a bordo y en tierra para procedimientos DME/DME, la precisión de utilización del sistema DME/DME, tolerancia técnica de vuelo, tolerancia de cálculo del sistema, la cobertura de las ayudas para la navegación y la validación de procedimientos; se incluye el apéndice al capítulo 3, sobre la derivación y cálculo de ATT, XTT y semianchura del área. Capítulo 4 (Procedimientos RNAV con VOR/DME), que incluyen los mismos subcapítulos del capítulo 3, pero aplicados al sistema VOR/DME. Capítulo 8, sobre los procedimientos en ruta³⁷.

³⁶ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL. Documento 8168. Op. Cit. Pág. IX.

³⁷Ibíd., Págs. XII y XIV.

6.2.1.2. Manual para procedimientos de Navegación Basada en la Performance (PBN) – Organización de Aviación Civil Internacional. Documento 9613. Volúmenes I y II.

Este manual, elaborado también por la OACI, permite tener a la mano la conceptualización de la navegación basada en el rendimiento de los equipos de comunicación de las aeronaves, el concepto RNAV y RNP, y así mismo, es el complemento al Documento 9905, puesto que es indispensable formar la estructura en temas de navegación y comunicaciones, después de haber hecho la construcción física de la ruta aeronáutica. En pocas palabras, este manual, junto con el primer manual mencionado, va de la mano para la completa modificación y/o diseño de las rutas aeronáuticas. Se manejan procesos, que a su vez son conformados por pasos y tareas que requieren el estudio de los conceptos que se manejan con respecto a la Navegación Basada en la Performance (PBN), que contribuyen a la transición de los actuales sistemas empleados en las comunicaciones y la navegación aeronáutica. Los volúmenes tenidos en cuenta para este manual son los volúmenes I y II, el volumen I comprende la información sobre el Concepto y Orientación de la Implementación, y el volumen II describe la implementación de los sistemas RNAV y RNP en las comunicaciones aeronáuticas.

El contenido tomado de este manual es el siguiente:

❖ **VOLUMEN I:**

- **PARTE A - CONCEPTO DE LA NAVEGACIÓN BASADA EN LA PERFORMANCE³⁸.** Contiene tres capítulos:
 - **Capítulo 1 - Descripción de la navegación basada en el rendimiento,** explica el concepto PBN y, concretamente, se hace hincapié en la designación de las especificaciones de navegación, así como la distinción entre las especificaciones RNP y RNAV. Este capítulo proporciona la base para este manual.

³⁸ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL. Documento 9613 Op. Cit. Pág I-(XI).

- Capítulo 2 - Conceptos de la Operación, proporciona un contexto para la PBN y explica que no existe de manera aislada, sino más bien como un componente integral de un espacio aéreo. En este capítulo también se aclara que PBN es uno de los facilitadores de CNS/ATM en un espacio aéreo.
- Capítulo 3 - Las partes interesadas en la «*Utilización de la navegación basada en el rendimiento*», se explica cómo los planificadores del espacio aéreo, diseñadores de procedimientos, autoridades de aeronavegabilidad, los controladores y los pilotos utilizan el concepto de la PBN. Escrito por especialistas de estas diversas disciplinas, este capítulo está destinado a los no especialistas en las distintas disciplinas.
- **PARTE B - ORIENTACIÓN DE APLICACIÓN³⁹**. contiene cinco capítulos sobre la base de tres procesos encaminados a la prestación de orientaciones para la aplicación de la PBN:
 - Capítulo 1: Introducción a los procesos de aplicación, proporciona una visión general de los tres procesos de ejecución con miras a fomentar el uso de las especificaciones de navegación en la aplicación de la PBN.
 - Capítulo 2: Proceso 1 - Determinación de Requisitos, se esbozan las medidas que un Estado o región a fin de determinar su estrategia y requisitos operacionales de navegación basada en el rendimiento mediante el desarrollo de un concepto de espacio aéreo.
 - Capítulo 3: Proceso 2 - Determinación de la Especificación de navegación de OACI para implementación, se explica cómo, una vez que los requisitos de navegación son identificados, se debería intentar utilizar una especificación de navegación existente para satisfacer las necesidades detectadas.
 - Capítulo 4: Proceso 3 - planificación y ejecución, proporciona orientación sobre las actividades y tareas que deben emprenderse a fin de posibilitar la aplicación operativa.
 - Adjuntos al Volumen I: Adjunto A, funcionamiento de los sistemas RNAV, y Adjunto B, Procesos de datos.

³⁹ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL. Documento 9613 – Op. Cit. Pág I-(XII).

❖ **VOLUMEN II:**

- **PARTE A - GENERALIDADES⁴⁰.** Abarca los siguientes capítulos:
 - Capítulo 1: Introducción. Revisión del concepto PBN y uso y alcances de la navegación.
 - Capítulo 2: Monitoreo de la performance y alerta a bordo. Introducción, error de navegación y componentes de alerta, navegación lateral y longitudinal, papel del monitoreo de performance y alerta a bordo.
 - Capítulo 3: Evaluación de la seguridad de sus consideraciones. Introducción, rendimientos de aviones, fallos en los sistemas e infraestructura.
- **PARTE B - APLICACIÓN RNAV⁴¹.** Se tomó el capítulo 2, aplicación de RNAV-5, debido a que es el sistema superior utilizado actualmente en las rutas aeronáuticas de Colombia. Las subsecciones tomadas en cuenta son: Introducción, antecedentes y propósitos; consideraciones ANSP, infraestructura de ayudas a la navegación, vigilancia ATS y Comunicación, franqueamiento de obstáculos y espaciado de ruta, consideraciones adicionales, publicación, entrenamiento de Controladores, estado de vigilancia, supervisión del sistema ATS.

⁴⁰ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL. Documento 9613 Op. Cit. Pág II-(I).

⁴¹Ibíd., Vol. 2, Pág II-(II).

6.2.1.3. Plan Mundial de Navegación Aérea 2013 - 2028 - Organización de Aviación Civil Internacional. Documento 9750-AN/963.

Este documento está concebido para orientar, en forma complementaria y en todo el sector, el progreso del transporte aéreo durante 2013–2028. El Consejo de la OACI aprueba trienalmente el GANP, que constituye una metodología estratégica renovable de 15 años, en la que se aprovechan las tecnologías existentes y se prevén futuros avances de conformidad con los objetivos operacionales convenidos entre los Estados y la industria. Las mejoras por bloques están organizadas en intervalos de cinco años a partir de 2013, continuando hasta 2028 y después. Este enfoque estructurado proporciona una base para que las estrategias de inversión sean seguras y generará el compromiso de los Estados, fabricantes de equipos, explotadores y proveedores de servicios. En la cuarta edición de este documento, se comienza por describir el contexto a nivel ejecutivo de los desafíos futuros de navegación aérea, al igual que la necesidad de contar con un enfoque estratégico basado en el consenso y transparente para hacer frente a dichos desafíos; se explora la necesidad de que la planificación de la aviación esté más integrada a niveles regional y estatal y se examinan las soluciones que se requieren al introducir la estrategia basada en el consenso para la modernización de la ingeniería de los sistemas de mejoras por bloques del sistema de aviación (ASBU). Además, se identifican los problemas que se enfrentarán en el futuro inmediato, así como los aspectos financieros de la modernización del sistema de aviación. Así mismo, se destaca la importancia cada vez mayor de colaborar y asociarse a medida que la aviación vaya reconociendo y afrontando los desafíos multidisciplinarios del futuro⁴².

⁴²ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL. Documento 9750-AN/963 – Plan Mundial de Navegación Aérea 2013-2028. Montreal, Canadá. Organización de Aviación Civil Internacional, Pág 3.

6.2.2. SEGUNDA ETAPA: INVESTIGACIÓN SOBRE INFRAESTRUCTURA AERONÁUTICA Y PROCEDIMIENTOS DE LA RUTA ACTUAL

Para la investigación sobre infraestructura aeronáutica y procedimientos de la ruta actual, se acudió al organismo encargado de la regulación aérea en Colombia, la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, con sede en la ciudad de Bogotá, D.C. Este organismo, dentro de sus funciones, tiene como prioridad coordinar con el Ministerio de Transporte la definición de políticas y planes generales de aeronáutica civil y transporte aéreo, dentro del plan global del transporte, propendiendo por el desarrollo aeronáutico y aeroportuario del país, lo cual implica que esta entidad sea quien desarrolle las pautas y condiciones para la elaboración de rutas aeronáuticas que cumplan con esta consigna, reafirmando dicho desarrollo en la función de ejecutar las actividades necesarias para conformar, mantener, administrar, operar y vigilar la infraestructura aeronáutica y aeroportuaria que sea de su competencia⁴³. Mediante la respectiva información que la página de este organismo expide para el público, se encontró mucha información en lo que respecta a la clasificación del espacio aéreo colombiano, reglas generales de vuelo, tanto VFR como IFR; procedimientos de espera, aproximación y salida; cartografía del espacio aéreo, tipos de ruta empleados, junto con la ubicación de las radioayudas a la navegación, y las cartas de navegación de cada aeropuerto adscrito a esta institución.

Siguiendo las publicaciones que la UAEAC expone en su página web, también se encontraron los planes maestros que son indispensables para realizar el análisis completo en materia de operatividad en los aeropuertos, debido a que, como la efectividad en las rutas aeronáuticas aumentaría, es importante tener en cuenta que la infraestructura de cada uno de los aeropuertos debe tener suficiente capacidad para albergar aeronaves comerciales, ya que las rutas aumentarían la frecuencia de los vuelos, por lo tanto, para evitar embotellamientos, es indispensable tener en cuenta las estadísticas operacionales de los aeropuertos.

⁴³AERONÁUTICA CIVIL, Funciones de la Aerocivil. Bogotá, 2015. [En Línea]
<<http://www.aerocivil.gov.co/Aerocivil/NEntidad/Paginas/Funciones.aspx>> Consultado el 01/05/2016.

Como el proyecto está enfocado a la modificación de la ruta BOGOTÁ – LETICIA (UB-689), la información de dichos aeropuertos es la siguiente:

6.2.2.1. Aeropuerto Internacional GR. Alfredo Vásquez Cobo (SKLT)⁴⁴

El Aeropuerto Internacional GR. Alfredo Vásquez Cobo está ubicado en la ciudad de Leticia (Amazonas), sirviendo como centro de operaciones para la misma ciudad.

- Coordenadas ARP: 04°11'30.87"S - 69°56'31.93"W
- Distancia y dirección a la ciudad: 1 Km
- Tránsito Autorizado: IFR/VFR
- Frecuencia TWR: 118.1 MHz

Datos de relevancia para el diseño de procedimientos desde SKLT⁴⁵:

- Elevación de la pista con rumbo 029°: 82,35 m/270 ft.
- Elevación de la pista con rumbo 209°: 79,30 m/260 ft.
- Ubicación del VOR/DME: A 1,29 km de la cabecera de la pista, con rumbo 183° respecto al norte magnético de la tierra.
- Ubicación del NDB: a 300 m de la cabecera sur de la pista.
- No se presentan obstáculos en el rumbo de la pista (029°), únicamente existe una antena a 3 km de distancia, fuera de dicho rumbo.

⁴⁴AERONÁUTICA CIVIL, Publicación de Información Aeronáutica – En ruta. Bogotá: Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2014. [En línea]
<<http://www.aerocivil.gov.co/AIS/AIP/Paginas/En-ruta.aspx>> Consultado el 01/05/2016.

⁴⁵ Ibíd. Consultado el 01/05/2016.

Figura 38. Ubicación geográfica y detalle del aeropuerto SKLT, mediante Google Maps.



6.2.2.2. Aeropuerto Internacional El Dorado⁴⁶

El Aeropuerto Internacional El Dorado está ubicado en la ciudad de Bogotá, D.C., sirviendo como centro de operaciones para la misma ciudad, y ciudades aledañas de la sabana de Bogotá.

- Coordenadas ARP: 04°42'05.76"N - 74°08'49.00"W
- Elevación: 8360 ft
- Distancia y dirección a la ciudad: 12 Km
- Tránsito Autorizado: Aproximación IFR y Salida IFR/VFR
- Frecuencia TWR: 118.1 MHz

Datos de relevancia para el diseño de procedimientos desde SKBO:

- Distancia de la cabecera de la pista al VOR/DME de Soacha y ubicación del mismo: A 17,48 km de distancia a 13R/31L RWY SKBO, con rumbo 236,5° respecto al norte magnético de la tierra.

⁴⁶ AERONÁUTICA CIVIL, Publicación de Información Aeronáutica – En ruta. Op. Cit. Consultado el 01/05/2016.

- Pista utilizada en SKBO para despegue: 13R/31L.
- Obstáculos detectados: Cerro “El Cable”, Cerro de Monserrate, Torres Colpatria, Davivienda y Edificio BD Bacatá.
- Elevación del DER: 5 ft
- Distancia de la cabecera de la pista a NDB-R y ubicación de la misma: 4,56 km, con rumbo 152° respecto al norte magnético de la tierra.
- Elevación de la pista 13R/31L: 2547,49 m/8360 ft⁴⁷.

Figura 39. Ubicación geográfica y detalle del aeropuerto SKBO, mediante Google Maps.



⁴⁷ AERONÁUTICA CIVIL, Publicación de Información Aeronáutica – En ruta. Op. Cit. Consultado el 29/06/16.

6.2.3. TERCERA ETAPA: INVESTIGACIÓN CORRESPONDIENTE A LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE CADA AERONAVE (ESPECIFICACIONES GEOMÉTRICAS, DE PESO, DE PERFORMANCE, PLANTA MOTRIZ), Y CAPACIDADES DE NAVEGACIÓN.

En la tercera etapa de este proyecto, se llevó a cabo la investigación correspondiente a todo tipo de datos técnicos, datos que son proporcionados por las casas matrices o fabricantes de las aeronaves que son usadas en el espacio aéreo colombiano, e información suministrada por los explotadores. Para tal fin, se investigaron los recursos en las respectivas páginas web de las empresas, en donde se aprecian los folletos de cada aeronave; en foros de aviación para aficionados y profesionales; también se investigaron los datos correspondientes a la planta motriz de cada una de las aeronaves, en las respectivas páginas web de los fabricantes de los motores y en documentos PDF que expiden autoridades aeronáuticas como la Agencia Europea de Seguridad Aérea - EASA y la Administración de Aviación Federal – FAA, y mediante una encuesta de capacidades de navegación, se indagó a las aerolíneas que actualmente operan para efectos de saber con qué capacidad cuentan sus aeronaves para volar.

El propósito de tomar los datos de las especificaciones técnicas y geométricas de cada aeronave es requerir de dichos datos para poder llevar a cabo los cálculos de performance, debido a que algunas ecuaciones y expresiones matemáticas empleadas para los cálculos son conformadas por constantes, dichas constantes están dentro de las especificaciones que cada aeronave tiene, recordando que en el performance se tiene en cuenta el comportamiento de la aeronave, tanto aerodinámico como de potencias. Por lo tanto, es un requerimiento tener en cuenta estas especificaciones. Así mismo, el propósito de haber realizado una encuesta es de determinar cuáles son las aerolíneas que actualmente están operando en la ruta BOGOTÁ – LETICIA (UB-689), qué aeronaves emplean en dicha ruta, y así mismo, las especificaciones de navegación con las que cuentan actualmente.

La encuesta relacionada, para este caso, se trata de una encuesta de capacidades de navegación aplicada a dichas aerolíneas que operan en la ruta mencionada, y es recomendada por la UAEAC, puesto que la autoridad aeronáutica en el momento de la realización del diseño de procedimientos, debe tener en cuenta el tipo de navegación con el que se diseña la ruta, al saber que no todas las aeronaves que operan en el país cuentan con todos los equipos para navegar en una ruta con navegación específica. Es así que, dependiendo de los resultados que arroja la encuesta, se diseñan las nuevas rutas, debido a que se debe diseñar la ruta especialmente para la aerolínea que no cuente con los equipos necesarios, en aras de contribuir a la eficiencia de la operación aeronáutica en el país.

A continuación, se muestran las aeronaves investigadas y las especificaciones encontradas (en Sistema Inglés):

6.2.3.1. AIRBUS A318

Figura 40. Ilustración de un avión Airbus A318 de Avianca Brasil.

Fotografía de ©Ricardo Rodrigues⁴⁸.



⁴⁸ PLANESPOTTERS.NET. PR-AVJ Avianca Brasil Airbus A318-121. Brasília, Brasil, 2013. [En línea] <<https://www.planespotters.net/photo/347013/pr-avj-avianca-brasil-airbus-a318-121>> Consultado el 10/05/2016.

Figura 41. Ilustración de las vistas del Airbus A318⁴⁹



ESPECIFICACIONES⁵⁰

- Especificaciones técnicas en cuanto a geometría del avión:
 - Longitud: 103.2 ft
 - Superficie alar: 1320 ft²
 - Distancia longitudinal del tren de aterrizaje: 36.30 ft
 - Altura: 41.2 ft
 - Envergadura: 111.11 ft
- Especificaciones técnicas de peso:
 - Carga paga máxima: 39462.74 lbf
 - Peso máximo del avión sin combustible: 116800 lbf
 - Peso máximo de despegue: 131000 lbf
 - Carga máxima de combustible: 59580 lbf
 - Peso máximo operacional: 88846.92 lbf
 - Peso máximo de aterrizaje: 123500 lbf
- Performance de la aeronave:
 - Distancia de despegue: 4986.77 ft
 - Velocidad de despegue: 153.88 KCAS
 - Velocidad de referencia para aterrizaje: 133.9 KIAS
 - Velocidad máxima de crucero: 0.82 M

⁴⁹ AIRBUS. A318 Technical Specifications. Toulouse, Francia, 2015. [En línea]
<<http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a320family/a318/specifications/>>
Consultado el 10/05/2016.

⁵⁰Ibíd., Consultado el 11/05/2016.

- Flujo de combustible a velocidad crucero: 5732.19 lbm/h
- Rango con máxima capacidad de pasajeros: 3100 NM
- Capacidad de pasajeros: 107 pax.
- Planta motriz⁵¹:
 - Motor de la aeronave: General Electric CFM56-5B
 - Empuje: 22000 lbf c/u.

6.2.3.2. AIRBUS A319

Figura 42. Ilustración de un avión Airbus A319-115 de Avianca.
Fotografía de ©Dirk Grothe⁵².



⁵¹AIRLINES INFORMATION. CFM56-5B Technical Data. Chicago, IL, EE.UU., 2012. [En Línea] <<http://www.airlines-inform.com/commercial-aircraft/airbus-a319.html>> Consultado el 29/04/2016.

⁵²PLANESPOTTERS.NET. D-AVYG Avianca Airbus A319-115(WL). Berlín, Alemania, 2015. [En línea] <<https://www.planespotters.net/photo/603945/d-avyg-avianca-airbus-a319-115wl>> Consultado el 10/05/2016.

Figura 43. Ilustración de las vistas del Airbus A319⁵³.



ESPECIFICACIONES⁵⁴

- Especificaciones técnicas en cuanto a geometría del avión:
 - Longitud: 111 ft
 - Superficie alar: 1320 ft²
 - Distancia longitudinal del tren de aterrizaje: 36.30 ft
 - Altura: 38.60 ft
 - Envergadura: 111.80 ft
- Especificaciones técnicas de peso:
 - Carga paga máxima: 39462.74 lbf
 - Peso máximo del avión sin combustible: 128970 lbf
 - Peso máximo de despegue: 141100 lbf
 - Carga máxima de combustible: 59580 lbf
 - Peso máximo operacional: 88846.92 lbf
 - Peso máximo de aterrizaje: 134500 lbf
- Performance de la aeronave:
 - Distancia de despegue: 4986.77 ft
 - Velocidad de despegue: 153.88 KCAS
 - Velocidad de referencia para aterrizaje: 133.9 KIAS
 - Velocidad máxima de crucero: 0.82 M

⁵³AIRBUS. A319 Technical Specifications. Toulouse, Francia, 2015. [En línea]
<<http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a320family/a319/specifications/>>
Consultado el 10/05/2016.

⁵⁴Ibíd., Consultado el 11/05/2016.

- Flujo de combustible a velocidad crucero: 5732.19 lbm/h
- Rango con máxima capacidad de pasajeros: 3700 NM
- Capacidad de pasajeros: 124 pax.
- Planta motriz⁵⁵:
 - Motor de la aeronave: General Electric CFM56-5B
 - Empuje: 22000 lbf c/u.

6.2.3.3. AIRBUS A320

Figura 44. Ilustración de un avión Airbus A320-232 de LAN.
Fotografía de ©Alex Barbosa⁵⁶.



⁵⁵Airlines Information. CFM56-5B Technical Data. Chicago, IL, EE.UU., 2012. [En Línea] <<http://www.airlines-inform.com/commercial-aircraft/airbus-a319.html>> Consultado el 29/04/2016.

⁵⁶PLANESPOTTERS.NET. CC-BAM LAN Chile Airbus A320-233(WL). Berlín, Alemania, 2015. <<https://www.planespotters.net/photo/327740/cc-cqp-lan-airlines-airbus-a320-233>> Consultado el 11/05/2016.

Figura 45. Ilustración de las vistas del Airbus A320⁵⁷.



ESPECIFICACIONES⁵⁸

- Especificaciones técnicas en cuanto a geometría del avión:
 - Longitud: 123 ft
 - Superficie alar: 1319.70 ft²
 - Distancia longitudinal del tren de aterrizaje: 45.32 ft
 - Altura: 38.60 ft
 - Envergadura: 111.90 ft
- Especificaciones técnicas de peso:
 - Carga paga máxima: 36000 lbf
 - Peso máximo del avión sin combustible: 137800 lbf
 - Peso máximo de despegue: 172000 lbf
 - Carga máxima de combustible: 60000.55 lbf
 - Peso máximo operacional: 93079 lbf
 - Peso máximo de aterrizaje: 145500 lbf
- Performance de la aeronave⁵⁹:
 - Distancia de despegue: 4461.9 ft
 - Velocidad máxima de crucero: 0.82 M

⁵⁷AIRBUS. A320 Technical Specifications. Toulouse, Francia, 2015. [En línea]
<<http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a320family/a320/specifications/>>
Consultado el 10/05/2016.

⁵⁸Ibíd., consultado el 11/05/2016.

⁵⁹AIRLINERS.NET, A320 Technical Data. Seattle, WA, EE.UU., 2013 [En línea]
<<http://www.airliners.net/aircraft-data/stats.main?id=23>> Consultado el 10/05/2016.

- Flujo de combustible a velocidad crucero: 9091 lbm/h
- Rango con máxima capacidad de pasajeros: 3300 NM
- Capacidad de pasajeros: 150 pax.
- Planta motriz⁶⁰:
- Motor de la aeronave: General Electric CFM56-5B
- Empuje: 22000 lbf c/u.

6.2.4. CUARTA ETAPA: MONITOREO DE VUELOS EN LA RUTA, MEDIANTE LA APLICACIÓN *FlightRadar24*.

FlightRadar24 es un rastreador de vuelo que muestra el tráfico aéreo en vivo de todo el mundo. Este aplicativo combina datos de varias fuentes de datos, incluyendo ADS-B, MLAT y FAA. Los datos ADS-B, MLAT y la FAA se agregan junto con horarios, estado de los vuelos, datos de compañías aéreas y aeropuertos para crear una experiencia única de seguimiento de vuelos en www.flightradar24.com y en aplicaciones de dispositivos móviles. Hoy en día, aproximadamente el 60% de todos los aviones de pasajeros (70% en Europa, 30% en los EE.UU.) están equipados con un transpondedor ADS-B. Este porcentaje es cada vez mayor porque el ADS-B se establece para sustituir el radar como el método primario de vigilancia para el control de la aeronave. *FlightRadar24* cuenta con una red de cerca de 2.000 receptores ADS-B en todo el mundo que recibe la información de vuelo de aeronaves con transpondedor ADS-B y envía esta información a nuestros servidores. Debido a la alta frecuencia utilizada (1090 MHz) la cobertura de cada receptor se limita a alrededor de 250-400 km (150-250 millas) en todas las direcciones dependiendo de la ubicación. Cuanto más lejos del receptor de un avión está volando, más alta que debe volar para ser cubierto por el receptor.

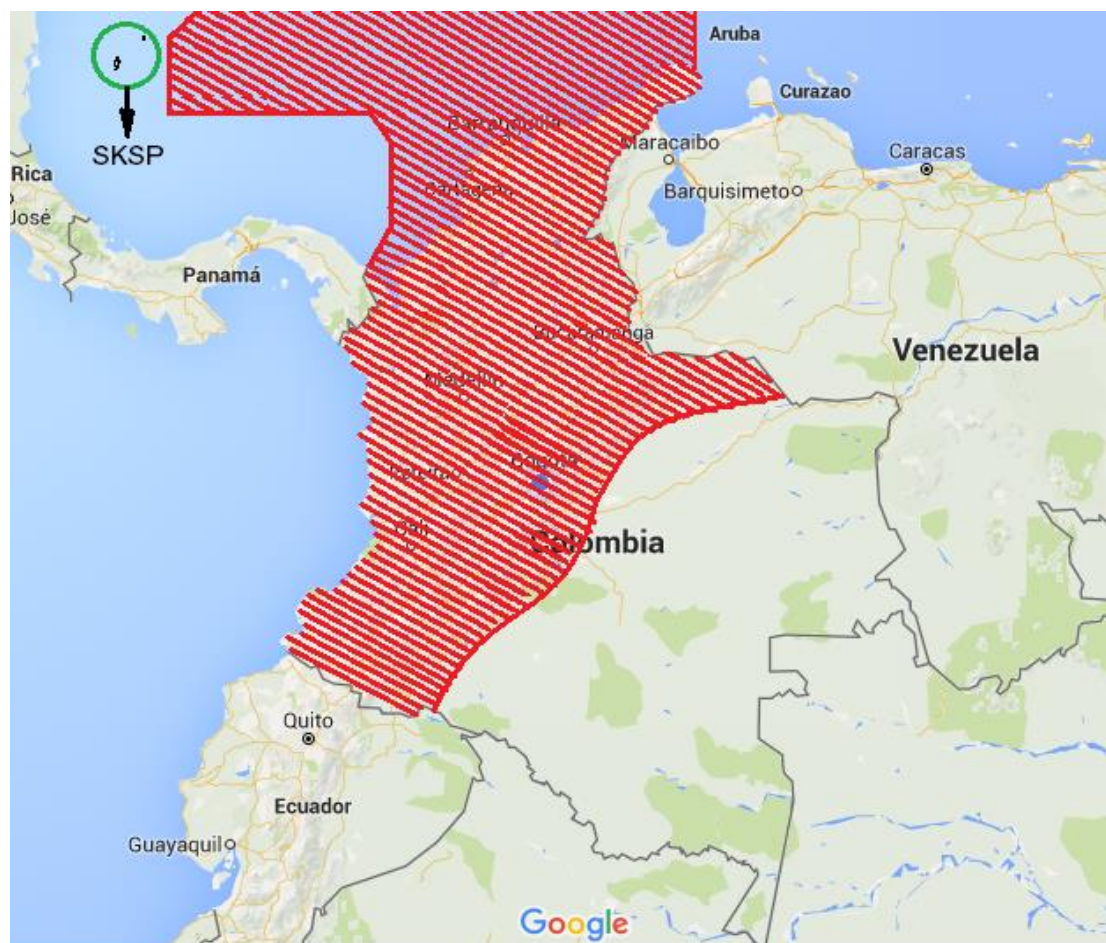
El límite de la distancia hace que sea muy difícil obtener cobertura ADS-B sobre los océanos. Alrededor del 99% de Europa está cubierta con receptores ADS-B. También hay una buena cobertura ADS-B en EE.UU., Canadá, el Caribe, Brasil, Rusia, Oriente Medio, India, Japón, Tailandia, Malasia, Indonesia, Australia y Nueva Zelanda. En otras partes del mundo la cobertura ADS-B varía.⁶¹

⁶⁰Airlines Information. Op. Cit., Consultado el 29/04/2016.

⁶¹Autor desconocido. Fumigando sobre Rosario. Rosario, Argentina, 2015 [En Línea] <<http://chemrosario.webcindario.com/paracontrolar/comofunciona.htm>>. Consultado el 20/05/2016.

En Colombia, la cobertura de la aplicación *FlightRadar24* es aproximadamente del 60% en lo que respecta a todo el territorio nacional, y los espacios tanto marítimos como aéreos. La cobertura no es total, debido a que no hay receptores de señal potentes en el Amazonas y en gran parte de la Orinoquía Colombiana.

Figura 46. Mapa estimado de cobertura, según los estudios realizados en este proyecto.



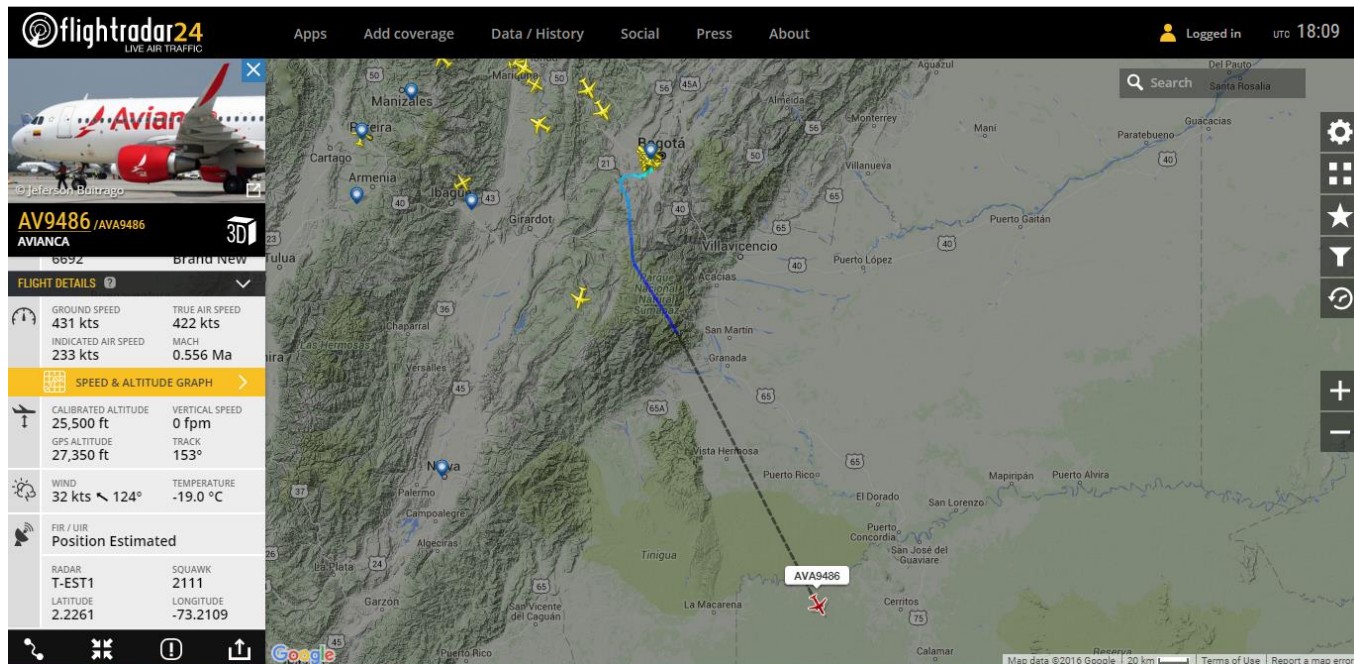
Para el caso del proyecto, se contó con suerte de que en el momento del monitoreo la cobertura haya mejorado, de tal manera que solamente la mitad del terreno afectado en realidad pudo ser monitoreado.

El monitoreo hecho en este proyecto se trató esencialmente de tomar screenshots o pantallazos al navegador que contiene la página web del aplicativo, señalando los vuelos correspondientes a las rutas que se tomaron en cuenta para el estudio. Cuando se selecciona el vuelo que se pretende monitorear, la aplicación arroja datos pertinentes al TAS (velocidad verdadera del avión), Velocidad respecto a la tierra, número MACH (solamente para aviones turbofan), altitud, velocidad vertical, *track* o rumbo, velocidad y temperatura del viento, FIR/UIR por donde el avión está volando y ubicación exacta de la aeronave. Estas constantes se expresan en unidades de sistema internacional, sistema empleado para cálculos y datos en aviación. En el monitoreo de los vuelos, la gran mayoría de los vuelos se evaluaron completamente, en doce momentos primordiales donde se ven los cambios en el comportamiento de las aeronaves. El objetivo de estos monitoreos es mostrar el comportamiento real de las aeronaves, tomando los datos relevantes para los cálculos que se harán en la siguiente etapa. Para ello, solamente se tomaron en cuenta los siguientes parámetros:

- Velocidad con respecto a la tierra, o *Ground Speed*.
- Altitud calibrada, o *calibrated altitude*.
- Rata de ascenso, o *Vertical Speed*.
- Número MACH, si es el caso.

Figura 47. Recorrido monitoreado de SKBO a SKLT.

Nótese que la ruta está resaltada en colores, de los cuales se dice que cada color representa una altitud determinada.



6.2.5. QUINTA ETAPA: PRIMEROS CÁLCULOS DE PERFORMANCE

En esta etapa, se procedieron a realizarse los cálculos de performance pertinentes a las aeronaves evaluadas por cada ruta, como se mencionó en la descripción de la tercera etapa de este proyecto, y con los parámetros evaluados en el monitoreo, es decir, en la anterior etapa.

Los cálculos en este proyecto son indispensables, ya que estos cálculos permiten tener una perspectiva más amplia acerca del comportamiento aerodinámico y de performance de las aeronaves correspondientes a cada ruta. Para ello, se utilizaron libros de Microsoft Excel, donde se depositan los datos obtenidos por el monitoreo, y luego se emplean para hallar características relevantes en el comportamiento del vuelo de las aeronaves, como temperaturas y densidades del aire, pesos, consumo específico de combustible, empuje requerido y empuje real de las aeronaves, permitiendo así hacer un resumen mediante gráficos.

6.2.5.1. PROCEDIMIENTO

El procedimiento a tener en cuenta para los cálculos es el siguiente:

- 1) Para empezar, se toman todos los datos referentes a las especificaciones técnicas que se investigaron en la tercera etapa de este proyecto, y se incluyen en la primera hoja del libro. Las especificaciones se clasificaron en cuatro categorías: Medidas y geometría de la aeronave, pesos, performance y planta motriz.

Figura 48. Especificaciones técnicas del Airbus A319 en el libro de Excel.

AIRBUS A319 SPECIFICATIONS			
MEASURES AND GEOMETRY			
Acronym	Specification	Units of Measure	Value
l	Longitude	(ft)	111.00
S_w	Wing Area	(ft ²)	1320.00
g_{LD}	Long. Dist. Landing Gear	(ft)	36.30
h	Height	(ft)	38.60
b	Wingspan	(ft)	111.80
ϕ_{prop}	Propeller Diameter	(ft)	N/A
WEIGHTS			
W_{PMAX}	Max. Payload Cargo	(lb)	39462.74
$W_{Fuel/Dry}$	Max. Zero Fuel Weight	(lb)	128970.4
$W_{TO MAX}$	Max. Take-off Weight	(lb)	141100
$W_{Fuel/Max}$	Max. Fuel Load	(lbm)	59580
W_{OE}	Operational Empty Weight	(lb)	88846.92
W_{LMAX}	Max. Landing Weight	(lb)	134500
PERFORMANCE			
d_{TO}	Take-off Distance	(ft)	4986.77
V_{TO}	Take-off Speed	(KCAS)	153.88
V_L	Reference Landing Speed	(KIAS)	133.9
RC	Rate of Climb	(ft/min)	N/A
V_{CRUISE}	Max. Cruise Speed	(M)	0.82
$F_{Fuel/C}$	Fuel Flow at Cruise Speed	(lbm/h)	5732.19
R	Range with max. pax.	(Nm)	3700
$Pax.$	Passengers	N/A	124
ENGINE - CFM56-5B			
P_{TO}	Take-off Power	(SHP)	
P_{CRUISE}	Take-off Power - One Engine	(SHP)	
P_{CONTIN}	Max continuous	(SHP)	
$P_{CLIMB MAX}$	Max climb Power	(SHP)	

- 2) La segunda hoja del libro corresponde a los cálculos de performance en sí, donde se crea una base de datos iniciando con las alturas registradas en los monitoreos con la aplicación *FlightRadar24*, clasificadas por ruta. En total son doce alturas tomadas, y para cada variable o constante también son tomados doce datos. Las alturas deben incluirse en pies [ft], debido a que se emplearán únicamente unidades del Sistema Anglosajón, o Sistema Inglés.

Figura 49. Alturas tomadas para las rutas en las que se emplea el Airbus A319 (Ejemplo).

CONSTANTS	UNIT MEASURE	SKAR	SKBG	SKCC	SKCL	SKMR	SKPE	SKPS	SKRH	SKSM	SKVP
h_1	[ft]	14450	11450	10825	17150.00	15175.00	16600.00	15950.00	13500.00	38000.00	9475.00
h_2	[ft]	17600	17150	15175	21150.00	24925.00	17600.00	25350.00	19600.00	37975.00	13925.00
h_3	[ft]	17600	20475	18525	24000.00	30575.00	17600.00	34975.00	24575.00	38025.00	24950.00
h_4	[ft]	17600	23025	25875	24000.00	33250.00	17600.00	35000.00	35950.00	37525.00	28875.00
h_5	[ft]	17600	23000	27025	24000.00	36025.00	17600.00	32625.00	36025.00	29100.00	33975.00
h_6	[ft]	17600	23000	27000	24000.00	36000.00	16550.00	31350.00	36000.00	23625.00	34000.00
h_7	[ft]	15875	23000	27000	24000.00	35675.00	14025.00	24450.00	36000.00	17050.00	28275.00
h_8	[ft]	14075	22825	24050	13025.00	25975.00	9250.00	19150.00	35975.00	11575.00	20300.00
h_9	[ft]	10850	20975	21700	11300.00	23050.00	7225.00	16100.00	26475.00	9925.00	13100.00
h_{10}	[ft]	9150	17575	17225	9575.00		6875.00	13400.00	11800.00	7300.00	7050.00
h_{11}	[ft]	6475	7800	17075	5700.00		5775.00	11350.00	5875.00	4000.00	4450.00
h_{12}	[ft]	5550	4150	17075	4450.00		4325.00	9900.00	1700.00	1350.00	2700.00

- 3) En la tercera hoja del documento se incluye la tabla ISA de temperaturas y densidades del aire, en un rango de 0 a 40000 ft. Las unidades empleadas en este caso, para densidad es el slug/ft³, y para la temperatura es el grado Kelvin [K].

Figura 50. Muestra de la tabla ISA para todos los libros de cálculos.

h	ρ	T
0	2.38E-03	518.69
500	2.34E-03	516.9
1000	2.31E-03	515.12
1500	2.27E-03	513.3333
2000	2.24E-03	511.5483
2500	2.21E-03	509.7633
3000	2.18E-03	507.9783
3500	2.14E-03	506.1933
4000	2.11E-03	504.4083
4500	2.08E-03	502.6233
5000	2.05E-03	500.8383
5500	2.02E-03	499.0533
6000	1.99E-03	497.2683
6500	1.96E-03	495.4833
7000	1.93E-03	493.6983
7500	1.90E-03	491.9133
8000	1.87E-03	490.1283
8500	1.84E-03	488.3433
9000	1.81E-03	486.5583
9500	1.78E-03	484.7733
10000	1.76E-03	482.9883
10500	1.73E-03	481.2033
11000	1.70E-03	479.4183
11500	1.67E-03	477.6333
12000	1.65E-03	475.8483
12500	1.62E-03	474.0633
13000	1.60E-03	472.2783
13500	1.57E-03	470.4933
14000	1.55E-03	468.7083
14500	1.52E-03	466.9233

- 4) Volviendo a la segunda hoja, se busca tomar las densidades y temperaturas que no están dentro de la tabla, debido a que las alturas que se tomaron en los monitoreos no están en múltiplos de 500, por lo tanto, se requiere hacer una interpolación lineal que permita hallar las densidades y temperaturas exactas. Para ello, se emplea la siguiente ecuación:

$$y_x = y_0 + \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}(y_1 - y_0)$$

Donde:

y_x = Resultado de la interpolación lineal.

y_0 = Valor anterior en y al valor de y_x .

y_1 = Valor posterior en y al valor de y_x .

x = Valor de la altura que no aparece en la tabla.

x_0 = Valor en x (altura) correspondiente a la temperatura o densidad y_0 .

x_1 = Valor en x (altura) correspondiente a la temperatura o densidad y_1 .

Como el programa de Microsoft Excel no posee un comando o función que permita interpolar directamente todos los valores, ya que se genera un error de precisión, se emplea una programación desde el editor de programador, para incluir la función de interpolar. El lenguaje SQL utilizado en este programa es el siguiente:

Figura 51. Función de Interpolación Lineal en lenguaje SQL para ser usado en Excel.

```
Function INTERPOLAR(valor_buscado As Double, matriz_buscar_en As Range, matriz_resultado As Range) As Double
nElementos = matriz_buscar_en.Count
For i = 1 To nElementos - 1
    If valor_buscado >= matriz_buscar_en(i) And valor_buscado <= matriz_buscar_en(i + 1) Then
        a = matriz_buscar_en(i)
        b = matriz_buscar_en(i + 1)
        m = matriz_resultado(i)
        n = matriz_resultado(i + 1)
        x = valor_buscado
        INTERPOLAR = m + (m - n) / (a - b) * (x - a)
        Exit Function
    ElseIf valor_buscado <= matriz_buscar_en(i) And valor_buscado >= matriz_buscar_en(i + 1) Then
        a = matriz_buscar_en(i)
        b = matriz_buscar_en(i + 1)
        m = matriz_resultado(i)
        n = matriz_resultado(i + 1)
        x = valor_buscado
        INTERPOLAR = m + (m - n) / (a - b) * (x - a)
        Exit Function
    Else
        End If
Next
End Function
```

Al aplicar la programación desde el editor de Visual Basic, entonces se procede a guardar el archivo como *Libro de Excel Habilitado para Macros*, en donde permitirá ejecutar las interpolaciones y guardar los cambios que sean requeridos, sin borrar la función.

Cuando se aplica la función en las celdas, esta aparece como **INTERPOLAR**, la cual se compone de la siguiente manera:

=INTERPOLAR(x, [x₀:x₁], [y₀:y₁])

Donde:

x = Altura en la base de datos.

x_0 = Rango inicial de alturas en la tabla ISA.

x_1 = Rango final de alturas en la tabla ISA.

y_0 = Rango inicial de temperaturas o densidades en la tabla ISA.

y_1 = Rango final de temperaturas o densidades en la tabla ISA.

Distribuyendo la función a lo largo de las celdas, se obtienen las densidades y las temperaturas, de acuerdo con la variación de la altura.

Figura 52. Muestra de densidades y temperaturas tomadas a partir de las interpolaciones.

ρ_{SL}	[slugs/ft ³]	2.38E-03	2.38E-03	2.38E-03	2.38E-03	2.38E-03	2.38E-03	2.38E-03	2.38E-03	2.38E-03	2.38E-03
$\rho_{\infty h_1}$	[slugs/ft ³]	1.52E-03	1.68E-03	1.71E-03	1.39E-03	1.49E-03	1.42E-03	1.45E-03	1.57E-03	6.46E-04	1.78E-03
$\rho_{\infty h_2}$	[slugs/ft ³]	1.37E-03	1.39E-03	1.49E-03	1.22E-03	1.07E-03	1.37E-03	1.05E-03	1.28E-03	6.47E-04	1.55E-03
$\rho_{\infty h_3}$	[slugs/ft ³]	1.37E-03	1.25E-03	1.33E-03	1.10E-03	8.72E-04	1.37E-03	7.39E-04	1.08E-03	6.46E-04	1.07E-03
$\rho_{\infty h_4}$	[slugs/ft ³]	1.37E-03	1.14E-03	1.03E-03	1.10E-03	7.89E-04	1.37E-03	7.38E-04	7.12E-04	6.61E-04	9.28E-04
$\rho_{\infty h_5}$	[slugs/ft ³]	1.37E-03	1.14E-03	9.92E-04	1.10E-03	7.09E-04	1.37E-03	8.08E-04	7.09E-04	9.21E-04	7.68E-04
$\rho_{\infty h_6}$	[slugs/ft ³]	1.37E-03	1.14E-03	9.93E-04	1.10E-03	7.10E-04	1.42E-03	8.47E-04	7.10E-04	1.12E-03	7.67E-04
$\rho_{\infty h_7}$	[slugs/ft ³]	1.45E-03	1.14E-03	9.93E-04	1.10E-03	7.19E-04	1.54E-03	1.09E-03	7.10E-04	1.40E-03	9.49E-04
$\rho_{\infty h_8}$	[slugs/ft ³]	1.54E-03	1.15E-03	1.10E-03	1.59E-03	1.03E-03	1.80E-03	1.30E-03	7.11E-04	1.67E-03	1.25E-03
$\rho_{\infty h_9}$	[slugs/ft ³]	1.71E-03	1.23E-03	1.20E-03	1.69E-03	1.14E-03	1.91E-03	1.44E-03	1.01E-03	1.76E-03	1.59E-03
$\rho_{\infty h_{10}}$	[slugs/ft ³]	1.80E-03	1.37E-03	1.39E-03	1.78E-03	2.38E-03	1.93E-03	1.58E-03	1.66E-03	1.91E-03	1.92E-03
$\rho_{\infty h_{11}}$	[slugs/ft ³]	1.96E-03	1.88E-03	1.40E-03	2.01E-03	2.38E-03	2.00E-03	1.68E-03	1.99E-03	2.11E-03	2.08E-03
$\rho_{\infty h_{12}}$	[slugs/ft ³]	2.01E-03	2.10E-03	1.40E-03	2.08E-03	2.38E-03	2.09E-03	1.76E-03	2.26E-03	2.28E-03	2.19E-03
T_{SL}	[K]	288.16	288.16	288.16	288.16	288.16	288.16	288.16	288.16	288.16	288.16
$T_{\infty h_1}$	[K]	259.50	265.45	266.69	254.15	258.06	255.24	256.53	261.39	216.11	269.37
$T_{\infty h_2}$	[K]	253.25	254.15	258.06	246.21	238.73	253.25	237.88	249.29	216.11	260.54
$T_{\infty h_3}$	[K]	253.25	247.55	251.42	240.56	227.52	253.25	218.79	239.42	216.11	238.68
$T_{\infty h_4}$	[K]	253.25	242.49	236.84	240.56	222.21	253.25	218.74	216.86	216.11	230.89
$T_{\infty h_5}$	[K]	253.25	242.54	234.56	240.56	216.73	253.25	223.45	216.73	230.45	220.78
$T_{\infty h_6}$	[K]	253.25	242.54	234.61	240.56	216.76	255.34	225.98	216.76	241.30	220.73
$T_{\infty h_7}$	[K]	256.67	242.54	234.61	240.56	217.40	260.34	239.67	216.76	254.34	232.08
$T_{\infty h_8}$	[K]	260.24	242.89	240.46	262.33	236.64	269.81	250.18	216.81	265.20	247.90
$T_{\infty h_9}$	[K]	266.64	246.56	245.12	265.75	242.44	273.83	256.23	235.65	268.48	262.18
$T_{\infty h_{10}}$	[K]	270.01	253.30	254.00	269.17	288.16	274.52	261.58	264.76	273.68	274.18
$T_{\infty h_{11}}$	[K]	275.32	272.69	254.29	276.86	288.16	276.71	265.65	276.51	280.23	279.33
$T_{\infty h_{12}}$	[K]	277.15	279.93	254.29	279.33	288.16	279.58	268.53	284.79	285.48	282.81

- 5) Se anexan las velocidades de la aeronave tomadas en los monitoreos del *FlightRadar24*. En los *screenshots*, las velocidades se manejan en nudos [kt], pero para emplear las velocidades en los cálculos, es necesario hacer la conversión a ft/s. En las celdas, cada valor incluido se multiplica por 1.68781, que es el factor de conversión para cambio de unidades.
- 6) El siguiente paso es emplear los tiempos de vuelo de cada una de las aeronaves. Para poder tomar el tiempo de recorrido en cada vuelo, se tiene en cuenta la hora de despegue de la aeronave y la hora actual de vuelo, lo cual arroja una diferencia en minutos, es decir:

$$t = t_{ACT} - t_{DEP}$$

Donde:

t = Tiempo de recorrido

t_{ACT} = Hora actual.

t_{DEP} = Hora de despegue de la aeronave.

Al saber que el resultado de esa diferencia está en minutos, debe hacerse la conversión a horas, es decir, se debe dividir el número de minutos en 60, puesto que una hora se compone de 60 minutos. La conversión debe hacerse para emplearse en los cálculos, ya que se requiere que la unidad de medida sea en horas.

- 7) Se anexan las velocidades verticales o ratas de ascenso (*Rate of Climb*) tomadas en los monitoreos del *FlightRadar24*. En los *screenshots*, las velocidades se manejan en pies por minuto [fpm] o [ft/m], pero para emplear las velocidades en los cálculos, es necesario hacer la conversión a ft/s. En las celdas, cada valor incluido se divide por 60, ya que 1 minuto equivale a 60 segundos.
- 8) Después de haber tomado las velocidades verticales de cada aeronave, se procede a hallar los ángulos de ataque de la aeronave. Para ello, se emplea la siguiente ecuación:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{RC}{V_{\infty}}\right) \times \frac{180}{\pi}$$

Donde:

α = Ángulo de ataque.

RC = Rata de ascenso, o *Rate of Climb*.

V_{∞} = Velocidad de la aeronave.

El ángulo de ataque de una aeronave es igual al arcoseno de la relación entre la rata de ascenso y la velocidad de la aeronave. Para poder obtener un resultado en degreanones, es necesario multiplicar el resultado por $180/\pi$.

- 9) El siguiente paso es hallar los números MACH de las aeronaves, indispensables para poder obtener posteriormente el consumo específico de combustible (SFC), de acuerdo a los tipos de motor que son empleados en el vuelo. Dado que en una parte de los monitoreos de las aeronaves no se muestran datos de las velocidades en número MACH, entonces se utiliza la ecuación:

$$M = 0.0008957V_{\infty}$$

Donde la velocidad de la aeronave se multiplica por el factor de conversión. En promedio, el número MACH de cada aeronave oscila entre 0,40 y 0,70.

- 10) Se hallan las distancias recorridas por cada aeronave, de acuerdo al tiempo transcurrido y a la velocidad de la aeronave en cada instante evaluado. La ecuación utilizada es:

$$d = V_{\infty}t$$

Donde la velocidad de la aeronave está expresada en nudos [kt] y el tiempo está expresado en horas. Al haber hallado todas las distancias recorridas en esos doce momentos, se hace una sumatoria total de las distancias recorridas por aeronave.

- 11) Se hallan las relaciones de temperaturas y densidades. Son denotadas con las siguientes expresiones:

- Para densidades:

$$\sigma = \frac{\rho_{\infty}}{\rho_{SL}}$$

- Para temperaturas:

$$\theta = \frac{T_{\infty}}{T_{SL}}$$

Donde:

T_{∞} = Temperatura de la corriente de aire libre.

T_{SL} = Temperatura a nivel del mar (a 0 ft en la tabla ISA).

ρ_{∞} = Densidad de la corriente de aire libre.

ρ_{SL} = Densidad a nivel del mar (a 0 ft en la tabla ISA).

Su cálculo permitirá hallar el consumo específico de combustible.

12) A continuación, se halla el consumo específico de combustible (SFC) por aeronave, teniendo en cuenta la relación de temperaturas de la corriente libre y a nivel del mar. Se utilizan las siguientes expresiones:

- Para aviones jet y turbofan:

$$TSFC_{jet} = (0.4 + 0.45M)\sqrt{\theta}$$

- Para aviones turboprop:

$$TSFC_{prop} = (0.2 + 0.9M)\sqrt{\theta}$$

Donde:

$TSFC$ = Consumo Específico de Combustible.

M = Número MACH.

θ = Relación de temperaturas.

La unidad de medida del consumo específico de combustible es dada en [lbm / (lbf · hr)], y se halla el TSFC para hallar el gasto de combustible por aeronave.

13) Después de hallar el consumo específico de combustible, se procede a hallar el gasto de combustible a partir del anterior mencionado, del recorrido y del tiempo empleado en cada vuelo. La expresión matemática empleada para hallar este consumo es el siguiente:

$$W_{FW} = \frac{m_{fuel}}{1/(TSFC \times t)}$$

Donde:

W_{FW} = Peso de combustible gastado, en lbf.

m_{fuel} = Masa de combustible cargado en la aeronave (de acuerdo a las especificaciones técnicas).

$TSFC$ = Consumo específico de Combustible.

t = Tiempo de recorrido

Este peso es restado al peso de carga de la aeronave, el cual es la sumatoria del peso al vacío de la aeronave, carga paga y peso total del combustible. Para determinar la masa de combustible cargado, se divide el peso (sacado de las especificaciones) con la gravedad de la Tierra (32.20 ft/s²).

- 14) Obteniendo los pesos de la aeronave después de cada recorrido, se procede a hallar el coeficiente de *Lift*, o coeficiente de sustentación de la aeronave, elemento indispensable para determinar posteriormente si la sustentación de la aeronave es igual al peso de la misma. La ecuación del coeficiente es:

$$C_L = \frac{2W}{\rho_{\infty} V_{\infty}^2 S_w} = \frac{W \cos \alpha}{\rho_{\infty} V_{\infty}^2 S_w}$$

Donde:

C_L = Coeficiente de sustentación.

W = Peso de la aeronave en vuelo.

ρ_{∞} = Densidad de la corriente de aire libre.

V_{∞} = Velocidad de la aeronave.

S_w = Superficie alar de la aeronave.

α = Ángulo de ataque.

- 15) Después de hallar el respectivo coeficiente, se procede a hallar la sustentación de la aeronave. La fórmula empleada es la siguiente:

$$L = W = \frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2 S_w C_L$$

Donde:

L = Sustentación de la aeronave.

W = Peso de la aeronave en vuelo.

C_L = Coeficiente de sustentación.

ρ_{∞} = Densidad de la corriente de aire libre.

V_{∞} = Velocidad de la aeronave.

S_W = Superficie alar de la aeronave.

- 16) Se requiere hallar el coeficiente de arrastre, o coeficiente de *drag*, para obtener posteriormente el empuje requerido por la aeronave para la operación de vuelo. La ecuación del coeficiente es la siguiente:

$$C_D = C_{D,0} + KC_L^2$$

Donde:

C_D = Coeficiente de arrastre.

$C_{D,0}$ = Coeficiente de arrastre en sustentación igual a cero.

K = Constante referente a la suma de la presión y la velocidad en un punto cualquiera.

C_L = Coeficiente de sustentación.

Para hallar el coeficiente de arrastre en sustentación igual a cero, se utiliza:

$$C_{D,0} = \frac{C_L^2}{\pi e AR}$$

Donde:

e = Eficiencia de Oswald⁶².

C_L = Coeficiente de sustentación.

AR = *Aspect Ratio* que a su vez, es hallado así:

$$AR = \frac{b^2}{S_w}$$

Al ser b la envergadura de la aeronave, y S_w la superficie alar de la aeronave.

⁶² SCHOLZ, D. NIȚĂ, M. Estimating the Oswald Factor from Basic Aircraft Geometrical Parameters [En Línea] <http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/OPerA/OPerA_PUB_DLRK_12-09-10.pdf> Consultado el 29/05/16.

La constante K es hallada de la siguiente manera:

$$K = \frac{1}{\pi e AR}$$

17) El empuje requerido se halla mediante la siguiente ecuación:

$$T_R = D = \frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2 S_w C_D$$

Este empuje requerido debe ser menor al empuje técnico de los motores de la aeronave, dato que aparece en las especificaciones de la planta motriz, ya que es el empuje mínimo que necesita la aeronave, en las condiciones que se presentan en la investigación

18) Teniendo ambos coeficientes de sustentación y arrastre, se procede a hallar la relación entre ellos, es decir, la relación de eficiencia aerodinámica:

$$E_{m\acute{a}x} = \frac{C_L}{C_D}$$

19) Al obtener dicha relación de eficiencia aerodinámica, se procede a hallar el empuje adimensional de la aeronave, de la siguiente manera:

$$Z = \frac{T}{W} E_{m\acute{a}x}$$

Donde:

Z = Empuje adimensional.

T = Empuje real.

W = Peso de la aeronave.

$E_{m\acute{a}x}$ = Relación de eficiencia aerodinámica.

20) Con el empuje adimensional de cada aeronave, se hallan las velocidades U , velocidades adimensionales que permitirán hallar velocidades máximas y mínimas de operación, de acuerdo con la velocidad de referencia que se halle después:

- Velocidad adimensional máxima: $U_{m\acute{a}x} = \sqrt{Z + \sqrt{Z^2 - 1}}$
- Velocidad adimensional mínima: $U_{min} = \sqrt{Z - \sqrt{Z^2 - 1}}$

21) La velocidad de referencia se halla de la siguiente manera:

$$V_R = \sqrt{\frac{2W}{\rho_{SL}S_w}} * \sqrt[4]{\frac{K}{C_{D,0}}}$$

Donde:

V_R = Velocidad de referencia.

W = Peso de la aeronave en vuelo.

$C_{D,0}$ = Coeficiente de arrastre cuando la sustentación es cero.

ρ_{SL} = Densidad del aire a nivel del mar

K = Constante K .

S_w = Superficie alar de la aeronave.

22) Velocidades máximas y mínimas, de acuerdo al producto entre la velocidad de referencia y velocidades adimensionales:

- Velocidad máxima: $V_{m\acute{a}x} = U_{m\acute{a}x}V_R$
- Velocidad mínima: $V_{min} = U_{min}V_R$

23) Por último, se determina la velocidad de pérdida, o velocidad de *stall*, mediante la siguiente ecuación:

$$V_{STALL} = \sqrt{\frac{2}{\rho_{\infty}C_{LMAX}} \left(\frac{W}{S_w} \right)}$$

Donde:

V_{STALL} = Velocidad de pérdida

W = Peso de la aeronave en vuelo.

$C_{L_{MAX}}$ = Coeficiente máximo de sustentación⁶³.

ρ_{∞} = Densidad de la corriente del aire libre.

S_W = Superficie alar de la aeronave

Cabe resaltar que cuando la velocidad de pérdida es mayor que la velocidad mínima, la primera mencionada pasa a ser la velocidad mínima, ya que es imposible que exista una aeronave con una velocidad de pérdida menor a la velocidad mínima.

Así, con los pasos mencionados, se realiza un cálculo detallado, para visualizar el comportamiento de las aeronaves mediante gráficos, de tal manera que pueda analizarse de una manera más sencilla y práctica. En este caso se analizan, de manera preliminar, los cálculos referentes a tiempo, distancia y consumo de combustible, ítems fundamentales para el desarrollo del proyecto.

6.2.6. SEXTA ETAPA: ANÁLISIS DE LA RUTA ACTUAL.

Esta etapa consiste en realizar una evaluación y análisis de la actual ruta, y también plantea la idea inicial de la modificación de la ruta, teniendo en cuenta la parte visual. En este punto, se citarán los apartes de los manuales que fueron útiles para el desarrollo de esta etapa, los procedimientos básicos y los procedimientos visuales por parte de los integrantes del grupo, para ser más explícitos con lo que se ha pretendido demostrar en el desarrollo de este trabajo.

⁶³ UNIVERSITY OF TEXAS, Aerospace Engineering and Engineering Mechanics. Typical Values for maximum Lift coefficient. [En Línea]
<<http://www.ae.utexas.edu/~plv955/class/aircraft/Suggestions.pdf>> Consultado el 29/05/16.

6.2.6.1. ANÁLISIS VISUAL

En el análisis visual de las rutas aeronáuticas, se tienen en cuenta los *screenshots* de *FlightRadar24*, puesto que en ellas se muestran los recorridos reales de cada una de las aeronaves en las rutas seleccionadas en la segunda etapa de este proyecto. Como se tienen en cuenta dichos pantallazos, es necesario utilizar las cartas aeronáuticas que la UAEAC publica en sus páginas, para tener referencias técnicas y datos más exactos sobre las rutas empleadas. En este punto, también se puede considerar el uso de una aplicación en Internet llamada *SkyVector*, la cual permite obtener también acceso a mapas y cartas aeronáuticas correspondientes a las rutas.

Mediante el análisis visual, se pretende tener una visión clara de la composición actual más detallada sobre la ruta BOGOTÁ – LETICIA (UB-689). Algunas rutas, de manera visual, pueden ser modificadas, pero teniendo en cuenta que en el espacio aéreo colombiano existen áreas delimitadas como áreas restringidas o zonas prohibidas debido a que es espacio aéreo de uso militar, entonces la modificación de ciertas rutas debe ser suspendida, ya que si se procede a hacer una modificación mínima, no tendrá la efectividad que se espera en el momento de reducir la distancia de recorrido, y por lo tanto, la reducción de tiempo y de consumo de combustible no será significativa o notoria.

Los parámetros tenidos en cuenta para el análisis visual de las rutas son los siguientes:

- Sentido de las aerovías existentes, es decir, la dirección por la cual las aeronaves transitan en cada tramo de ruta. Cada ruta es designada con un nombre, que se compone de tres o cuatro caracteres alfanuméricos, y que a su vez en las cartas aeronáuticas muestra el sentido o dirección de la ruta.
- Distancia entre puntos de notificación obligatoria y radioayudas en tierra, es decir, la distancia de cada uno de los tramos de la ruta, entre el procedimiento de salida y de llegada de la aeronave. La distancia es dada en millas náuticas [NM], y también aparece en las cartas aeronáuticas, junto con el nombre de la ruta y el nivel de vuelo.

- Nivel de vuelo correspondiente a cada tramo de la ruta. Debido a que es importante tener en cuenta la topografía del espacio donde se va a volar, se deben establecer altitudes o niveles de vuelo mínimas, para evitar colisiones en tierra. Esto se hace mediante una evaluación de obstáculos en las respectivas áreas o superficies limitadores de obstáculos que ya se diseñaron, determinando el nivel de seguridad con la que contarían las aeronaves.

De ser necesaria la modificación de puntos de notificación o de referencia, se aplicará lo estipulado en los manuales mencionados anteriormente, especialmente el Documento 8168, ya que este documento es fundamental para la construcción de procedimientos.

6.2.6.2. EVALUACIÓN DE ZONAS TERRITORIALES

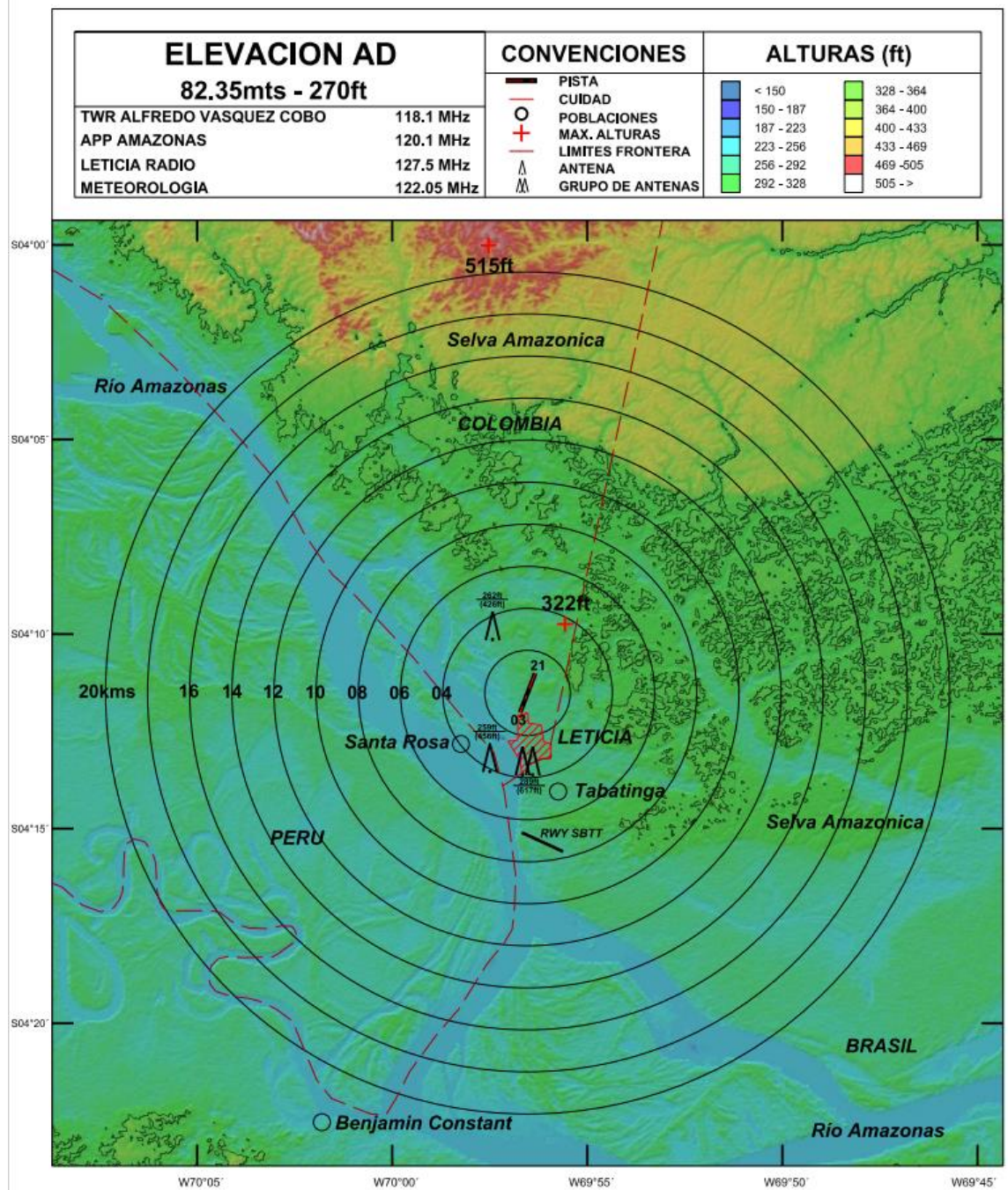
Evaluación de zonas territoriales y espacio aéreo de Leticia

En el momento no existen restricciones y/o prohibiciones para usar el espacio aéreo de Leticia, y lo referente al TMA Amazónica. Se prevé la existencia del Grupo Aéreo del Amazonas (GAAMA), base aérea perteneciente a la Fuerza Aérea Colombiana, que se alterna el funcionamiento de la pista con el aeropuerto civil. Así mismo, se prevé la existencia del Batallón de Infantería de Selva No. 50 «GR. Luis Acevedo Torres», adscrito al Ejército Nacional de Colombia. A pesar de que hay unidades militares en esta zona, no existe restricción documentada de espacio aéreo sobre ellas.

Evaluación de zonas montañosas en Leticia

De acuerdo a la carta de visibilidad que está incluida dentro del AIP del Aeropuerto de Leticia, en un radio de 20 km con centro en el VOR – SKLT, existe una elevación no considerable de una zona montañosa dentro de la selva amazónica colombiana. La elevación de esta cadena de montañas es de 515 ft, es decir, 156 m. Dentro del círculo de evaluación de zonas, únicamente se encuentra como obstáculo una antena con elevación de 265 ft. De manera restante, la zona se encuentra libre de obstáculos, tanto naturales como artificiales.

Figura 53. Carta de visibilidad para SKLT⁶⁴.



⁶⁴ AERONÁUTICA CIVIL. Publicación de Información Aeronáutica – SKLT. Op. Cit. Página 37.

Antecedentes de accidentes en la zona amazónica próxima a Leticia

En el momento se reporta solamente un accidente:

Un avión Boeing 727-100, de matrícula HK-3667, perteneciente a la aerolínea AEROSUCRE S.A., se precipitó a tierra en la selva amazónica, el 19 de noviembre de 2006. La sinopsis del informe final emitido por la UAEAC dice que esta aeronave despegó del Aeropuerto Internacional Eldorado con destino al Aeropuerto Alfredo Vásquez Cobo de la ciudad de Leticia, en cumplimiento del vuelo KRE-142. El vuelo fue despachado con el cumplimiento de todos los requisitos establecidos por la autoridad aeronáutica. El despegue, ascenso y crucero se llevó a cabo en forma normal. A 82 NM de Leticia el piloto solicitó proceder en aproximación directa para la pista 21, diciendo tener a Leticia a la vista. El control de aproximación de Leticia le informó a la tripulación los cambios en las condiciones atmosféricas en forma oportuna. Dentro de esa información les informaron la visibilidad de 4000 m reducida por niebla. La tripulación colacionó la información. Luego el primer oficial reportó que estaba a 10 NM y 3000 ft de altura, y solicitó que le incrementaran las luces al máximo. La intensidad de las luces fue incrementada, y el copiloto dijo tener las luces a la vista. A 6 NM la aeronave reportó tener el campo a la vista. La torre de control recibió la información y le dio instrucciones correspondientes. Posteriormente la torre de control preguntó si requerían cambio de luces en la pista. El copiloto solicitó toda la intensidad. Luego la torre solicitó distancia. La respuesta fue que estaban a 3 NM y que no prendían las luces de aterrizaje porque perdían la profundidad. La torre de control le informó que no tenía la aeronave a la vista y que con la pista a la vista estaba autorizado a aterrizar con viento en calma. La aeronave colacionó la autorización. Finalmente, se escuchó en la grabación un sonido de exclamación. La aeronave habría golpeado a una torre de televisión, que lo a precipitarse a tierra. Posterior al impacto la aeronave se incineró completamente. Todos los ocupantes del avión fallecieron por lesiones múltiples⁶⁵.

⁶⁵ AERONÁUTICA CIVIL. Informe del accidente de la aeronave HK-3667. Página 3. [En Línea] <<http://www.aerocivil.gov.co/AAeronautica/InvAccidentes/LAccidentes/Accidentes/HK-3667.pdf>>. Consultado el 01/07/16.

Evaluación de zonas territoriales y de espacio aéreo de Bogotá

Consideraciones a tener en cuenta para el diseño de salida en SKBO⁶⁶:

- Se restringen sobrevuelos de todo tipo de aeronaves por debajo de los 11500 ft de altura, sobre la ciudad de Bogotá.
- Se prohíbe el sobrevuelo de aeronaves de ala fija y helicópteros a cualquier altitud en el sector comprendido por el círculo de radio de 2 NM, con centro de punto de coordenadas 04° 35' 53" N 74° 04' 52" W, correspondiente a la Casa de Nariño y su perímetro.
- Se restringen sobrevuelos de cualquier tipo de aeronave entre GND y 18500 ft en espacio aéreo formado por la unión de las siguientes coordenadas:
 - a) 04° 37' 32" N 74° 04' 52" W – Edificio CAD (Av. Carrera 30 con Av. Calle 26)
 - b) 04° 36' 40" N 74° 04' 13" W – Torre Colpatria (Av. Carrera 7 con Av. Calle 26).
 - c) 04° 36' 20" N 74° 03' 20" W – Iglesia del Cerro de Monserrate.
 - d) 04° 34' 16" N 74° 04' 07" W – Escuela Logística del Ejército Nacional. (Av. Calle 11 Sur con Carrera 10 Este)
 - e) 04° 34' 16" N 74° 05' 17" W – Parque Metropolitano San Cristóbal. (Calle 18 Sur con Carrera 3 Este).
 - f) 04° 35' 01" N 74° 06' 27" W – Parque Nacional Enrique Olaya Herrera. (Av. Carrera 7 con Av. Calle 39).

Evaluación de zonas montañosas de Bogotá

Teniendo en cuenta que la salida de la aeronave no tendrá viraje alguno, sino que será en línea recta, se considera que debe haber un estudio de la zona montañosa de Bogotá. La recomendación tenida en cuenta para este punto en los criterios generales de diseño, es que debe hacerse un estudio de altitudes de esa cadena montañosa que rodea a Bogotá en el oriente, en un radio de 46 km con centro en una radioayuda elegida. En este caso, se eligió el NDB Romeo. La altitud más alta será tenida en cuenta para separación vertical de la aeronave con las montañas.

⁶⁶ AERONÁUTICA CIVIL. ENR 6.4 TMA Bogotá [En Línea]

<<http://www.aerocivil.gov.co/AIS/AIP/AIP%20Generalidades/En%20Ruta/45%20ENR%206.4.pdf>

> Página 1. Consultado el 01/07/16.

Figura 54. Mapa de la zona evaluada de SKBO.

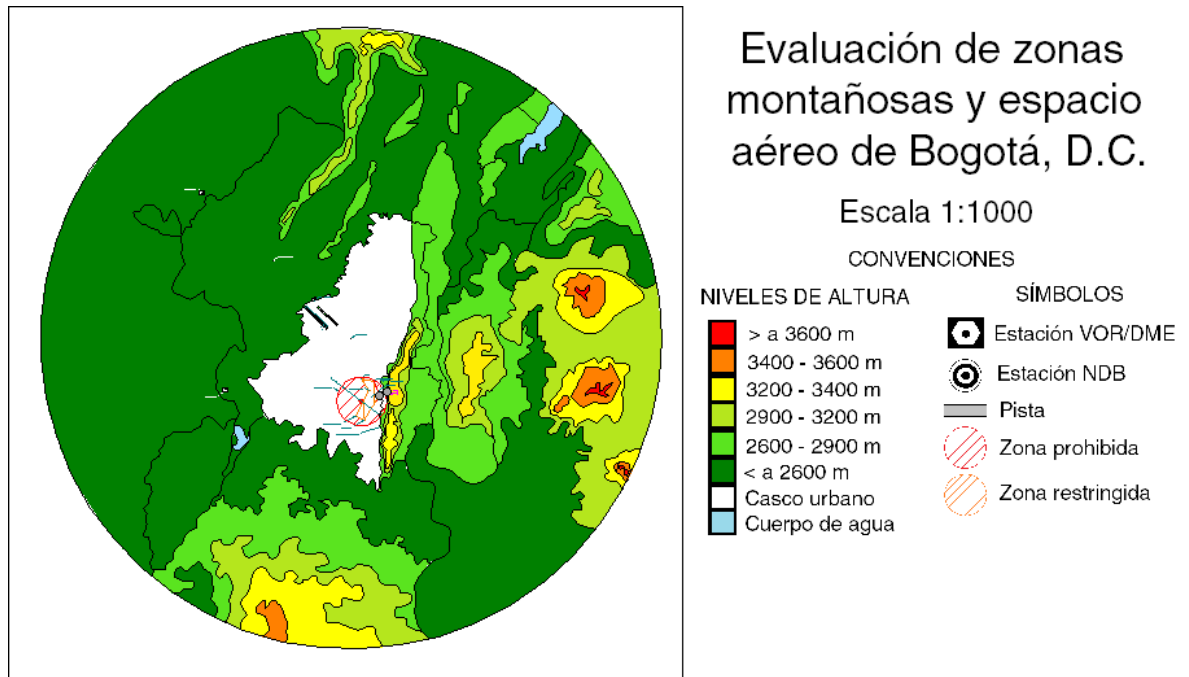


Figura 55. Detalle de casco urbano de SKBO.

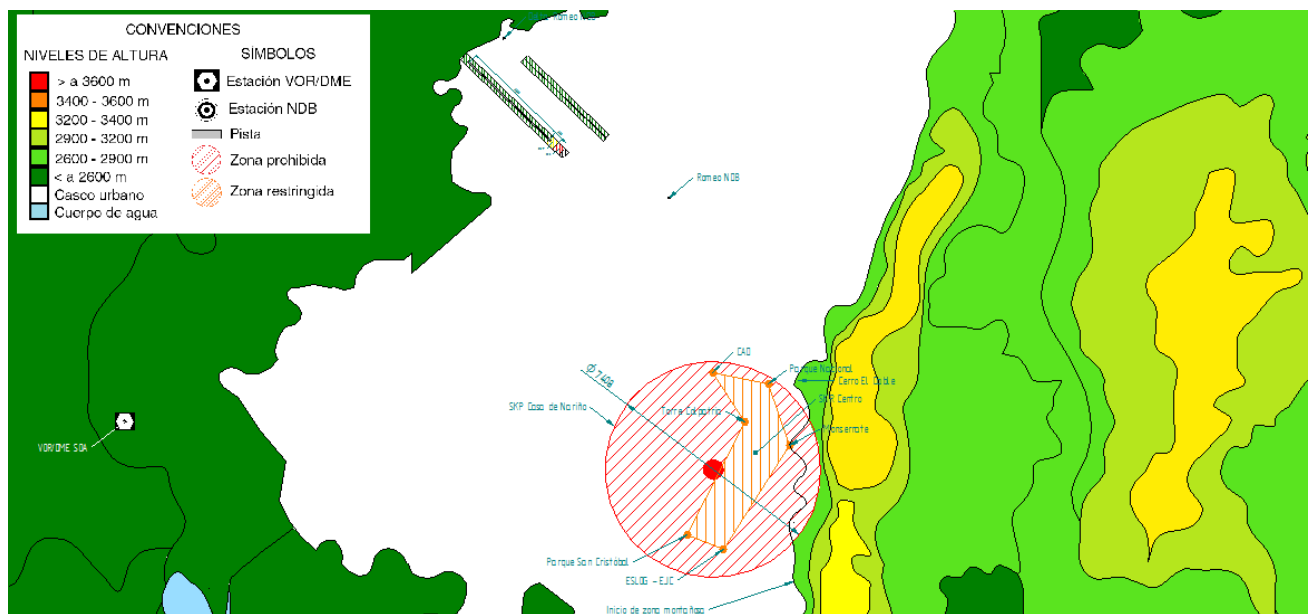
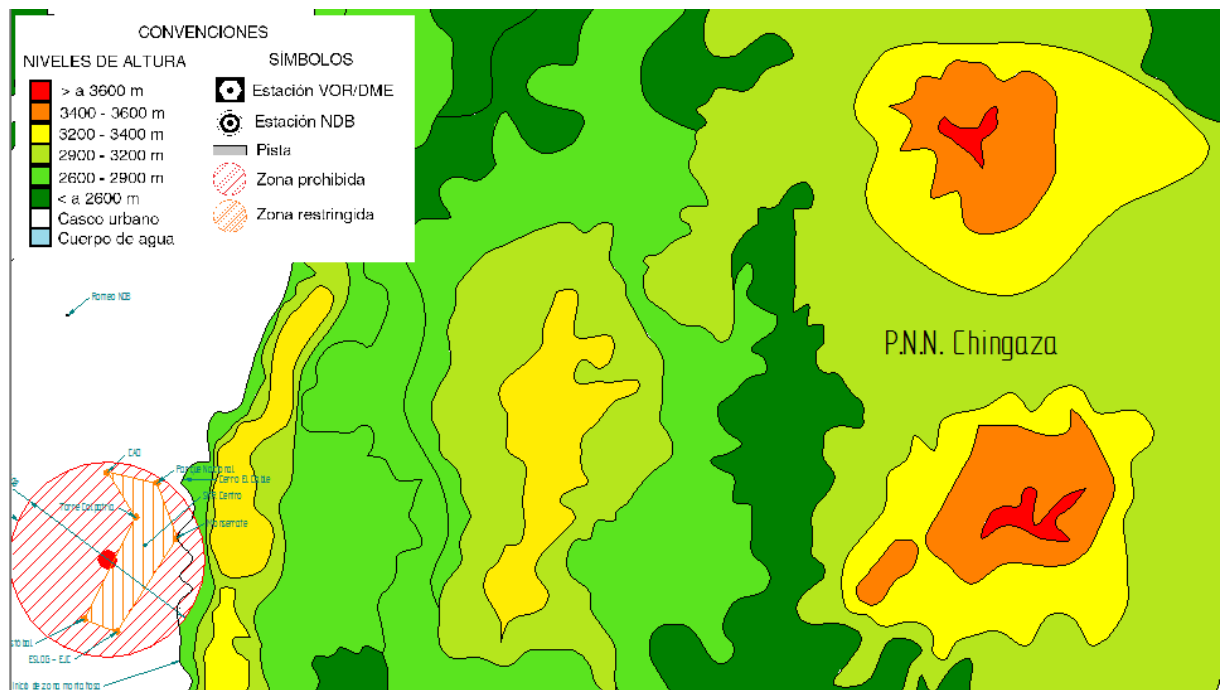


Figura 56. Detalle del terreno montañoso del Parque Nacional Natural Chingaza. Nótese que en esta área se encuentran las altitudes más grandes.



En el radio de 46 km, con centro en la estación NDB Romeo, ubicada en la Avenida Boyacá con Calle 64, en el occidente de Bogotá, se encuentra todo el casco urbano de la misma ciudad. Alrededor de la ciudad, se encuentran los municipios de Soacha, La Mesa, El Colegio, Silvania, Fusagasugá, Cajicá, Zipaquirá, Chía, Cota, Chipaque, Madrid, Mosquera y Facatativá, entre otros; así mismo, se destacan sectores montañosos que rodean la ciudad, como una zona considerable del Parque Nacional Natural Chingaza. En ese parque se encuentra la altitud más grande considerada, que es aproximadamente de 3800 m.s.n.m., altitud que se considerará en lo referente a franqueamiento de obstáculos.

Antecedentes de accidentes en la zona montañosa de Bogotá

En el momento solamente se reporta un accidente:

El vuelo 422 de Air France, operado por la aerolínea ecuatoriana TAME con un Boeing 727, de matrícula HC-BSU, se precipitó en el cerro El Cable de la ciudad de Bogotá, el 20 de abril de 1998. El accidente fue producido por distracción de la tripulación del avión, y por el mal tiempo que se presentaba sobre el oriente de Bogotá. De acuerdo al informe final que la UAEAC publicó, producto de la investigación del accidente, se resume que en el momento de efectuar las listas de chequeo durante el rodaje hacia la cabecera 13 izquierda, éstas fueron leídas parcialmente omitiendo algunos procedimientos con respecto al despegue y posterior ascenso. La tripulación realizó el despegue sin activar el transpondedor, razón por la cual en ese momento el radar no pudo detectarlo, impidiendo al ATC ejercer un control positivo sobre la aeronave y alertarlo oportunamente sobre su desviación respecto al procedimiento. Así mismo, la tripulación recibió la autorización para efectuar salida Girardot 1, la cual no cumplió continuando el rumbo de la pista (134°), por lo que se quedó sin protección de obstáculos a la aeronave, y así colisionó contra el terreno. En parte también se considera que el mal tiempo hizo la visibilidad reducida, contribuyendo a que la aeronave chocara contra el cerro⁶⁷.

6.2.6.3. MODIFICACIÓN PROPUESTA DESDE LA PARTE VISUAL

Actualmente la ruta BOGOTÁ – LETICIA (UB-689), en su procedimiento de salida, requiere realizar una salida con viraje de rumbo nominal de 264°, para dirigirse hacia el VOR/DME SOA, y luego tomar rumbo de 174° para dirigirse hacia el punto de notificación *DANSA*. A partir de este punto comienza a tomar como tal la ruta que está dibujada en las cartas aeronáuticas, en su tramo W18. La distancia recorrida en total hasta el VOR/DME SJE (que es el punto en común donde la actual ruta y la ruta propuesta se unen) es de 330,94 km (176 NM).

⁶⁷ AERONÁUTICA CIVIL. Informe del accidente de la aeronave - Vuelo 422. Página 6. [En Línea] <<http://www.aerocivil.gov.co/AAeronautica/InvAccidentes/Accidentes/HCBSU.PDF>> Consultado el 02/07/16.

La proposición que el grupo de trabajo plantea para este caso, es la de cambiar la salida con viraje por una salida en línea recta, con anchura en la superficie de ascenso basada en el VOR/DME BOG. Esta salida se efectúa con rumbo nominal de 134°, el mismo rumbo que tiene la pista 13R/31L, cruzando la zona montañosa de la ciudad hasta llegar a un punto de notificación creado, que se designó como *CALVO*, luego en ese punto se debe de realizar un viraje de 7° para llegar al VOR/DME de VVC, y luego de cruzar dicha radioayuda, la aeronave toma rumbo de 160° para llegar al VOR/DME SJE. La distancia recorrida en total, hasta el punto en común, es de 297,37 km (160,56 NM), lo cual acorta la distancia considerablemente.

Figura 57. Mapa de recorrido actual en el tramo señalado.

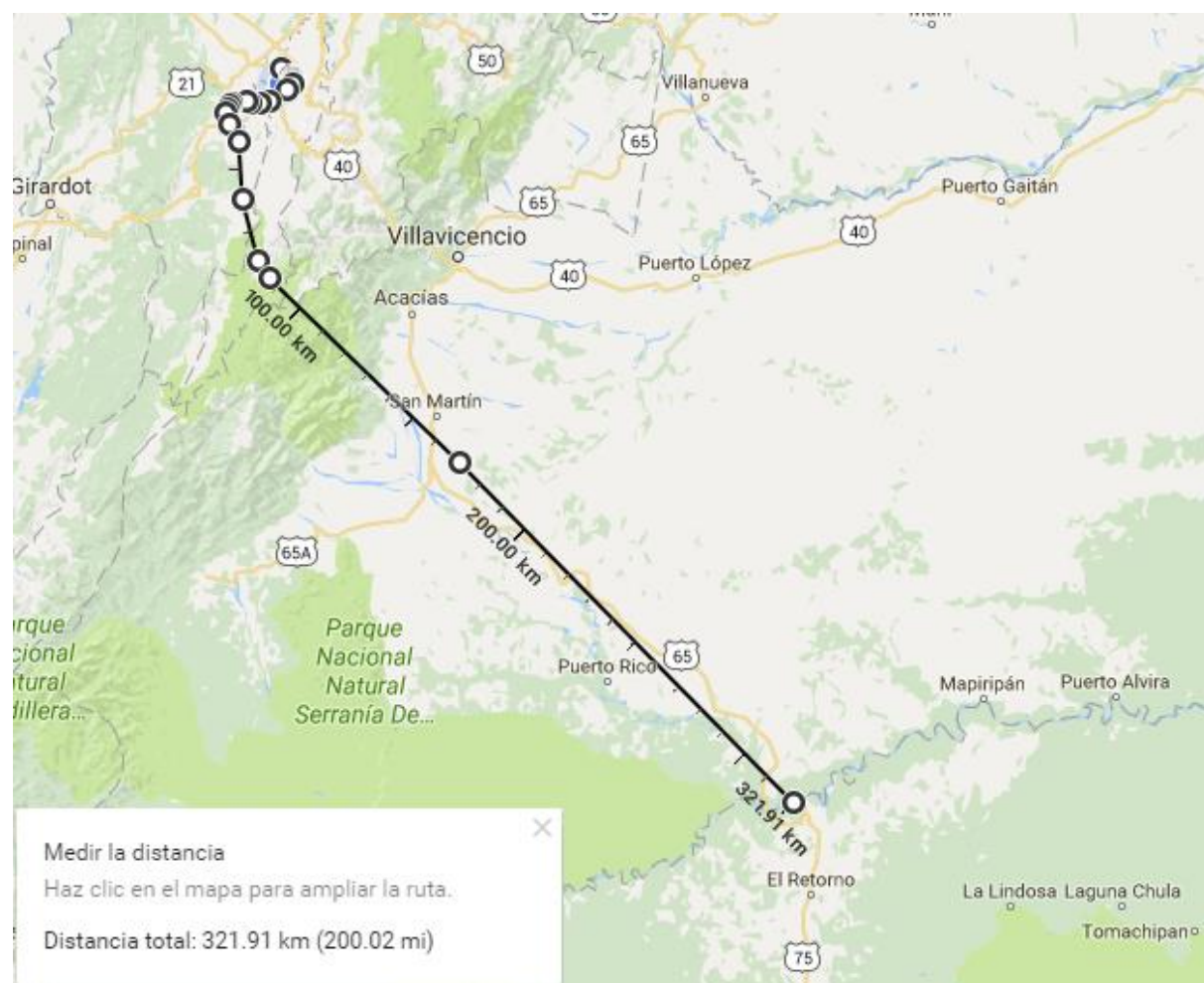
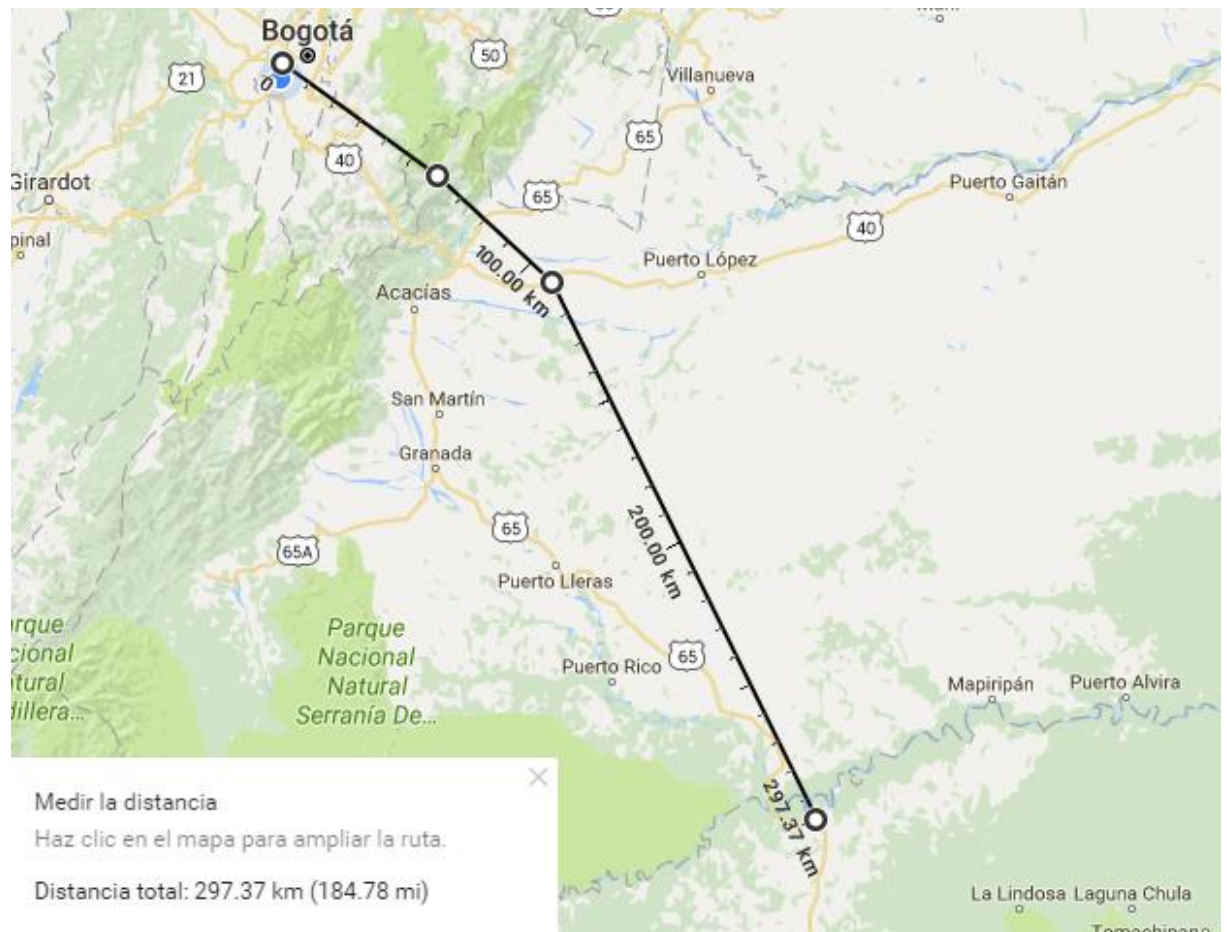


Figura 58. Mapa de recorrido propuesto por el grupo de trabajo.



6.2.7. SÉPTIMA ETAPA: DISEÑO DE LA NUEVA RUTA AERONÁUTICA

En esta etapa del proyecto se realiza el planteamiento de la propuesta desde la parte de ingeniería, habiendo realizado el análisis respectivo a la parte visual, con el fin de cuantificar el bosquejo que se propuso en la etapa anterior. Mediante Solid Edge ST7, se realizan los planos correspondientes a la ruta propuesta, con las mediciones y estándares que la OACI establece en los manuales utilizados para este fin, incluyendo procedimientos y cálculos correspondientes a pendientes de ascenso y aproximación, diseño de SLO, evaluación de obstáculos y semianchura de área.

6.2.7.1. REFERENCIAS Y DOCUMENTOS PARA DISEÑO

- Documento 8168. Volumen II, anexando información en caso de usar otro tipo de salidas: “Área de viraje” – Sección 2, capítulo 3. “Puntos de referencia de área terminal” – Sección 2, capítulo 2.
- Anexo 14 de la OACI – Superficies limitadoras de obstáculos.
- ENR 6.4 Área control terminal de Bogotá
- ENR 6.1 Área control terminal Amazónica
- AIP – SKBO y SKLT.

6.2.7.2. DISEÑO DE SLO

Para el estudio completo de las zonas territoriales y de espacio aéreo, es necesario recurrir al Anexo 14, Volumen I, Capítulo 4, que habla sobre la restricción y eliminación de obstáculos en el diseño de aeródromos.

Se cita textualmente la finalidad del capítulo correspondiente:

«La finalidad de las especificaciones del presente capítulo es definir el espacio aéreo que debe mantenerse libre de obstáculos alrededor de los aeródromos para que puedan llevarse a cabo con seguridad las operaciones de aviones previstas y evitar que los aeródromos queden inutilizados por la multiplicidad de obstáculos en sus alrededores. Esto se logra mediante una serie de superficies limitadoras de obstáculos que marcan los límites hasta donde los objetos pueden proyectarse en el espacio aéreo.»⁶⁸

Existen nueve tipos de superficies limitadoras que componen un solo sistema para determinado aeropuerto:

1) Superficie Horizontal Externa

Documento 9137 – Parte 6 (Manual de servicios de aeropuertos)

Según la experiencia de algunos Estados, la construcción de estructuras de gran altura en la vecindad de los aeropuertos, más allá de las áreas actualmente reconocidas por el Anexo 14 como áreas en las que puede ser necesario restringir las nuevas construcciones, puede originar graves problemas para las operaciones.

⁶⁸ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL. Anexo 14 – Aeródromos. Op. Cit. Página 4-1.

Las complicaciones que se presentan para las operaciones pueden dividirse en dos grupos: las que afectan la seguridad y las que afectan la eficiencia⁶⁹.

- Consecuencias para la seguridad: Es especialmente conveniente examinar con gran detenimiento todas las propuestas de construcción de postes elevados u otras estructuras reticuladas de gran altitud en zonas que de una u otra manera serían adecuadas para su utilización por las aeronaves en circuitos visibles amplios, en las trayectorias de descenso hacia el circuito o el aeropuerto, o en las trayectorias de ascenso en el despegue. No se puede confiar invariablemente en que el peligro se evitará por medio de señales o iluminación, en vista del carácter de estas estructuras relativamente poco visibles, especialmente en condiciones de visibilidad reducida, y tampoco será siempre posible evitar el peligro que suponen meramente notificando su existencia.
- Consecuencias para la eficiencia: Si se construyen estructuras elevadas en zonas que de otra forma serían adecuadas para los procedimientos de aproximación por instrumentos, o cerca de ellas, puede que sea necesario adoptar alturas de vuelo mayores, con el efecto adverso consiguiente en la regularidad y en la duración del procedimiento de aproximación tales como la necesidad de denegar la utilización de altitudes útiles a las aeronaves en los circuitos de espera correspondientes. Dichas estructuras pueden limitar además la flexibilidad deseable para dirigir por radar las aproximaciones iniciales, así como la facilidad de efectuar virajes durante la subida a continuación del despegue o en la aproximación frustrada.

⁶⁹ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL Documento 9137, Parte 6, Montreal: OACI, Segunda Edición, 1983. Página 1

En vista de estas consideraciones de carácter operacional, que pueden adquirir importancia, las autoridades pudieran considerar conveniente adoptar medidas que les permitan conocer de antemano todas las propuestas para construir estructuras de gran altura, con el fin de poder estudiar las consecuencias, desde el punto de vista aeronáutico, y tomar las medidas que estén a su alcance para proteger los intereses de la aviación. Al calcular el efecto que una nueva construcción que se propone causaría en las operaciones, las estructuras elevadas no tendrían importancia inmediata si se propone situarlas en:

- a) Una zona en la que ya existan bastantes obstáculos, debido al terreno o a estructuras de altura equivalente; y
- b) una zona que se pueda evitar con garantías de seguridad mediante procedimientos prescritos en relación con las ayudas a la navegación, cuando convenga.

Como especificación de carácter general para la superficie horizontal externa, las superficies elevadas pueden considerarse de posible importancia si su altura es mayor de 30 m por encima del nivel del terreno donde estén situadas, y también mayor de 150 m por encima de la elevación del aeropuerto, estando situadas dentro de un radio de 15000 m a partir del centro del aeropuerto o ARP, cuando el número de clave de la pista sea 3 o 4. Pudiera ser necesario ampliar las zonas en cuestión para que coincidan con las superficies de determinación de obstáculos que figuran en los PANS-OPS para cada procedimiento de aproximación aplicable al aeropuerto considerado.

2) Superficie Cónica⁷⁰

Una superficie cónica es una superficie de pendiente ascendente y hacia afuera que se extiende desde la periferia de la superficie horizontal interna.

⁷⁰ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Anexo 14 – Aeródromos. Op. Cit. Página 4-1.

Características de la superficie cónica. Los límites de la superficie cónica comprenderán:

- a) un borde inferior que coincide con la periferia de la superficie horizontal interna; y
- b) un borde superior situado a una altura determinada sobre la superficie horizontal interna.

La pendiente de la superficie cónica se medirá en un plano vertical perpendicular a la periferia de la superficie horizontal interna correspondiente.

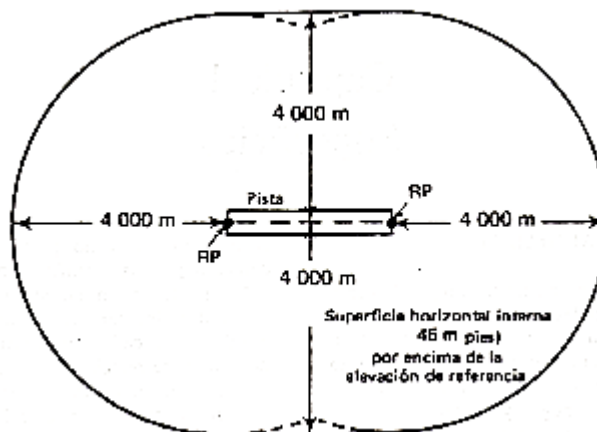
3) Superficie Horizontal Interna⁷¹

Una superficie horizontal interna es una superficie situada en un plano horizontal sobre un aeródromo y sus alrededores.

Características: El radio o límites exteriores de la superficie horizontal interna se medirán desde el punto o puntos de referencia que se fijen con este fin.

Determinación de la extensión de la superficie horizontal interna⁷²:

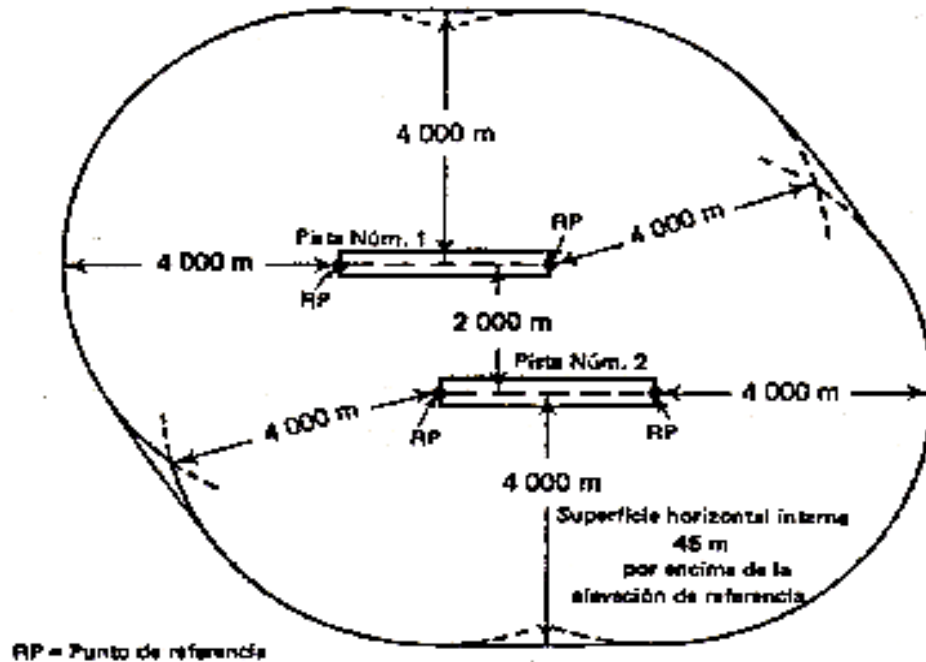
Figura 59. Superficie horizontal interna para una pista única de número de clave 4.



⁷¹ Ibíd. Página 4-1.

⁷² ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL. Documento 9137 – Parte 6. Op. Cit. Página 2.

Figura 60. Superficie horizontal interna compuesta, para dos pistas paralelas de número de clave 4.



Determinación de la elevación de referencia para la superficie horizontal interna⁷³:

Para conseguir el objetivo de la superficie horizontal interna, que es el de proteger el espacio aéreo para el circuito visual dentro del cual la aeronave deba volar antes de aterrizar, posiblemente después de descender a través de las nubes sobre una instalación alineada con una pista distinta de la utilizada para el aterrizaje, es conveniente que las autoridades adopten como referencia una elevación a base de la cual se determine la altura de la superficie horizontal interna. Al elegir esta elevación de referencia, se debe tener en cuenta los siguientes factores:

- a) las elevaciones de los puntos de referencia que se utilicen más frecuentemente para reglaje de altímetro;
- b) las altitudes mínimas de vuelo en circuito utilizadas o que se requieran; y
- c) la naturaleza de las operaciones que se lleven a cabo en el aeropuerto.

⁷³ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL. Documento 9137 – Parte 6. Op. Cit. Página 2.

En las pistas relativamente a nivel, la elección de la elevación de referencia no es crítica, pero cuando las elevaciones de los umbrales difieren en más de 6 m, la referencia que se elija debería de tener en cuenta los factores anteriores. En el caso de superficies horizontales internas complejas, no es esencial una elevación común, pero cuando las superficies se superponen, debe considerarse más importante la superficie más baja.

4) Superficie de aproximación⁷⁴

La superficie de aproximación es un plano inclinado o combinación de planos anteriores al umbral.

Características de la superficie de aproximación: los límites de la superficie de aproximación serán:

- a) un borde interior de longitud especificada, horizontal y perpendicular a la prolongación del eje de pista y situado a una distancia determinada antes del umbral;
- b) dos lados que parten de los extremos del borde interior y divergen uniformemente en un ángulo determinado respecto a la prolongación del eje de pista;
- c) un borde exterior paralelo al borde interior; y
- d) las superficies mencionadas variarán cuando se realicen aproximaciones con desplazamiento lateral, con desplazamiento o en curva. Específicamente, los dos lados que parten de los extremos del borde interior y divergen uniformemente en un ángulo determinado respecto a la prolongación del eje de la derrota con desplazamiento lateral, con desplazamiento o en curva.

⁷⁴ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Anexo 14 – Aeródromos. Op. Cit. Página 4-1.

La elevación del borde interior será igual a la del punto medio del umbral. Así mismo, la pendiente o pendientes de la superficie de aproximación se medirán en el plano vertical que contenga al eje de pista y continuará conteniendo al eje de toda derrota con desplazamiento lateral o en curva.

5) Superficie de aproximación interna⁷⁵:

Es una superficie consistente en una porción rectangular de la superficie de aproximación inmediatamente anterior al umbral.

Características:

- a) un borde interior que coincide con el emplazamiento del borde interior de la superficie de aproximación pero que posee una longitud propia determinada;
- b) dos lados que parten de los extremos del borde interior y se extienden paralelamente al plano vertical que contiene el eje de pista; y
- c) un borde exterior paralelo al borde interior.

6) Superficie de Transición⁷⁶:

Es una superficie compleja que se extiende a lo largo del borde de la franja y parte del borde de la superficie de aproximación, de pendiente ascendente y hacia afuera hasta la superficie horizontal interna.

⁷⁵ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Anexo 14 – Aeródromos. Op. Cit. Página 4-3.

⁷⁶ Ibíd. Página 4-4.

Características:

- a) un borde inferior que comienza en la intersección del borde de la superficie de aproximación con la superficie horizontal interna y que se extiende siguiendo el borde de la superficie de aproximación hasta el borde interior de la superficie de aproximación y desde allí, por toda la longitud de la franja, paralelamente al eje de pista; y
- b) un borde superior situado en el plano de la superficie horizontal interna.

La elevación de un punto en el borde inferior será:

- a) a lo largo del borde de la superficie de aproximación: igual a la elevación de la superficie de aproximación en dicho punto; y
- b) a lo largo de la franja: igual a la elevación del punto más próximo sobre el eje de la pista o de su prolongación.

Nota: Como consecuencia de b), la superficie de transición a lo largo de la franja debe ser curva si el perfil de la pista es curvo o debe ser plana si el perfil de la pista es rectilíneo. La intersección de la superficie de transición con la superficie horizontal interna debe ser también una línea curva o recta dependiendo del perfil de la pista.

La pendiente de la superficie de transición se medirá en un plano vertical perpendicular al eje de la pista.

7) Superficie de transición interna⁷⁷

La finalidad de la superficie de transición interna es servir de superficie limitadora de obstáculos para las ayudas a la navegación, las aeronaves y otros vehículos que deban hallarse en las proximidades de la pista. De esta superficie sólo deben sobresalir los objetos frangibles. La función de la superficie de transición definida en la descripción del punto 6 es la de servir en todos los casos de superficie limitadora de obstáculos para los edificios, etc.

Es una superficie similar a la superficie de transición pero más próxima a la pista.

⁷⁷ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Anexo 14 – Aeródromos. Op. Cit. Página 4-4.

Características:

a) un borde inferior que comience al final de la superficie de aproximación interna y que se extienda a lo largo del lado de la superficie de aproximación interna hasta el borde interior de esta superficie; desde allí a lo largo de la franja paralela al eje de pista hasta el borde interior de la superficie de aterrizaje interrumpido y desde allí hacia arriba a lo largo del lado de la superficie de aterrizaje interrumpido hasta el punto donde el lado corta la superficie horizontal interna; y

b) un borde superior situado en el plano de la superficie horizontal interna.

La elevación de un punto en el borde inferior será:

a) a lo largo del lado de la superficie de aproximación interna y de la superficie de aterrizaje interrumpido: igual a la elevación de la superficie considerada en dicho punto; y

b) a lo largo de la franja: igual a la elevación del punto más próximo sobre el eje de pista o de su prolongación.

Nota: Como consecuencia de b), la superficie de transición interna a lo largo de la franja debe ser curva si el perfil de la pista es curvo o debe ser plana si el perfil de la pista es rectilíneo. La intersección de la superficie de transición interna con la superficie horizontal interna debe ser también una línea curva o recta dependiendo del perfil de la pista.

La pendiente de la superficie de transición interna se medirá en un plano vertical perpendicular al eje de pista.

8) Superficie de aterrizaje interrumpido⁷⁸

Es un plano inclinado situado a una distancia especificada después del umbral, que se extiende entre las superficies de transición internas.

⁷⁸ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Anexo 14 – Aeródromos. Op. Cit. Página 4-4.

Características:

- a) un borde interior horizontal y perpendicular al eje de pista, situado a una distancia especificada después del umbral;
- b) dos lados que parten de los extremos del borde interior y divergen uniformemente en un ángulo determinado del plano vertical que contiene el eje de pista; y
- c) un borde exterior paralelo al borde interior y situado en el plano de la superficie horizontal interna.

La elevación del borde interior será igual a la del eje de pista en el emplazamiento del borde interior, y la pendiente de la superficie de aterrizaje interrumpido se medirá en el plano vertical que contenga el eje de la pista.

9) Superficie de ascenso en el despegue⁷⁹

Es un plano inclinado u otra superficie especificada situada más allá del extremo de una pista o zona libre de obstáculos.

Características:

- a) un borde interior, horizontal y perpendicular al eje de pista situado a una distancia especificada más allá del extremo de la pista o al extremo de la zona libre de obstáculos, cuando la hubiere, y su longitud excede a la distancia especificada;
- b) dos lados que parten de los extremos del borde interior y que divergen uniformemente, con un ángulo determinado respecto a la derrota de despegue, hasta una anchura final especificada, manteniendo después dicha anchura a lo largo del resto de la superficie de ascenso en el despegue; y
- c) un borde exterior horizontal y perpendicular a la derrota de despegue especificada.

⁷⁹ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Anexo 14 – Aeródromos. Op. Cit. Página 4-3.

La elevación del borde interior será igual a la del punto más alto de la prolongación del eje de pista entre el extremo de ésta y el borde interior; o a la del punto más alto sobre el suelo en el eje de la zona libre de obstáculos, cuando exista ésta. En el caso de una trayectoria de despegue rectilínea la pendiente de la superficie de ascenso en el despegue se medirá en el plano vertical que contenga el eje de pista, y en el caso de una trayectoria de vuelo de despegue en la que intervenga un viraje, la superficie de ascenso en el despegue será una superficie compleja que contenga las normales horizontales a su eje; la pendiente del eje será igual que la de la trayectoria de vuelo de despegue rectilínea.

Tabla 8. Dimensiones y pendientes de las superficies limitadoras de obstáculos⁷².

PISTAS DE ATERRIZAJE										
CLASIFICACIÓN DE LAS PISTAS										
Superficies y dimensiones ^a	Aproximación visual				Aproximación que no sea de precisión			Aproximación de precisión		
	Número de clave				Número de clave			Categoría I		Categoría II o III
	1	2	3	4	1,2	3	4	Número de clave	Número de clave	Número de clave
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
CÓNICA										
Pendiente	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Altura	35 m	55 m	75 m	100 m	60 m	75 m	100 m	60 m	100 m	100 m
HORIZONTAL INTERNA										
Altura	45 m	45 m	45 m	45 m	45 m	45 m	45 m	45 m	45 m	45 m
Radio	2 000 m	2 500 m	4 000 m	4 000 m	3 500 m	4 000 m	4 000 m	3 500 m	4 000 m	4 000 m
APROXIMACIÓN INTERNA										
Anchura	—	—	—	—	—	—	—	90 m	120 m ^e	120 m ^e
Distancia desde el umbral	—	—	—	—	—	—	—	60 m	60 m	60 m
Longitud	—	—	—	—	—	—	—	900 m	900 m	900 m
Pendiente	—	—	—	—	—	—	—	2,5%	2%	2%
APROXIMACIÓN										
Longitud del borde interior	60 m	80 m	150 m	150 m	150 m	300 m	300 m	150 m	300 m	300 m
Distancia desde el umbral	30 m	60 m	60 m	60 m	60 m	60 m	60 m	60 m	60 m	60 m
Divergencia (a cada lado)	10%	10%	10%	10%	15%	15%	15%	15%	15%	15%
Primera sección										
Longitud	1 600 m	2 500 m	3 000 m	3 000 m	2 500 m	3 000 m	3 000 m	3 000 m	3 000 m	3 000 m
Pendiente	5%	4%	3,33%	2,5%	3,33%	2%	2%	2,5%	2%	2%
Segunda sección										
Longitud	—	—	—	—	—	3 600 m ^b	3 600 m ^b	12 000 m	3 600 m ^b	3 600 m ^b
Pendiente	—	—	—	—	—	2,5%	2,5%	3%	2,5%	2,5%
Sección horizontal										
Longitud	—	—	—	—	—	8 400 m ^b	8 400 m ^b	—	8 400 m ^b	8 400 m ^b
Longitud total	—	—	—	—	—	15 000 m	15 000 m	15 000 m	15 000 m	15 000 m
DE TRANSICIÓN										
Pendiente	20%	20%	14,3%	14,3%	20%	14,3%	14,3%	14,3%	14,3%	14,3%
DE TRANSICIÓN INTERNA										
Pendiente	—	—	—	—	—	—	—	40%	33,3%	33,3%
SUPERFICIE DE ATERRIZAJE										
INTERRUMPIDO										
Longitud del borde interior	—	—	—	—	—	—	—	90 m	120 m ^e	120 m ^e
Distancia desde el umbral	—	—	—	—	—	—	—	^c	1 800 m ^d	1 800 m ^d
Divergencia (a cada lado)	—	—	—	—	—	—	—	10%	10%	10%
Pendiente	—	—	—	—	—	—	—	4%	3,33%	3,33%

a. Salvo que se indique de otro modo, todas las dimensiones se miden horizontalmente.

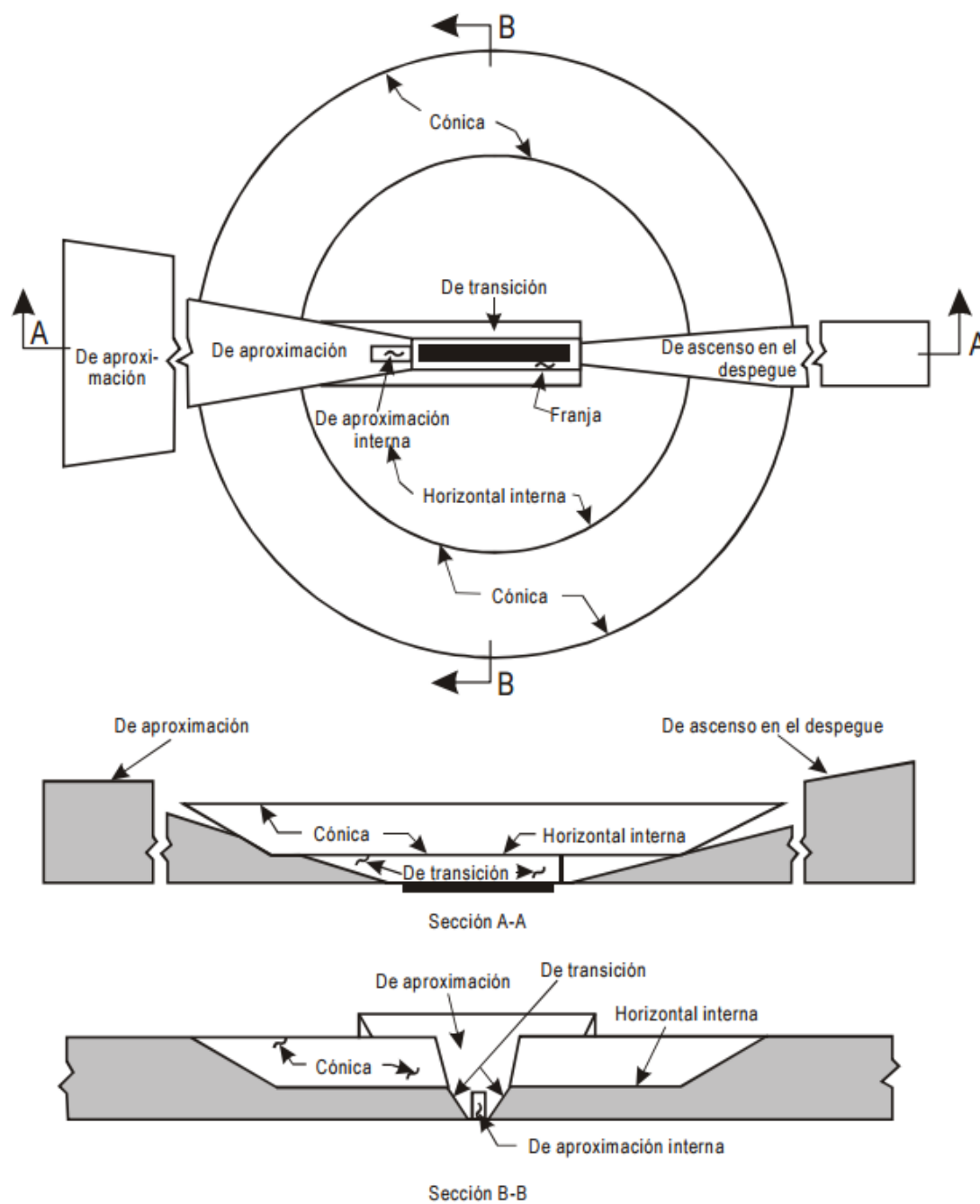
b. Longitud variable (véase 4.2.9 ó 4.2.17).

c. Distancia hasta el extremo de la franja.

d. O distancia hasta el extremo de pista, si esta distancia es menor.

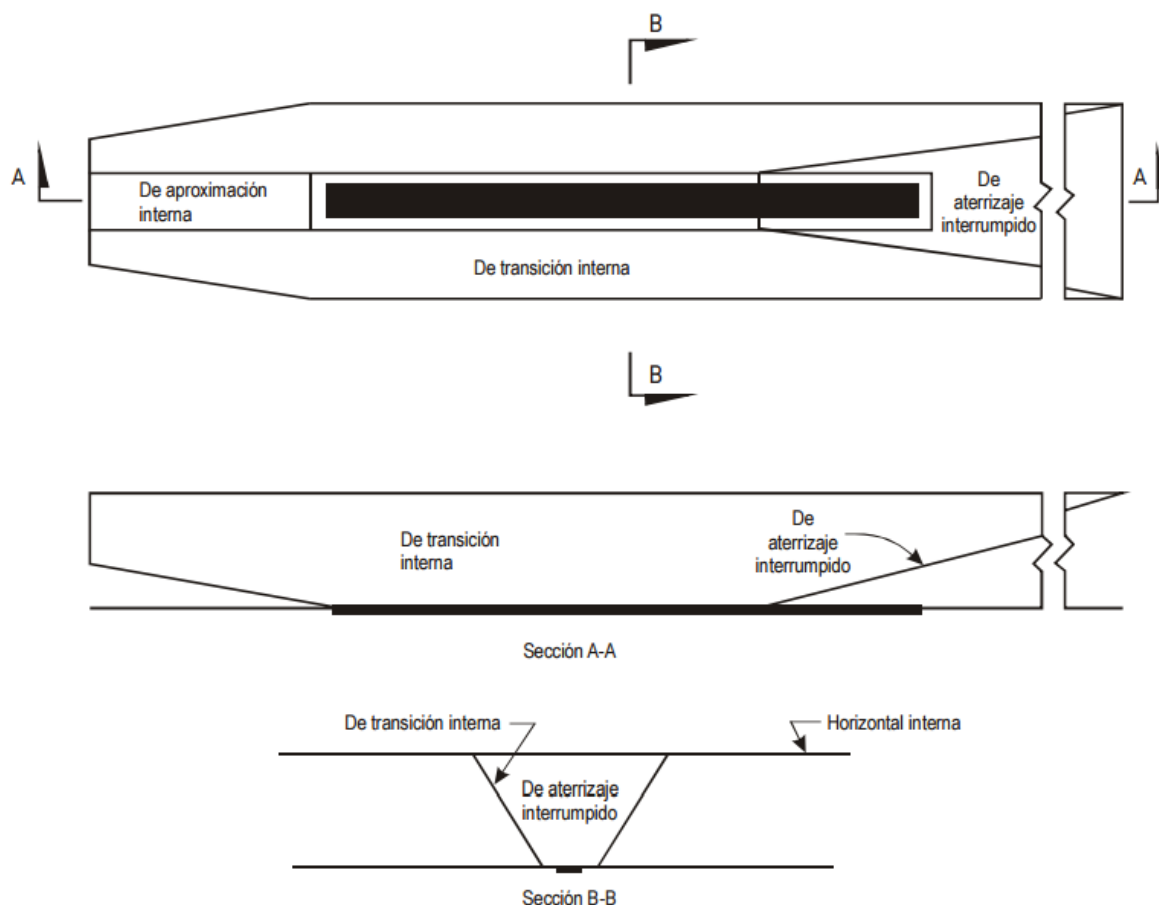
e. Cuando la letra de clave sea F [Columna (3) de la Tabla 1-1], la anchura se aumenta a 155 m. Véase la Circular 301 de la OACI — *Nuevos aviones más grandes* — *Transgresión de la zona despejada de obstáculos: Medidas operacionales y estudios aeronáuticos*, para obtener información sobre los aviones de letra de clave F equipados con aviónica digital para ofrecer mandos de dirección para mantener una ruta establecida durante una maniobra de “motor y al aire”.

Figura 61. Superficies limitadoras de obstáculos ⁸¹.



⁸¹ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Anexo 14 – Aeródromos. Op. Cit. Página 4-2.

Figura 62. Superficies limitadoras de obstáculos de aproximación interna, de transición interna y de aterrizaje interrumpido⁷⁴.



6.2.7.3. DISEÑO DE PROCEDIMIENTOS

Procedimientos de salida

Principios de diseño de procedimientos de salida⁸³:

- Se pueden diseñar como salidas rectas o con viraje (ver capítulo 3).
- Para salidas omnidireccionales debe haber un diseño que permita un viraje en cualquier dirección después de alcanzar una determinada altura (ver capítulo 4).
- Para salidas en línea recta se permite el viraje hasta 15°.

⁸² ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Anexo 14 – Aeródromos. Op. Cit. Página 4-3.

⁸³ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Documento 8168. Op. Cit. Página I-3-2-

- La aeronave debe mantener el rumbo de la pista hasta alcanzar una altura mínima de 394 ft por encima de la pista/FATO antes de comenzar el viraje. *FATO: Área de aproximación final y de despegue.*
- Para salidas con viraje se especificará un viraje, en un punto de viraje designado, a una determinada altura. Este viraje puede ser mayor a 15°, y se debe alcanzar un MOC de 295 ft. Como alternativa, se puede usar un 0,8% de la distancia del DER si este valor es más alto.
- PDG (Pendiente de diseño de procedimiento) normalizada = 3,3%. Ésta comienza en un punto a 16 ft por encima del extremo de la salida de la pista (DER).
- Margen de franqueamiento adicional para un PDG = 0,8% de la distancia recorrida desde el DER, por encima de una superficie de identificación de obstáculos (OIS). Pendiente de la OIS = 2,5%.

Comienzo de diseño de procedimiento de salida⁸⁴:

- El procedimiento de salida comienza en el DER (extremo de la pista o extremo de zona libre de obstáculos).
- El área protegida comienza en un punto a 600 m del comienzo de la pista.

Margen mínimo de franqueamiento de obstáculos (MOC)⁸⁵:

- En el área primaria, MOC = 0,8% de la distancia desde el DER. En el DER, MOC = 0.
- Éste se prevé por encima de una OIS, o cuando un obstáculo penetra en la OIS, por encima de la elevación del obstáculo.
- Para salidas con viraje, MOC = 295 ft.
- Si el terreno es montañoso, se estudia un aumento del MOC (Sección 2, capítulo 1, numeral 1.7).

Superficies de identificación de obstáculos (OIS)⁸⁶:

- Superficie inclinada empleada para identificar obstáculos en el área de salida. Para salidas rectas, OIS = 5 m por encima del DER. Para salidas omnidireccionales, se utilizan varias OIS, según el capítulo 4. Pendiente de la OIS = 2,5%.

⁸⁴ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Documento 8168. Op. Cit. Página I-3-2-2

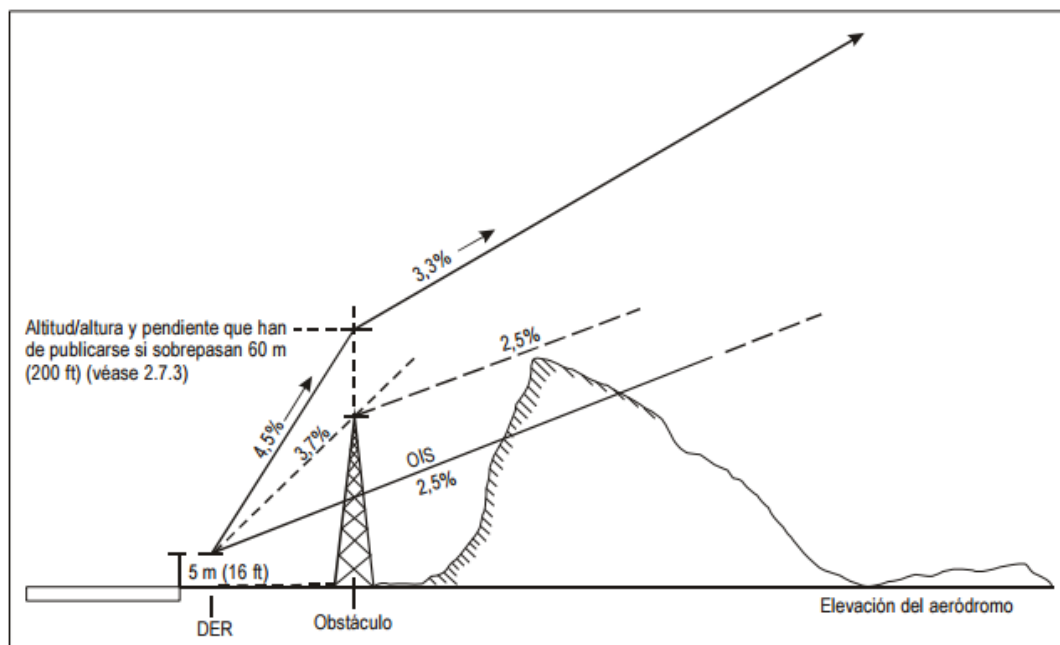
⁸⁵ Ibíd. Página I-3-2-2

⁸⁶ Ibíd. Página I-3-2-3

Pendiente de diseño de procedimiento (PDG)⁸⁷:

- Pendiente de ascenso publicada (mirar cartas de salida), calculada desde el comienzo de la OIS (16 ft por encima del DER). Si ningún obstáculo penetra en la OIS, el PDG es la pendiente de la OIS + 0,8%.
- Cuando un objeto penetra en la OIS de 2,5% debe ajustarse la ruta de salida. Si no es posible, se puede aumentar la PDG para proporcionar un MOC por encima de la penetración (0,8% de la distancia desde el DER):

Figura 63. Pendiente de diseño de procedimiento⁸⁸.

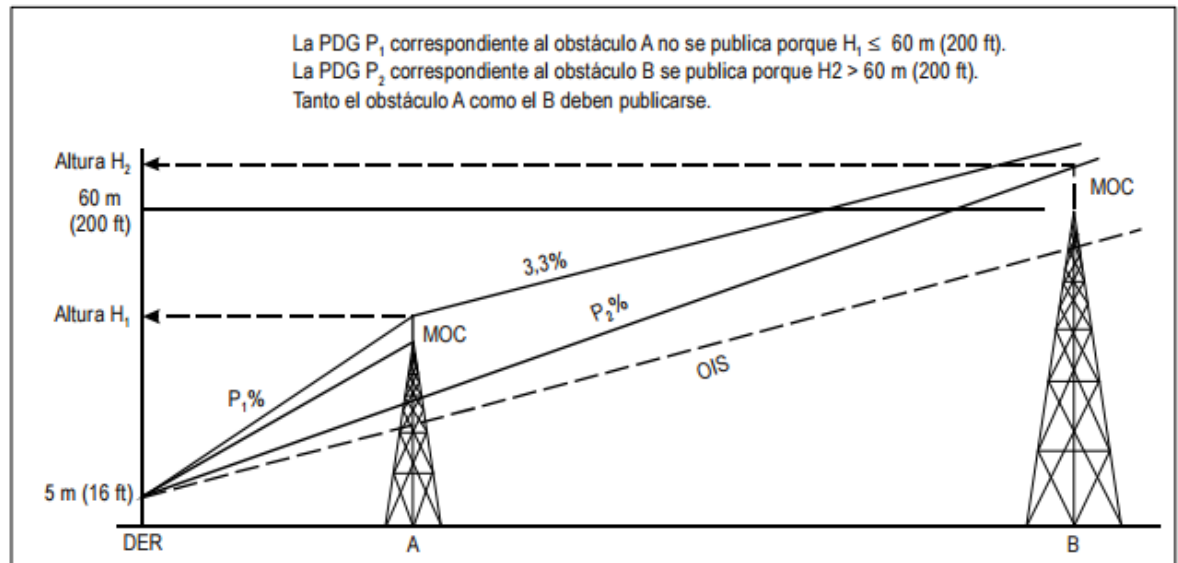


- Se promulgará una PDG que exceda de 3,3% y la altitud a la que se extiende la pendiente aumentada.
- Si se aumenta la PDG para evitar que un obstáculo penetre, la PDG se reduce de nuevo a 3,3% en un punto, pasado el obstáculo crítico, en la que se pueda proporcionar un margen de franqueamiento de obstáculos del 0,8% de la distancia desde el DER (ver figura anterior).
- No se promulgarán pendientes a una altura igual o inferior a 200 ft, normalmente ocasionadas por obstáculos bajos o muy próximos (ver la siguiente figura). Se promulgarán la posición y la elevación/altura de los objetos muy próximos que penetren en la OIS.

⁸⁷ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Documento 8168. Op. Cit. Página I-3-2-3

⁸⁸ Ibíd. Página I-2-3-5

Figura 64. Obstáculos muy próximos⁸⁹.



Para el inicio del procedimiento de salida, se tienen en cuenta los siguientes valores:

Extremo de salida de la pista DER = A 300 m del CWY de la pista.

Pendiente OIS = 2,5%

Pendiente PDG = 3,3% (OIS + 0,8%)

Margen de franqueamiento adicional = 0,8%

Rutas de salida⁹⁰

Existen dos tipos básicos de ruta de salida: en línea recta y con viraje.

Se debe suministrar guía de derrota:

- a) a menos de 20 km (10,8 NM) desde el extremo de salida de la pista (DER) para las salidas en línea recta; y
- b) a menos de 10 km (5,4 NM) después de completar el viraje para las salidas con viraje.

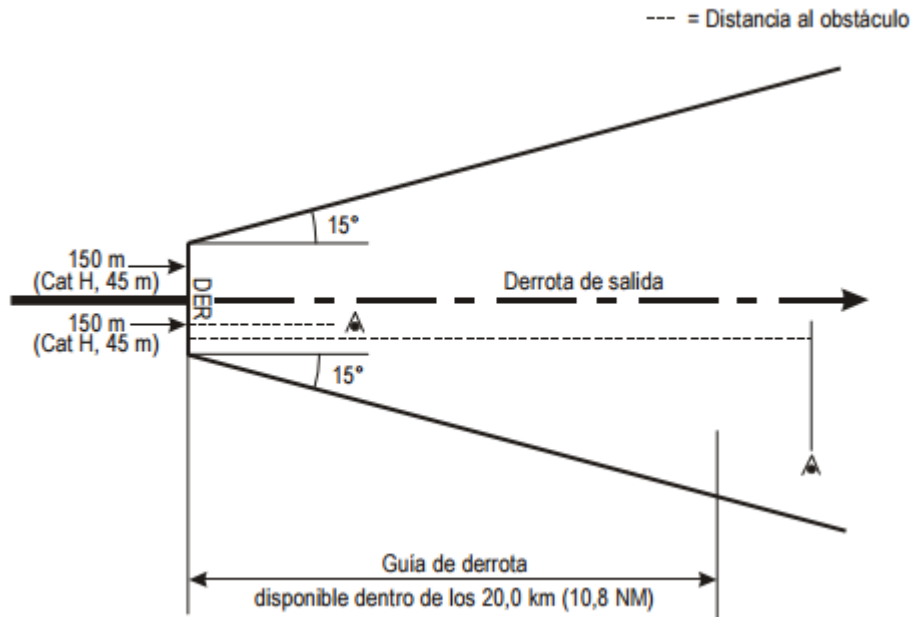
⁸⁹ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Documento 8168. Op. Cit. Página I-3-2-5.

⁹⁰ Ibíd. Página I-3-3-1.

Salida en línea recta

La salida en línea recta es aquella en la que la derrota de salida inicial está comprendida dentro de los 15° de alineación del eje de la pista. Cuando sea viable, la derrota de salida debería coincidir con la prolongación del eje de la pista⁹¹.

Figura 65. Área de salida recta sin guía de derrota⁹².



Las salidas en línea recta se dividen en dos categorías principales, dependiendo de la disponibilidad de guía de derrota inicial:

a) Salida en línea recta sin guía de derrota⁹³:

1) Salida sin corrección de derrota

El área comienza en el DER, tiene una anchura inicial de 300 m y está centrada en el eje de la pista con un ensanche de 15° a cada lado de la prolongación del eje de la pista (ver figura anterior). El área termina al final del procedimiento de salida.

⁹¹ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Documento 8168. Op. Cit., Página I-3-3-1

⁹² Ibíd. Página I-3-3-7.

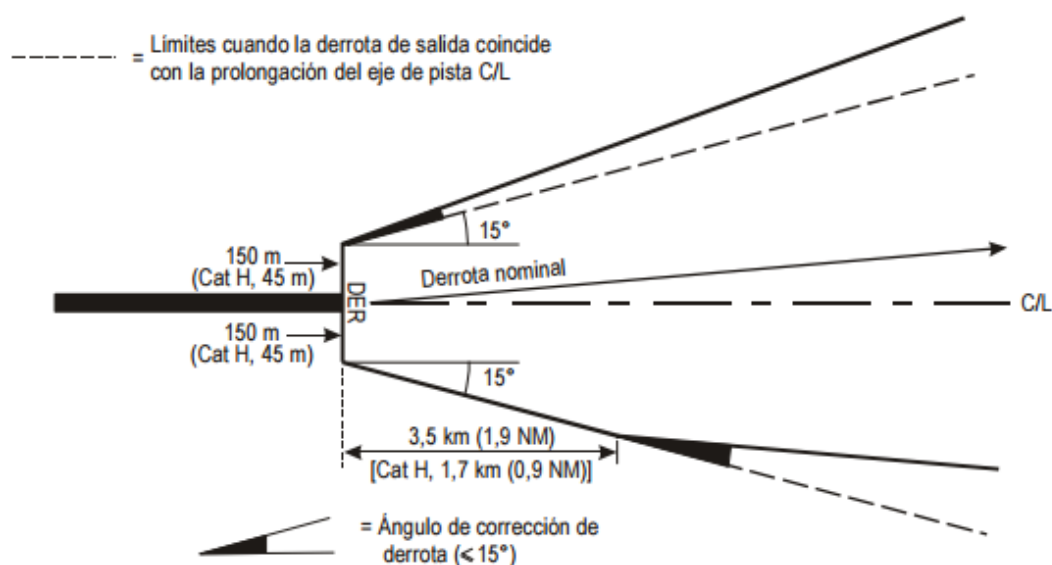
⁹³ Ibíd. Página I-3-3-2.

2) Salida con corrección de derrota

La derrota de salida inicial puede corregirse hasta 15° . Cuando se corrija así, el ensanche del límite de área, en el mismo lado de corrección de derrota, aumenta en el mismo ángulo que el de corrección de derrota, a partir del DER.

En el lado opuesto a la corrección de derrota, el límite se corrige en igual cantidad en un punto donde la PDG alcanza 120 m (394 ft). Esta distancia es nominalmente de 3,5 km/1,9 NM desde el DER para una PDG 3,3%.

Figura 66. . Área de salida en línea recta con corrección de derrota (sin especificar el punto de corrección de derrota) ⁸⁶.



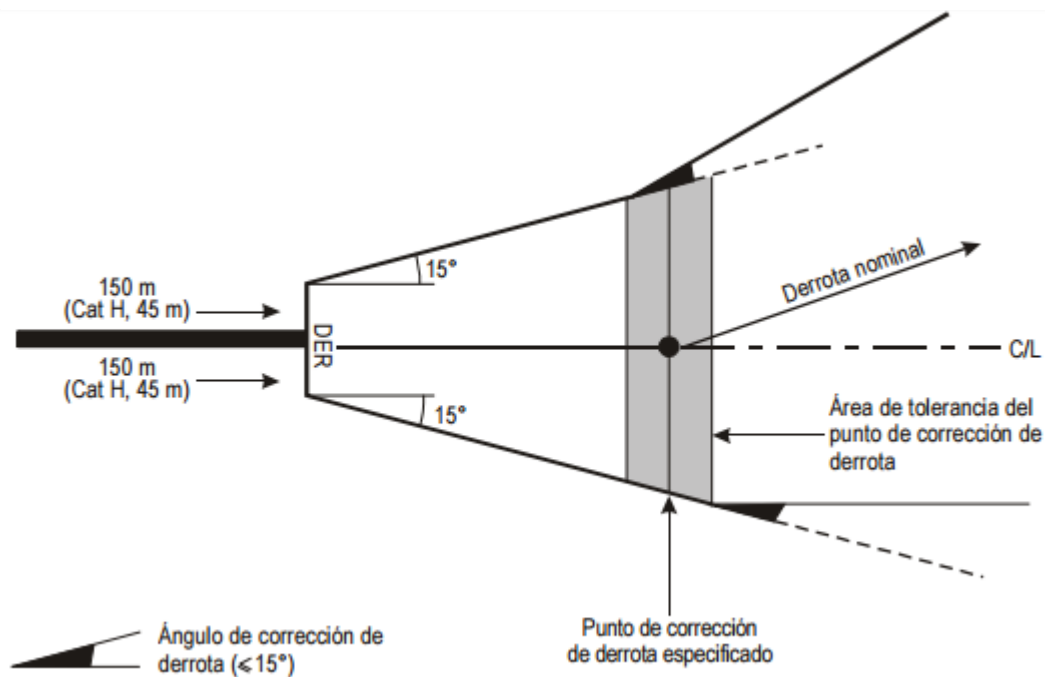
⁹⁴ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Documento 8168. Op. Cit., Página I-3-3-7.

3) Punto de corrección de derrota especificado

Si se especifica un punto de corrección de derrota:

- I) el ensanche del límite de área, en el lado de la corrección de la derrota, se aumenta en el ángulo de corrección de derrota a partir de la tolerancia anterior del punto de corrección de derrota; y
- II) el ensanche del límite de área, en el lado opuesto a la corrección de derrota, se reduce en el ángulo de corrección de derrota a partir de la tolerancia posterior del punto de corrección de derrota.

Figura 67. Área de salida en línea recta con punto de corrección de derrota⁸⁷



b) salida en línea recta con guía de derrota⁹⁶

- 1) *Instalación en cabeza o en cola;* y
- 2) *desplazada (derrota paralela/derrota desplazada/cruce de derrota).*

⁹⁵ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Documento 8168. Op. Cit. Página I-3-3-8.

⁹⁶ Ibíd. Página I-3-3-2.

El área se construye según la salida en línea sin guía de derrota, y se extiende hasta el punto en que los límites intercepten el área correspondiente a la ayuda para la navegación que proporciona la guía de derrota.

Figura 68. Salida en línea recta (con la instalación por delante) ⁹⁷

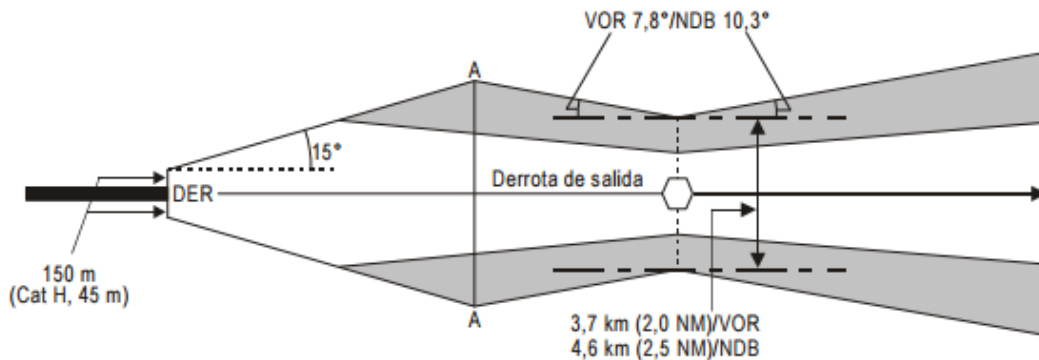
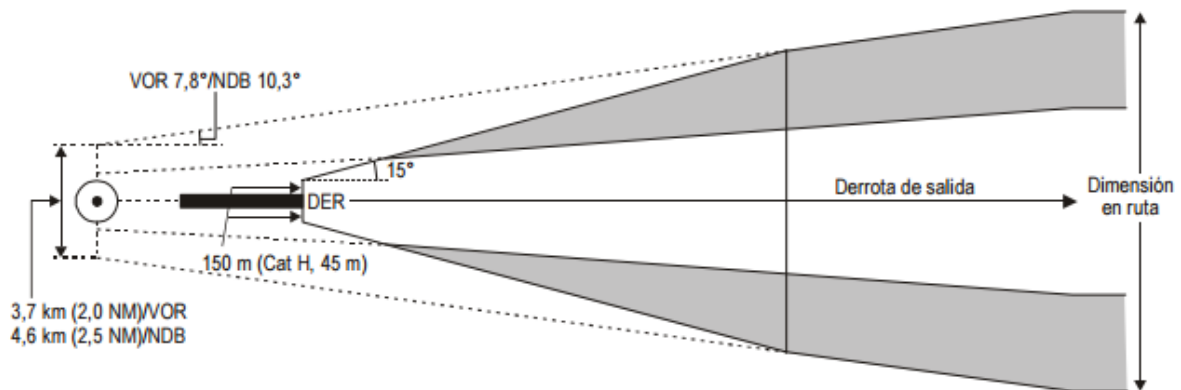


Figura 69. Salida en línea recta (con la instalación por detrás) ⁹⁸.



⁹⁷ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Documento 8168. Op. Cit. Página I-3-3-8.

⁹⁸ Ibíd. Página I-3-3-9.

Figura 70. Salida en línea recta con derrota a la línea desplazada (derrota paralela a la dirección de la pista)⁹¹.

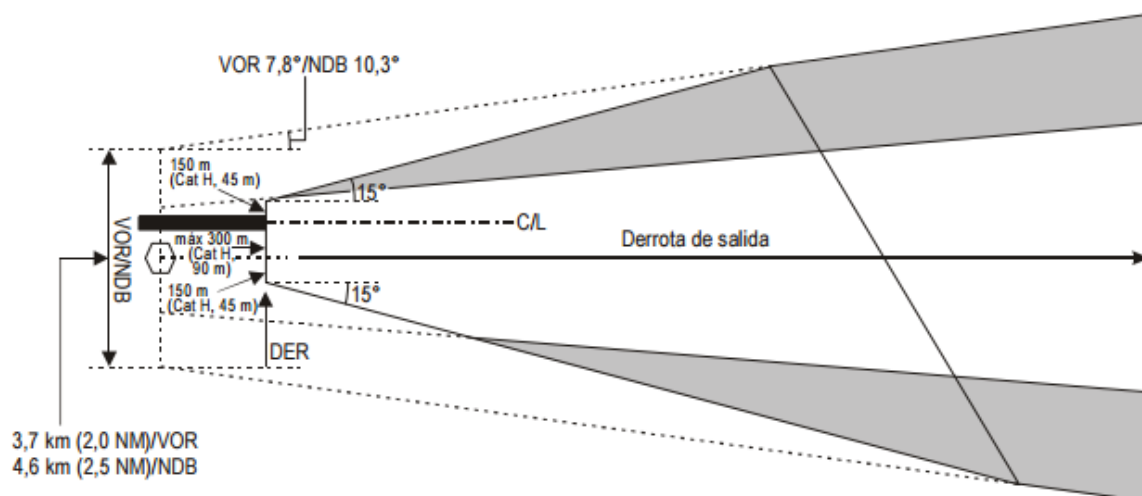
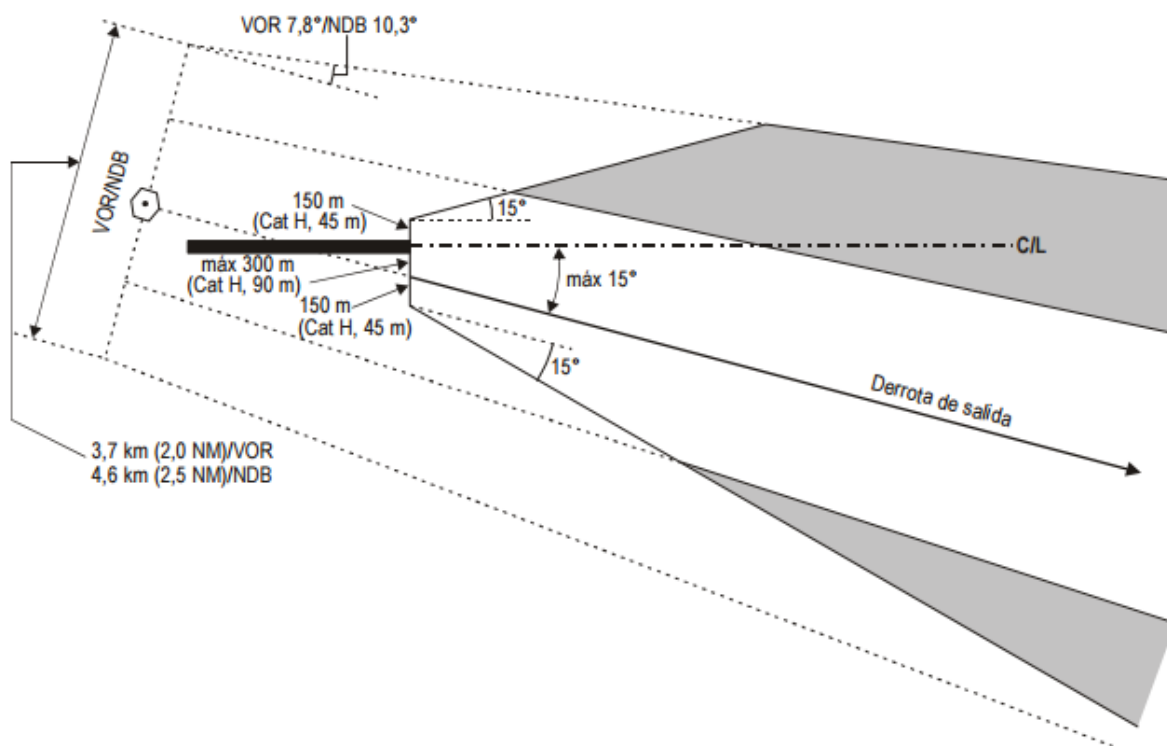


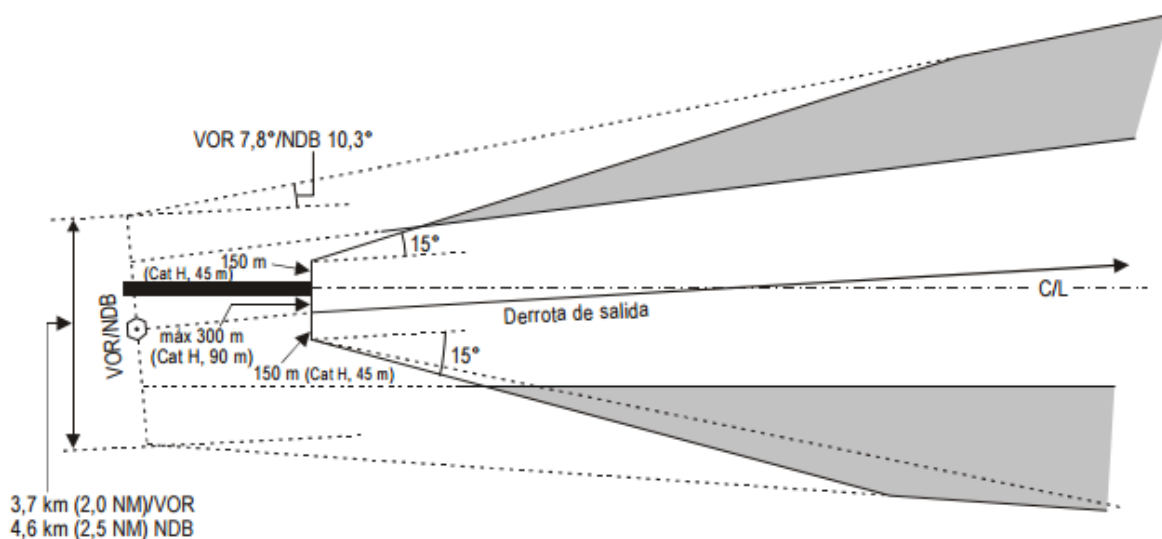
Figura 71. Salida en línea recta con derrota de salida desplazada (derrota divergente de la dirección de la pista)⁹².



⁹⁹ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Documento 8168. Op. Cit. Página I-3-3-9.

¹⁰⁰ Ibíd. Página I-3-3-10.

Figura 72. Salida en línea recta con derrota de salida desplazada (derrota que cruza la dirección de la pista) ⁹³.



Aumento de altitudes para zonas montañosas¹⁰²

Cuando se planifican los procedimientos con el fin de utilizarlos en zonas montañosas, hay que tener en cuenta el error altimétrico inducido y los problemas de pilotaje que se presentan cuando se dan vientos de 37 km/h o más, por encima de estas regiones. Cuando se sabe que existen estas condiciones, el MOC se debería aumentar, máximo al 100%.

Franqueamiento de obstáculos¹⁰³

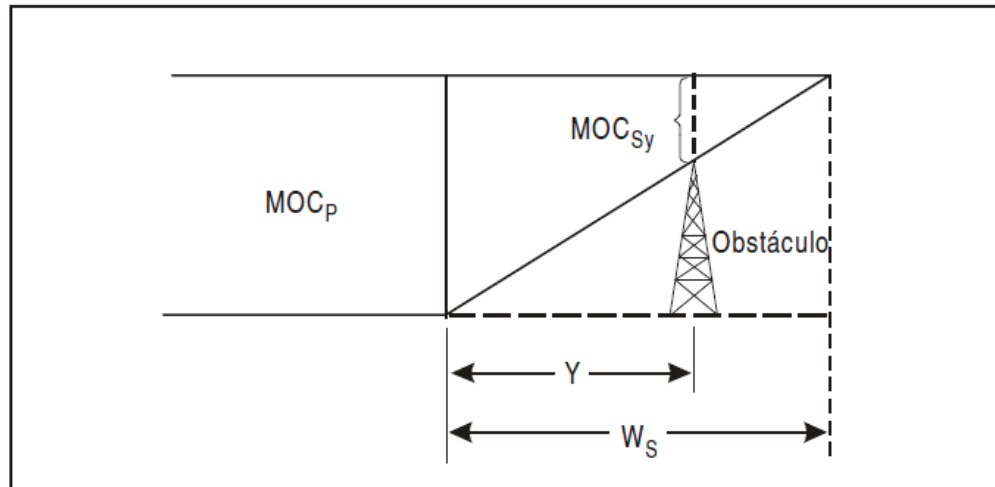
Se prevé un franqueamiento de obstáculos total en toda el área, salvo que se determinen áreas secundarias. En este caso, se prevé el franqueamiento de obstáculos total en el área primaria, y en el área secundaria el franqueamiento de obstáculos se reduce en forma lineal desde el total de franqueamiento en el borde interior hasta cero en el borde exterior.

¹⁰¹ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Documento 8168. Op. Cit. Página I-3-3-11

¹⁰² *Ibíd.* Página I-2-1-3

¹⁰³ *Ibíd.* Página I-2-1-2

Figura 73. Franqueamiento de obstáculos¹⁰⁴.



Para realizar el franqueamiento de obstáculos en zonas montañosas, se toma en cuenta una especie de evaluación de obstáculos, que consta de utilizar reglas de tres, para determinar qué tanto porcentaje se debe incrementar para hacer dicho franqueamiento de obstáculos, después de una distancia recorrida, procedimiento basado en la construcción de área de iniciación de viraje, o área primaria, construida para efectos de procedimiento de salida, tal como se hizo en este punto, y así mismo, en la elevación de obstáculos a nivel del mar. De igual manera, se tiene en cuenta también la altitud mínima de sector (MSA), puesto que es la altitud más baja que puede usarse y que permite conservar un margen vertical mínimo de 300 m (1000 ft) sobre todos los obstáculos situados en un área comprendida dentro de un sector circular de 46 km (25 NM) de radio.¹⁰⁵

Procedimientos en ruta¹⁰⁶

Después de realizado el procedimiento de salida correspondiente, se efectúa el diseño del procedimiento en ruta.

¹⁰⁴ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Documento 8168. Op. Cit. Página I-2-1-7

¹⁰⁵ Ibíd. Página I-1-1-2.

¹⁰⁶ Ibíd. Página III-3-8-1.

Se describen los criterios de vuelo en ruta para aeronaves con capacidad de navegación RNAV 5, RNP 4, RNAV 2 y RNAV 1. Los criterios generales de la Parte II, Sección 3, “Criterios en ruta”, se aplican con la siguiente modificación: *en los tramos rectos, la anchura de área es constante (no se aplican los límites angulares).*

*Parte II, Sección 3 – Criterios en Ruta*¹⁰⁷

Generalmente, una ruta está compuesta por varios tramos. Cada tramo comienza y termina en un punto de referencia designado.

Áreas de franqueamiento de obstáculos (No aplicable para RNAV/RNP)¹⁰⁸

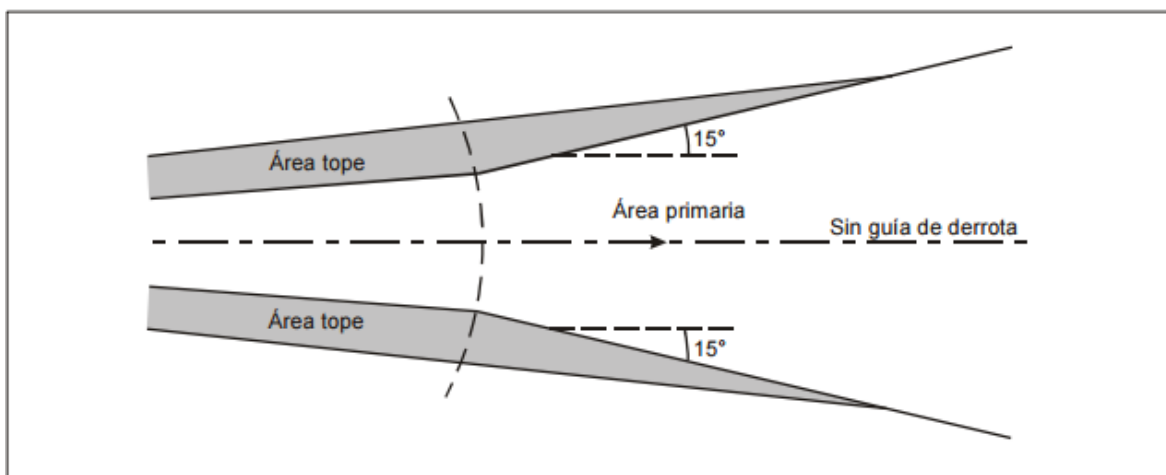
El área de franqueamiento de obstáculos consta de un área primaria y de un área tope. La anchura de las áreas primaria y tope es constante desde su anchura al lado de la instalación, hasta una distancia especificada con respecto al sistema que proporciona la derrota. A partir de este punto, las áreas se ensanchan en función de las líneas de tolerancia angular de la instalación aplicable, como se describe más adelante en la sección de *Límites angulares*.

Para áreas sin guía de derrota, como por ejemplo, áreas fuera de cobertura de las instalaciones de navegación a lo largo de la ruta, el área primaria se ensancha a cada lado con un ángulo de 15° respecto a su anchura a partir del último punto en que se disponga de guía de derrota. La anchura del área tope se reduce progresivamente hasta llegar a cero, terminando en un área sin guía de derrota en la que se aplican íntegramente los márgenes MOC.

¹⁰⁷ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Documento 8168. Op. Cit. Página II-3-1-1

¹⁰⁸ *Ibíd.* Página II-3-1-1

Figura 74. Área sin guía de derrota¹⁰⁹.



No existen áreas máximas para rutas situadas dentro de la cobertura de las instalaciones. Para áreas remotas, fuera de la cobertura, se aplica el precepto anterior.

Se aplican los criterios generales de la Parte I y la Parte III, Secciones 1 y 2, que se amplían o modifican con los criterios de este capítulo.

Salidas con viraje¹¹⁰

Cuando una salida requiere un viraje mayor de 15°, es una salida con viraje. Los virajes pueden especificarse a una determinada altitud, en un punto de referencia o en una instalación.

Se presupone un vuelo en línea recta hasta alcanzar, por lo menos, una altura de 120 m (394 ft) por encima de la elevación del DER. No se prevén salidas con virajes en aeronaves que no alcancen el mínimo de altura para este tipo de maniobras.

¹⁰⁹ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Documento 8168. Op. Cit. Página II-3-1-13

¹¹⁰ Ibíd. Página I-3-3-3

Áreas consideradas para el diseño de procedimiento de salida con viraje:

- Área de iniciación de viraje: área en el cual la aeronave efectúa el ascenso en línea recta para alcanzar el MOC requerido antes del comienzo de un viraje (90 m).
- Área de viraje: área en el que la aeronave efectúa el viraje.

Área de iniciación de viraje

El área de iniciación de viraje comienza en un punto a 600 m del principio de la pista. Desde el comienzo del área de iniciación de viraje hasta el DER, el área tiene 300 m de anchura. Esta área termina en el TP. Se define como:

- La tolerancia del punto de referencia anterior al punto de referencia TP (viraje en un punto de viraje designado); o
- La posición en que la PDG alcanza la altitud de viraje especificada.

Área de viraje¹¹¹

El área de viraje se construye igual que el área de aproximación frustrada con viraje (ver sección 4, capítulo 6, 6.4). Los límites interior y exterior del área de viraje se construyen según la sección nombrada en el subtítulo de este párrafo, numerales 3.2 y 3.3, respectivamente.

Parámetros de viraje:

a) Altitud. Se designa una altura dada para el viraje, y en un punto de viraje designado, que consta de la elevación del aeródromo más el 10% desde el DER hasta el punto de viraje, para permitir un ascenso del 10%.

b) Temperatura. ISA + 15°C correspondientes a la altitud designada.

¹¹¹ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Documento 8168. Op. Cit. Página I-2-3-1

c) IAS: De acuerdo a las tablas “Parámetros IAS para construcción de virajes”, se toma la velocidad correspondiente a la categoría de la aeronave, sumándose un 10% para tener en cuenta la mayor masa de la aeronave a la salida. No aplica el criterio de usar velocidades reducidas, ya que la operación de salida no requiere evitar obstáculos.

d) TAS: IAS con ajuste por altitud y temperatura.

e) Viento. Datos estadísticos del viento: tomar el viento máximo de cualquier dirección en el margen de probabilidades del 95%. Si no, considerar un viento de 56 km/h (30 kt) de cualquier dirección.

f) Ángulo de inclinación lateral: promedio de 15°.

g) Tolerancia del punto de referencia: la correspondiente al tipo de punto de referencia.

h) Tolerancias técnicas de vuelo. Distancia equivalente a seis segundos de vuelo (3 de tiempo de reacción del piloto y 3 para establecer inclinación lateral) a la velocidad IAS. Representado con la letra c.

i) Áreas secundarias: si se cuenta con guía de derrota.

Ecuaciones de altitud o altura de viraje

$$[1] \text{ TNH} = d_r \text{PDG} + 5 \text{ m (16 ft)}^{112}$$

Donde:

d_r = Distancia horizontal desde el DER hasta el TP

PDG = Pendiente de diseño del procedimiento

Cálculos del margen de franqueamiento de obstáculos

a) Para el área de iniciación de viraje: No se aplica el criterio de cálculo de margen de franqueamiento de obstáculos, debido a que no hay obstáculos que sobrepasen la pendiente de la OIS, por lo tanto, el criterio se considera negativo, o nulo, puesto que el obstáculo es menor de 90 m.

¹¹² ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Documento 8168. Op. Cit. Página I-3-3-5

b) Para el área de viraje:

- Obstáculos situados antes del TP (Línea K). El MOC es el mayor entre el MOC mínimo para viraje (90 m) y $0,008 (d_r^* + d_0)$, donde:

d_r^* = Distancia medida a lo largo de la derrota de salida que corresponde al punto, en el límite del área de iniciación de viraje, donde se mide la distancia d_0 , y

d_0 = Distancia más corta desde el límite de área de iniciación de viraje hasta el obstáculo.

Viraje en un TP designado

Se escoge un TP designado para permitir a las aeronaves evitar un obstáculo situado por delante en línea recta. Los criterios relativos a la salida en línea recta se aplican hasta el TP anterior.

Límites longitudinales de la tolerancia del TP:

- Límite anterior: final de área de iniciación de viraje (línea K); y
- Límite posterior, determinado por:

$$K + TP + c$$

Donde:

K = Línea K

TP = Tolerancia del punto de referencia

c = 6 s a una velocidad de aproximación frustrada final de 260 km/h¹¹³.

$$c = V_{at}t$$

Donde:

V_{at} = Velocidad en umbral

t = 6 s

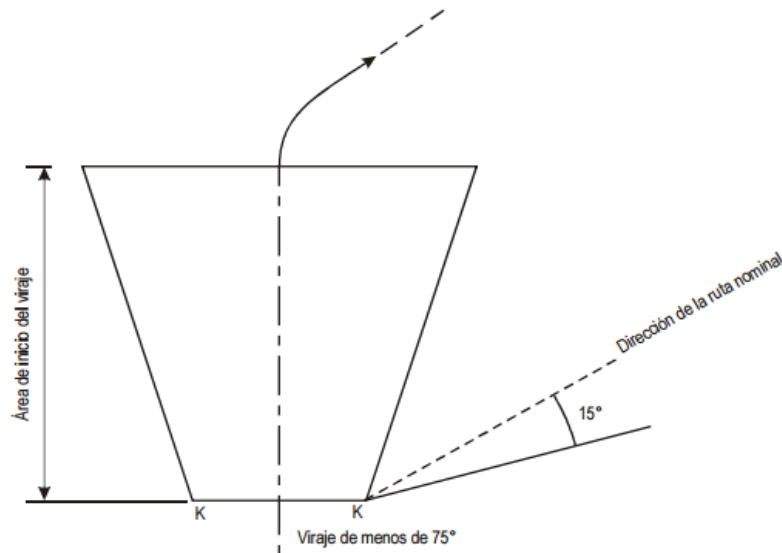
¹¹³ Este dato fue tomado de la tabla I-4-1-1 – Velocidades (IAS) para el cálculo de procedimientos en kilómetros por hora (km/h), en concordancia con la categoría de la aeronave. ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Documento 8168. Op. Cit. Página I-4-1-5

Construcción de límites:

a) Límite interior: *Sección 2, Capítulo 3 – «Construcción del área de viraje»*¹¹⁴

Para un viraje a cierta altitud: este límite se origina al principio del área del comienzo de viraje desde el borde del área que proporcione la mejor protección lateral (borde interior al ser el viraje $< 75^\circ$). Luego diverge hacia afuera en la dirección de la derrota nominal con un ensanchamiento de ángulo de 15° .

Figura 75. Protección del límite interior del viraje de menos de 75° (para este caso)¹⁰⁷.



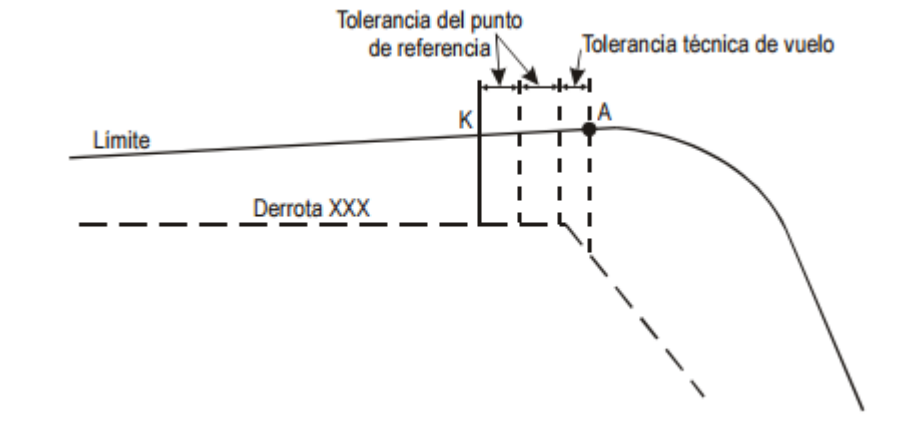
b) Límite exterior:

- La curva comienza en el punto A (ver figura). Los parámetros que determinan su situación son:
 - 1) Tolerancia del punto de referencia
 - 2) Tolerancia técnica de vuelo

¹¹⁴ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Documento 8168. Op. Cit. Página I-2-3-2

¹¹⁵ Ibíd. Página I-2-3-10

Figura 76. Inicio de la construcción del límite exterior¹¹⁶.



- A partir de este punto, se usa el método de construcción del área de viraje calculando la espiral de viento, ya que el área se basa en un radio de viraje calculado para un valor específico de velocidad verdadera y ángulo de inclinación lateral, al saber que el método de círculos limitadores es más conveniente para virajes de 90° y superiores.

Espiral de viento¹¹⁷

El límite exterior del área de viraje se construye utilizando una espiral derivada del radio de viraje con aire en calma (r). La espiral resultante se crea aplicando el efecto de viento E_θ para el tiempo que toma cambiar el rumbo de la aeronave en θ grados empleando la fórmula:

$$E_\theta = \left(\frac{\theta}{R}\right) \left(\frac{\omega}{3600}\right) \text{ km (NM)}$$

Donde:

θ = Ángulo de viraje.

R = Velocidad angular de viraje.

ω = Velocidad del viento.

¹¹⁶ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Documento 8168. Op. Cit. Página I-2-3-11.

¹¹⁷ *Ibíd.* Página I-2-3-3

Para hallar la velocidad angular de un viraje se emplea la siguiente fórmula:

$$R = \frac{6355 \tan \alpha}{\pi V}$$

Donde:

α = Ángulo de inclinación lateral en grados. Para la categoría C, el ángulo es de 15°, según la tabla de parámetros de construcción de viraje (página 86).

V = Velocidad verdadera en km/h (TAS). 1 m = 3.28 ft

La espiral de viento se basa en el cálculo de E_θ en cada intervalo especificado (Ej., 30°). Se puede aumentar la precisión disminuyendo el intervalo. La construcción se basa en los siguientes pasos (ver figura 19):

- 1) Localizar los puntos b1, c1,... n1 añadiendo una distancia de E_θ perpendicular al radio de aire en calma (r).
- 2) Calcular los puntos b2, c2,... n2, localizados a un ángulo $\arcsin\left(\frac{\omega}{V}\right)$ antes de b1, c1,... n1 y una distancia E_θ desde los puntos b, c,... n respectivamente; y
- 3) La espiral resulta de trazar una curva que comienza en el punto “a”, situado en el radio de aire en calma pasando a b2, c2,... n2.

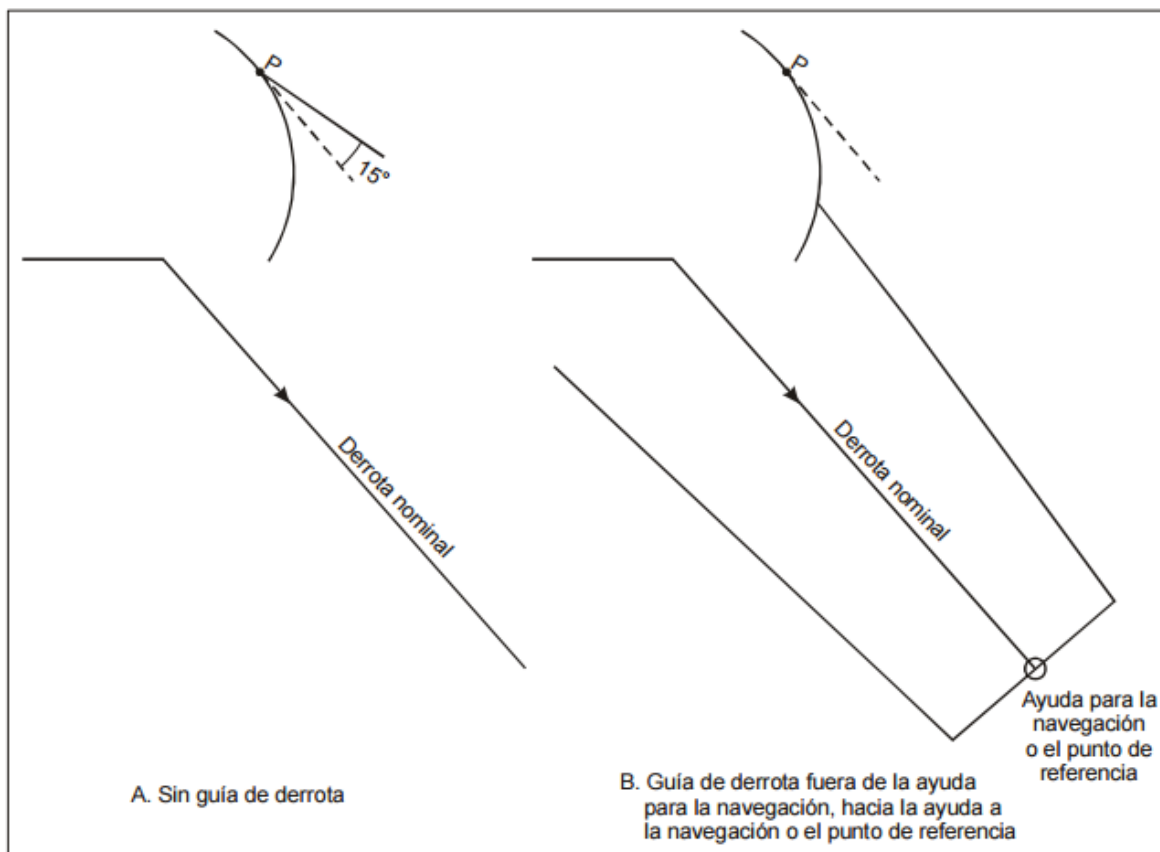
El diagrama ilustra la esfera celeste con la siguiente información:

- Derrota con aire en calma:** Representada por la línea $c1$, perpendicular a la derrota.
- Espiral de viento:** Representada por la línea $c2$.
- Efecto del viento para virajes de E_0 grados:** Representado por el ángulo 90° entre $c1$ y $c2$.
- Derrota con aire en calma:** Representada por la línea $d1$.
- Ángulo arco seno w/V :** Indicado en la parte superior izquierda, relacionado con los puntos $b1$ y $b2$.
- Radio r :** Indicado en la parte inferior izquierda, relacionado con el punto a .
- Ángulo θ :** Indicado en la parte inferior izquierda, relacionado con el punto a .
- Puntos de intersección:** Se muestran puntos como a, b, c, d, e, f, n y sus correspondientes en la esfera ($a1, a2, c1, c2, e1, e2, n1, n2$).

- ## Guía de derrota adicional

164

Figura 78. Construcción del límite exterior de viraje después del punto P¹¹⁹.



Consideraciones especiales para diseñadores de procedimientos¹²⁰:

- 1) Diseñar todos los procedimientos del modo más sencillo posible;
- 2) Elaborar siempre procedimientos RNAV en lugar de procedimientos convencionales, siempre que sea posible;
- 3) Coordinar estrechamente con los proveedores de bases de datos de navegación cada vez que se introduzcan procedimientos de salida convencionales;
- 4) Asegurar la continuidad entre las SID y la estructura en ruta y entre la estructura en ruta y las STAR, y las aproximaciones, utilizando una referencia común y altitudes compatibles en la interfaz;
- 5) Evitar el uso de tramos duplicados, es decir, un tramo declarado como parte de una STAR y como parte de una aproximación; y

¹¹⁹ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Documento 8168. Op. Cit. Página I-2-1-1

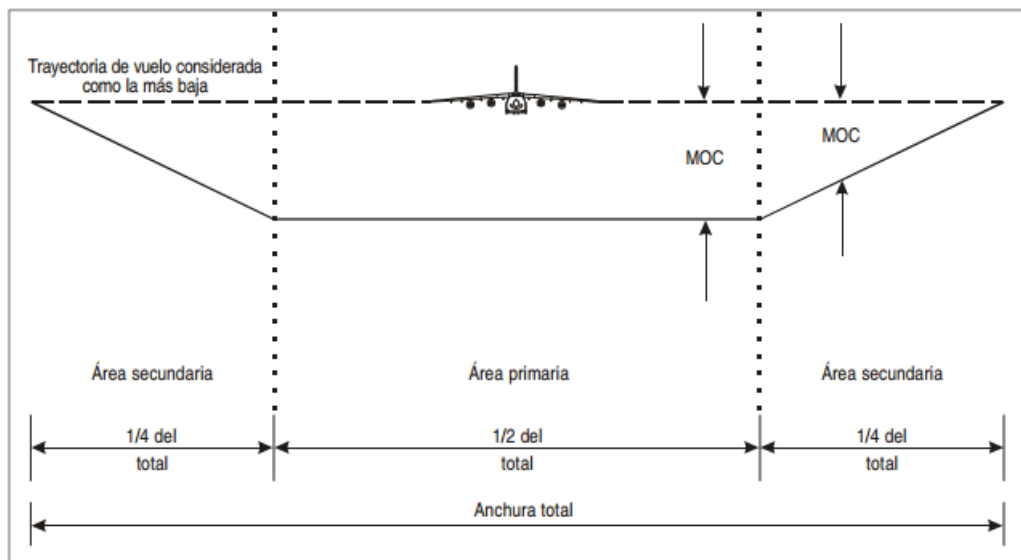
¹²⁰ Ibíd. Página I-2-3-1.

6) Evitar el uso de tramos con rumbos que intercepten radiales VOR con virajes inferiores a 30°.

Áreas de tramos¹²¹

Para cada tramo se proporciona un área correspondiente. Normalmente, el área se dispone simétricamente a cada rato de la derrota prevista. En principio, esta área se subdivide en área primaria y área secundaria. Sin embargo, en algunos casos solo se permiten áreas primarias. Cuando se permiten áreas secundarias, la mitad exterior de cada lado del área (normalmente el 25% de la anchura total) se designa como área secundaria.

Figura 79. Corte del área de tramo en línea recta, indicando las áreas primaria y secundaria¹¹⁴.



¹²¹ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Documento 8168. Op. Cit. Página I-2-1-1

¹²² Ibíd. Página I-2-1-6

Conceptos generales y tablas para realización de cálculos de anchura de área, según sensor de navegación de las aeronaves.

Tablas generales utilizadas en la totalidad de los cálculos:

Tabla 9. Medida del XTT de acuerdo a cada especificación de navegación RNAV¹²³.

<i>Fase de vuelo</i>	<i>Especificación de navegación</i>	<i>XTT</i>
En ruta y terminal [>56 km (30 NM) respecto del ARP]	RNAV 5	4,65 km (2,51 NM)
En ruta y terminal [>56 km (30 NM) respecto del ARP]	RNAV 1 y 2	3 704 m (2,00 NM)
Terminal [< 56 km (30 NM) respecto del ARP] al IAF	RNAV 1 y 2	1 852 m (1,00 NM)

Tabla 10. Valores Intermedios (BV)

<i>Fase de vuelo</i>	<i>BV para CAT A-E</i>	<i>BV para CAT H</i>
En ruta, SID y STAR [mayor o igual que 56 km (30 NM) respecto del ARP de salida o destino]	3 704 m (2,0 NM)	1 852 m (1,0 NM)
Terminal [STAR y aproximaciones inicial e intermedia menores que 56 km (30 NM) respecto del ARP; y SID y aproximaciones frustradas menores que 56 km (30 NM) respecto del ARP, pero mayores que 28 km (15 NM) respecto del ARP]	1 852 m (1,0 NM)	1 296 m (0,7 NM)
Aproximación final	926 m (0,5 NM)	648 m (0,35 NM)
Aproximaciones frustradas y SID de hasta 28 km (15 NM) respecto del ARP	926 m (0,5 NM)	648 m (0,35 NM)

¹²³ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Documento 8168. Op. Cit. Página III-1-2-2

Tabla 11. Error técnico de vuelo¹²⁴.

<i>Fase de vuelo</i>	<i>FTE (95%) Propio de la especificación de navegación requerida</i>
En ruta [mayor o igual que 56 km (30 NM) respecto del ARP de salida o destino]	RNAV 5 – 4 630 m (2,5 NM) RNP 4 – 3 704 m (2 NM) RNAV 2 – 1 852 m (1 NM) RNAV 1 – 926 m (0,5 NM) RNP 1 básica – 926 m (0,5 NM)
Terminal [SID, STAR y aproximaciones inicial e intermedia menores que 56 km (30 NM) respecto del ARP]	RNAV 2 – 1 852 m (1 NM) RNAV 1 – 926 m (0,5 NM) RNP 1 básica – 926 m (0,5 NM) RNP APCH – 926 m (0,5 NM)
Aproximación final	RNP APCH – 463 m (0,25 NM)
Aproximación frustrada	RNP APCH – 926 m (0,5 NM)

Nota: La tolerancia de cálculo de sistema (ST) es de ± 463 m.

Ecuaciones utilizadas en todos los procedimientos:

- Semianchura de área¹²⁵:

$$\frac{1}{2} A/W = 1,5 \text{ XTT} + \text{BV}$$

Donde:

1,5 XTT = corresponde al valor TSE lateral (3σ)

BV = Valor intermedio, sacado de la tabla 4.

Respecto a las anchuras de área y las tolerancias subyacentes que intervienen en los cálculos, se detalla información del párrafo titulado “XTT, ATT y semianchura del área” de la Parte III, Sección 1, correspondiente al sensor apropiado:

GNSS básico, Sección 1, Capítulo 2, 2.2¹²⁶

Este capítulo es aplicado a aeronaves que cuenten con capacidades RNAV 5/2/1, RNP 4/1/APCH.

¹²⁴ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Documento 8168. Op. Cit. Página III-1-1-2

¹²⁵ Ibíd. Página III-1-1-3

¹²⁶ Ibíd. Página III-1-2-1

XTT, ATT y semianchura de área

- XTT y ATT para especificaciones de navegación RNP. El error de sistema total (TSE) depende del error de cálculo de la posición (error SIS y error de receptor a bordo), el error de definición de trayectoria, el error de presentación en pantalla y el error técnico de vuelo. La definición de los valores laterales del TSE en especificaciones RNP es la siguiente:

a) *RNP 4*. El TSE lateral y el error a lo largo de la derrota no excederá de $\pm 7,4$ km (4 NM) para, por lo menos, 95% del tiempo total de vuelo.

b) *RNP 1 Básica*. El TSE lateral y el error a lo largo de la derrota no excederán de $\pm 1,9$ km (1 NM) para, por lo menos, 95% del tiempo total de vuelo.

c) *RNP APCH*. El TSE lateral y el error a lo largo de la derrota no excederán de $\pm 1,9$ km (1 NM) para el 95% del tiempo total de vuelo durante los tramos inicial e intermedio de la aproximación y durante la aproximación frustrada, cuando ésta se derive de un requisito RNAV. El TSE lateral y el error a lo largo de la derrota no excederán de $\pm 0,56$ km (0,3 NM) para el 95% del tiempo total de vuelo durante la aproximación final.

Los valores de TSE mencionados anteriormente se usan para definir los siguientes valores:

$$[1] \text{ XTT} = \text{TSE}$$

$$[2] \text{ ATT} = 0,8 \text{ TSE}$$

Los criterios RNP APCH se aplicarán solo dentro de 56 km (30 NM) del ARP de destino. Fuera de esta distancia, se aplican criterios RNAV 1 o RNP 1 Básica.

Teniendo en cuenta los valores la tabla 2, para el cálculo de ATT, se relaciona el 80% del XTT:

$$[3] \text{ ATT} = 0,8 \text{ XTT}$$

Tablas de resultados de semianchura de área (en km)¹²⁷:

Tabla 12. RNP 4 en ruta.

<i>En ruta/STAR/SID (>56 km del ARP)</i>		
<i>XTT</i>	<i>ATT</i>	<i>½ A/W</i>
7,41	5,93	14,82

Tabla 13. RNP 1 básica en fase de llegada y de salida.

<i>STAR/SID (>56 km del ARP)</i>			<i>STAR/SID (<56 km del ARP)</i>			<i>SID (<28 km del ARP)</i>		
<i>XTT</i>	<i>ATT</i>	<i>½ A/W</i>	<i>XTT</i>	<i>ATT</i>	<i>½ A/W</i>	<i>XTT</i>	<i>ATT</i>	<i>½ A/W</i>
1,85	1,48	6,48	1,85	1,48	4,63	1,85	1,48	3,70

Tabla 14. RNP APCH en todas las aproximaciones.

<i>IF/IAF/aproximación frustrada (<56 km del ARP)</i>			<i>FAF</i>			<i>MAPt</i>			<i>Aproximación frustrada (<28 km del ARP)</i>		
<i>XTT</i>	<i>ATT</i>	<i>½ A/W</i>	<i>XTT</i>	<i>ATT</i>	<i>½ A/W</i>	<i>XTT</i>	<i>ATT</i>	<i>½ A/W</i>	<i>XTT</i>	<i>ATT</i>	<i>½ A/W</i>
1,85	1,48	4,63	0,56	0,44	2,69	0,56	0,44	1,76	1,85	1,48	3,70

Tabla 15. RNAV 1 y 2 en todas las fases de vuelo, excepto aproximación frustrada.

<i>En ruta/STAR/SID (>56 km del ARP)</i>			<i>STAR/IF/IAF/SID (<56 km del ARP)</i>			<i>SID (<28 km del ARP)</i>		
<i>XTT</i>	<i>ATT</i>	<i>½ A/W</i>	<i>XTT</i>	<i>ATT</i>	<i>½ A/W</i>	<i>XTT</i>	<i>ATT</i>	<i>½ A/W</i>
3,70	2,96	9,26	1,85	1,48	4,63	1,85	1,48	3,70

Tabla 16. RNAV 5 en ruta.

<i>En ruta/STAR/SID (>56 km del ARP)</i>		
<i>XTT</i>	<i>ATT</i>	<i>½ A/W</i>
4,65	3,72	10,69

¹²⁷ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Documento 8168. Op. Cit. Páginas III-1-2-3, III-1-2-4, III-1-2-5, III-1-2-6 y III-1-2-7.

DME/DME, Sección 1, Capítulo 3, 3.6¹²⁸

Precisión de utilización del sistema RNAV DME/DME:

$$DTT = 2\sigma = 2 \frac{\sqrt{(\sigma_{1,air}^2 + \sigma_{1,sys}^2) + (\sigma_{2,air}^2 + \sigma_{2,sys}^2)}}{\sin \alpha}$$

Donde:

$$\sigma_{sys} = 0,05 \text{ NM} = 0,0926 \text{ km}$$

$$\sigma_{air} = 0,085 \text{ NM} = 0,15742 \text{ km}$$

$$Y, \alpha = 30 \leq \alpha \leq 150$$

Valores ATT, XTT y $\frac{1}{2} A/W$ se calculan con $\alpha = 90^\circ$ donde puedan utilizarse dos estaciones DME en todo el procedimiento (dos pares de DME disponibles en cualquier punto sobre la derrota); de lo contrario, $\alpha = 30^\circ$.

XTT, ATT y semianchura de área:

- XTT y ATT:

$$XTT = \sqrt{DTT^2 + FTE^2 + ST^2}$$
$$ATT = \sqrt{DTT^2 + ST^2}$$

Donde:

FTE = Error técnico de vuelo (Valores tomados de la tabla 4)

ST = Tolerancia de cálculo de sistema.

¹²⁸ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Documento 8168. Op. Cit., Página III-1-3-1

Tablas de valores de semianchura de área para rutas DME/DME (en km)¹²⁹

Tabla 17. XTT, ATT y semianchura de área para RNAV 1 con DME en ruta, llegada, aproximación inicial/intermedia y de salida.

Basada en la disponibilidad de dos estaciones de actualización DME.

Altitud (m)	En ruta/STAR/SID (>56 km del ARP)			STAR/IF/LAF (<56 km del ARP)			SID (<28 km del DER)			FAF		
	XTT	ATT	½ A/W	XTT	ATT	½ A/W	XTT	ATT	½ A/W	XTT	ATT	½ A/W
4 500	Para todas las altitudes			2,29	2,09	5,29	2,29	2,09	4,36			
4 200	2,29	2,09	7,14	2,23	2,03	5,20	2,23	2,03	4,27			
3 900				2,17	1,97	5,11	2,17	1,97	4,18			
3 600				2,11	1,90	5,02	2,11	1,90	4,09			
3 300				2,05	1,83	4,93	2,05	1,83	4,00			
3 000				1,99	1,76	4,83	1,99	1,76	3,90	1,82	1,76	3,65
2 700				1,92	1,68	4,73	1,92	1,68	3,80	1,74	1,68	3,54
2 400				1,85	1,60	4,63	1,85	1,60	3,70	1,67	1,60	3,43
2 100				1,78	1,52	4,52	1,78	1,52	3,59	1,59	1,52	3,31
1 800				1,70	1,43	4,41	1,70	1,43	3,48	1,50	1,43	3,18
1 500				1,63	1,34	4,29	1,63	1,34	3,36	1,41	1,34	3,05
1 200				1,54	1,24	4,17	1,54	1,24	3,24	1,32	1,24	2,91
300-900				1,46	1,13	4,05	1,46	1,13	3,12	1,22	1,13	2,76

¹²⁹ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Documento 8168. Op. Cit. Páginas III-1-3-5, III-1-3-6, III-1-3-7 y III-1-3-8.

Tabla 18. XTT, ATT y semianchura de área para RNAV 1 con DME en ruta, llegada, aproximación inicial/intermedia y de salida.

Basada en la disponibilidad de más de dos estaciones de actualización DME.

Altitud (m)	En ruta/STAR/SID (>56 km del ARP)			STAR/IF/LAF (<56 km del ARP)			SID (<28 km del DER)			FAF		
	XTT	ATT	½ A/W	XTT	ATT	½ A/W	XTT	ATT	½ A/W	XTT	ATT	½ A/W
4 500	Para todas las altitudes			1,45	1,12	4,03	1,45	1,12	3,11			
4 200	1,45	1,12	5,88	1,43	1,09	4,00	1,43	1,09	3,07			
3 900				1,41	1,06	3,96	1,41	1,06	3,04			
3 600				1,39	1,03	3,93	1,39	1,03	3,00			
3 300				1,36	1,00	3,89	1,36	1,00	2,97			
3 000				1,34	0,97	3,86	1,34	0,97	2,93	1,07	0,97	2,53
2 700				1,31	0,93	3,82	1,31	0,93	2,90	1,04	0,93	2,49
2 400				1,29	0,90	3,78	1,29	0,90	2,86	1,01	0,90	2,44
2 100				1,26	0,86	3,75	1,26	0,86	2,82	0,98	0,86	2,39
1 800				1,24	0,82	3,71	1,24	0,82	2,78	0,94	0,82	2,34
1 500				1,21	0,78	3,67	1,21	0,78	2,74	0,91	0,78	2,29
1 200				1,18	0,74	3,63	1,18	0,74	2,70	0,87	0,74	2,23
300-900				1,16	0,69	3,59	1,16	0,69	2,66	0,83	0,69	2,18

Tabla 19. XTT, ATT y semianchura de área para RNAV 2 con DME en ruta, llegada, aproximación inicial/intermedia y de salida.

Basada en la disponibilidad de dos estaciones de actualización DME.

Altitud (m)	En ruta/STAR/SID (>56 km del ARP)			STAR/IF/LAF (<56 km del ARP)			SID (<28 km del DER)			FAF		
	XTT	ATT	½ A/W	XTT	ATT	½ A/W	XTT	ATT	½ A/W	XTT	ATT	½ A/W
4 500	Para todas las altitudes			2,79	2,09	6,04	2,79	2,09	5,12			
4 200	2,79	2,09	7,90	2,75	2,03	5,97	2,75	2,03	5,05			
3 900				2,70	1,97	5,90	2,70	1,97	4,98			
3 600				2,65	1,90	5,83	2,65	1,90	4,90			
3 300				2,60	1,83	5,76	2,60	1,83	4,83			
3 000				2,55	1,76	5,68	2,55	1,76	4,75	N/A	N/A	N/A
2 700				2,50	1,68	5,60	2,50	1,68	4,68	N/A	N/A	N/A
2 400				2,45	1,60	5,52	2,45	1,60	4,60	N/A	N/A	N/A
2 100				2,39	1,52	5,44	2,39	1,52	4,52	N/A	N/A	N/A
1 800				2,34	1,43	5,36	2,34	1,43	4,44	N/A	N/A	N/A
1 500				2,28	1,34	5,28	2,28	1,34	4,35	N/A	N/A	N/A
1 200				2,23	1,24	5,19	2,23	1,24	4,27	N/A	N/A	N/A
300-900				2,17	1,13	5,11	2,17	1,13	4,18	N/A	N/A	N/A

Tabla 20. XTT, ATT y semianchura de área para RNAV 5 con DME en ruta, llegada, aproximación inicial/intermedia y de salida.

Basada en la disponibilidad de dos estaciones de actualización DME.

<i>En ruta/STAR/SID (>56 km del ARP)</i>		
<i>XTT</i>	<i>ATT</i>	<i>½ A/W</i>
Para todas las altitudes		
6,11	3,98	12,86

VOR/DME (Exclusivamente para RNAV 5), Sección 1, Capítulo 4, 4.6¹³⁰.

Precisión de utilización del sistema RNAV VOR/DME

Factores a tener en cuenta para la precisión:

- a) Tolerancia de la estación de tierra
- b) Tolerancia del sistema receptor a bordo
- c) Tolerancia técnica de vuelo
- d) Tolerancia de cálculo del sistema
- e) Distancia desde la instalación de referencia.

La precisión de utilización del sistema para el VOR es igual que la del sistema VOR de la instalación que no proporciona guía de derrota, es igual a $\pm 4,5^\circ$.

La precisión de utilización del sistema para el DME es igual a la precisión de utilización del sistema DTT para un DME que no proporciona guía de derrota:

$$2\sigma = 2 \frac{\sqrt{(\sigma_{1,\text{air}}^2 + \sigma_{1,\text{sis}}^2)}}{1}$$

¹³⁰ ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, Documento 8168. Op. Cit. Página III-1-3-1

Para las tolerancias técnicas de vuelo y de cálculo de sistema, se utiliza la tabla de valores FTE y se supone un valor de 463 m, respectivamente, del mismo modo para hallar los valores del XTT, ATT y semianchura de área en los procedimientos RNAV para DME/DME.

XTT, ATT y semianchura de área

- XTT y ATT:

Para hallar el XTT y el ATT de este procedimiento, se utilizan las siguientes fórmulas (ver figuras 1 y 2):

$$XTT = \sqrt{VT^2 + DT^2 + FTT^2 + ST^2}$$

$$ATT = \sqrt{AVT^2 + ADT^2 + ST^2}$$

Donde:

$$VT = D1 - D \cos(\theta + \alpha)$$

$$DT = DTT \cos \theta$$

$$AVT = D2 - D \sin(\theta - \alpha)$$

$$ADT = DTT \sin \theta$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{D2}{D1}\right); D1 = 0 \rightarrow \theta = 90^\circ$$

α = Precisión de utilización del sistema VOR en grados

DTT = Precisión de utilización del sistema DME

D = Distancia de instalación de referencia al punto de recorrido;
 $D = [D1^2 + D2^2]^{1/2}$

D1 = Distancia al punto de tangencia. El punto de tangencia es la proyección perpendicular de la instalación de referencia sobre la derrota nominal. La distancia al punto de tangencia (D1) es la distancia de instalación de referencia al punto de tangencia.

D2 = Distancia al punto de tangencia. Distancia del punto de recorrido al punto de tangencia. (Ver figura 80)

Figura 80. Distancias al punto de tangencia.

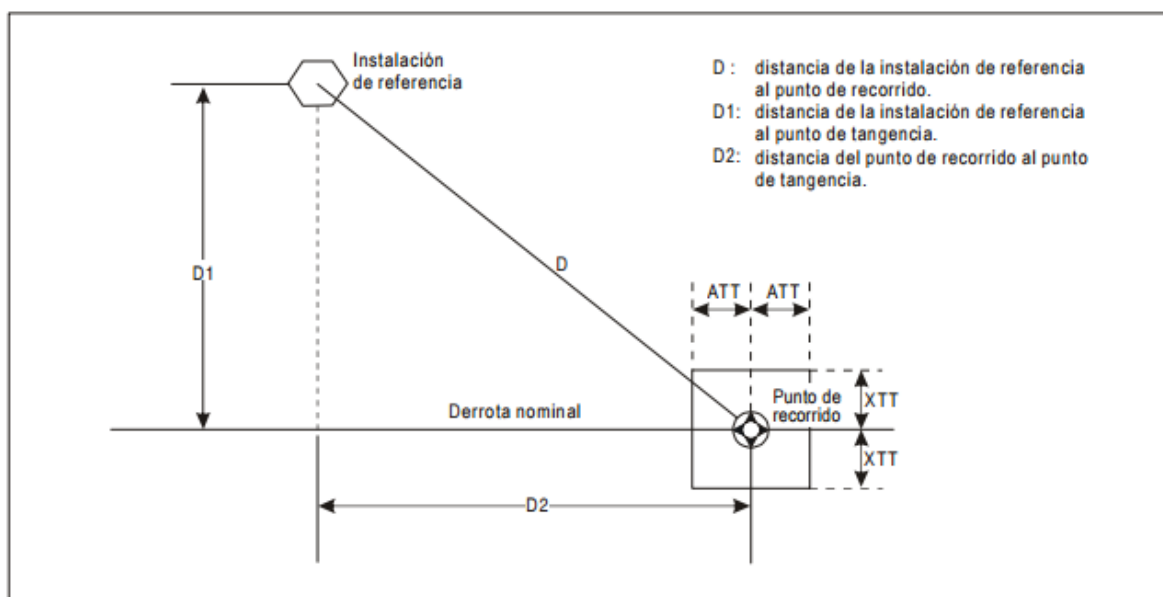
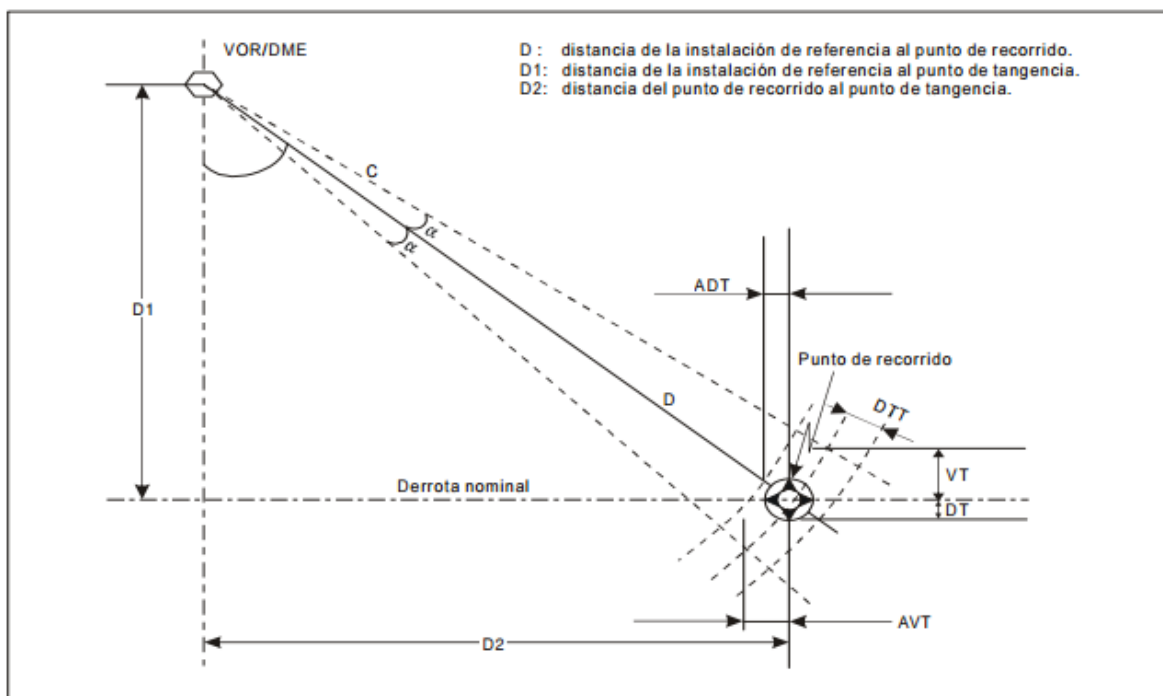


Figura 81. Distancias al punto de tangencia teniendo en cuenta ángulo de divergencia de la radioayuda.



6.2.8. OCTAVA ETAPA: SEGUNDO CÁLCULO DE PERFORMANCE PARA LA RUTA MODIFICADA

Esta etapa es la que define matemáticamente si el diseño propuesto cumple con las condiciones pactadas para el cumplimiento del objetivo principal y de la respuesta a la pregunta de investigación. Básicamente consiste en aplicar de nuevo las fórmulas de performance descritas en la quinta etapa de este proyecto, en el mismo documento de Excel donde se realizaron los primeros cálculos.

Para tomar las alturas, se tuvieron en cuenta las pendientes de ascenso y aproximación, de acuerdo a las distancias de cada tramo de la ruta. Luego de tomar las alturas, automáticamente la hoja de cálculo arroja los resultados de temperatura y de densidad de la corriente de aire libre (recordando que hay una herramienta macro definida por lenguaje SQL que permite hallar las densidades y temperaturas del aire, tomadas de la tabla ISA), y después basta con aplicar las fórmulas que ya estaban almacenadas en dicha base de datos. De esta manera, se obtuvieron todos los resultados numéricos de ese segundo cálculo, y estando en el mismo archivo de Excel, se realizaron las gráficas correspondientes para su posterior análisis en la siguiente etapa.

6.2.9. NOVENA ETAPA: ANÁLISIS FINAL Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

La etapa final de este proyecto consiste en realizar las respectivas gráficas comparativas de ambas rutas, para demostrar de manera simple y gráfica que la ruta propuesta, matemáticamente hablando, es más efectiva que la ruta actualmente utilizada. Cuando dichas gráficas ya están elaboradas, se procede a realizar un análisis corto pero sustancioso de lo que representan los cálculos elaborados, tanto para la ruta actual como para la ruta propuesta, permitiendo así exponer ideas para aportar críticas constructivas que enriquezcan la elaboración del proyecto, mediante las conclusiones que se establecerán más adelante.

Las gráficas que se elaboraron fueron las siguientes:

- Altura vs. Distancia.
- Consumo de combustible en litros.
- Emisiones de dióxido de carbono en función del tiempo.
- Consumo específico de combustible en función del tiempo.
- Velocidad vertical de la aeronave en función del tiempo, y
- Eficiencia aerodinámica.

Las tres primeras gráficas son las que corresponden a la comparación de desempeño de la aeronave, para determinar en qué ruta se establecen mayores niveles de vuelo, cuánto combustible en litros se consume por cada vuelo, y en base al consumo de combustible, las emisiones de gases de los motores del avión; de igual manera, en las gráficas se manejan funciones dependientes de la distancia y del tiempo, permitiendo así determinar qué tanta distancia y tiempo toman los vuelos que conectan a Bogotá con Leticia.

Las últimas tres gráficas se realizaron más por el punto de vista aerodinámico de las aeronaves, pues se relaciona el valor de consumo específico de combustible por hora, para saber si en verdad el consumo específico se relaciona correctamente con el consumo masivo por vuelo; la velocidad vertical se analiza con el objeto de mostrar el comportamiento de vuelo de la aeronave al momento de realizar cada una de sus fases de vuelo, permitiendo así concluir si la aeronave se desempeña correctamente en dichas fases, y la gráfica de eficiencia aerodinámica, o más bien, la relación entre el coeficiente de sustentación y el coeficiente de arrastre, en donde nos muestra qué tan variables pueden ser dichos coeficientes, demostrando así que el peso de la aeronave varía por la ruta empleada y por la distancia recorrida, lo cual puede afectar aerodinámicamente a la aeronave, de manera positiva o negativa.

7. CONCLUSIONES

- Para efectos de diseño de la nueva ruta, se incluyeron todos los procedimientos necesarios para determinar la semianchura de las áreas de cada tramo de la ruta, teniendo en cuenta las ubicaciones de las radioayudas, el margen de error de los sistemas avanzados de comunicaciones que cada aeronave tiene; la creación de un nuevo punto de notificación en el procedimiento de salida de SKBO, denominado *CALVO*, y la evaluación de obstáculos en ese mismo procedimiento, al determinar que los edificios más altos del centro de la ciudad y los cerros de Monserrate, “El Cable” y el Páramo de Los Aguados, sobrepasan los 190 m de altura, y al sobrepasar esa altura, son considerados obstáculos. A pesar de que los edificios del centro de Bogotá y el cerro de Monserrate están dentro del espacio aéreo prohibido por seguridad de la Casa de Nariño y edificios gubernamentales, son tenidos en cuenta puesto que estos obstáculos están dentro de la superficie de ascenso. Aplicando la pendiente de ascenso establecida en el AIP de SKBO, que es de 8,2%, no surge ningún inconveniente en el franqueamiento de los cerros orientales, ya que la separación vertical entre la aeronave y los cerros está por encima de los 900 ft (300 m).
- En el momento de la realización de la encuesta de capacidades de navegación, se encontraron dos aerolíneas que operan en la ruta actual BOGOTÁ – LETICIA (UB-689). Avianca Colombia y LATAM Colombia. Esta encuesta fue realizada el día 13 de junio del presente año para ambas aerolíneas, donde Avianca fue la única aerolínea que accedió a responder de manera completa dicha encuesta, ya que se esperó una respuesta por parte de LATAM durante más de un mes, pero no fue posible la realización de la encuesta con esta aerolínea por demoras en la respuesta. Cabe aclarar que no se realizó la encuesta a la aerolínea Viva Colombia, debido a que esta aerolínea entró a operar en la ruta a partir del 13 de septiembre, y para esta fecha el proyecto ya estaba concluido.
- Para los cálculos de performance, se tomaron las referencias bibliográficas que se emplearon en el curso de Performance de Aviación, del pensum académico del programa de ingeniería aeronáutica de la universidad, tomando en cuenta teoría y algunos ejemplos de ejercicios que involucran variables como el consumo específico de combustible, el comportamiento de coeficientes aerodinámicos y pesos de aeronaves, relacionando dicha teoría a los casos de la vida real donde se aplica el punto de vista ingenieril.

- De acuerdo a los resultados presentados en el análisis de información de gráficos, se concluye que la ruta propuesta por el grupo de trabajo es más efectiva que la ruta actual, puesto que los datos presentados demuestran que hay reducción de consumo de combustible, reducción de distancia, de tiempo de vuelo y de emisión de gases de dióxido de carbono, lo cual es un beneficio económico para las aerolíneas, y también un beneficio ambiental, al reducir el impacto de polución por vía aérea. Dependiendo del modelo de la aeronave que se vaya a emplear, estos resultados pueden variar, teniendo en cuenta que las especificaciones técnicas y de peso no son las mismas al incluir los factores operacionales (número de pasajeros en la aeronave, carga de combustible real con la que cuenta la aeronave, variación de velocidades a criterio de los pilotos, factores climáticos y ambientales). Para la realización de estos cálculos, se decidió utilizar como referencia el Airbus A320 sin especificación de variantes, primero por ser el equipo con mayor disponibilidad para esta ruta, y segundo, para facilitar el análisis posterior para los equipos A318 y A319, que son usados como equipos alternos por parte de la aerolínea Avianca.

RECOMENDACIÓN

La recomendación por parte del grupo de trabajo de este proyecto va enfocada a la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, en donde se recomienda tener en cuenta este proyecto como un bosquejo o idea de diseño de procedimientos, involucrando también el punto de vista de la ingeniería, con el objetivo de servir como referente para perfeccionar el procedimiento que quieren diseñar, dentro del plan de reestructuración de rutas aeronáuticas en Colombia. Los datos contenidos en este proyecto no son de total exactitud, dado que algunos datos como temperaturas, densidades, pesos, índices de emisión de gases, desempeño de los motores, entre otros, tienen gran variación.

8. BIBLIOGRAFÍA – CIBERGRAFÍA

1. AERONÁUTICA CIVIL, Boletín Técnico BT-5100-069-002 – Procedimiento para aprobación de aeronaves y operadores para operaciones especiales RNAV/RNP bajo el concepto PBN. Bogotá: Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2014. [En línea] <<http://www.aerocivil.gov.co/AAeronautica/GTecnico/Documents/BT%205100-069-002%20PBN%20V2.pdf>>
2. AERONÁUTICA CIVIL, Circular Informativa N° 5103-082-036 - Procedimientos para la aprobación de las operaciones RNAV. Bogotá: Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2015. [En línea] <<http://www.aerocivil.gov.co/AAeronautica/Rrglamentacion/Cirdulares/CircularesInformativas/CI-5103-082-036.pdf>>
3. AERONÁUTICA CIVIL, Funciones de la Aerocivil. Bogotá, 2015. [En Línea] <<http://www.aerocivil.gov.co/Aerocivil/NEntidad/Paginas/Funciones.aspx>>
4. AERONÁUTICA CIVIL, Parte cuarta de los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia – Normas de Aeronavegabilidad y Operación de Aeronaves. Bogotá: Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2014. [En línea] <<http://www.aerocivil.gov.co/AAeronautica/Rrglamentacion/RAC/Biblioteca%20Indice%20General/RAC%20%204%20-%20Normas%20de%20Aeronavegabilidad%20y%20Operaci%C3%B3n%20aeronaves.pdf>>
5. AERONÁUTICA CIVIL, Parte decimoquinta de los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia – Servicios de Información Aeronáutica. Bogotá: Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2014. [En línea] <<http://www.aerocivil.gov.co/AAeronautica/Rrglamentacion/RAC/Biblioteca%20Indice%20General/RAC%20%2015%20-%20Servicios%20de%20Informaci%C3%B3n%20Aeron%C3%A1utica.pdf>>

6. AERONÁUTICA CIVIL, Parte sexta de los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia – Gestión de Tránsito Aéreo. Bogotá: Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2014. [En línea] <<http://www.aerocivil.gov.co/AAeronautica/Rrglamentacion/RAC/Biblioteca%20Indice%20General/RAC%20%206%20-%20Gesti%C3%B3n%20de%20Tr%C3%A1nsito%20A%C3%A9reo.pdf>>
7. AERONÁUTICA CIVIL, Ponencia: Introducción al concepto de PBN - Uso práctico de sistemas GNSS. Aplicaciones en el sector de la aviación. Bogotá: Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2012, Pág 11.
8. AERONÁUTICA CIVIL, Publicación de Información Aeronáutica - Aeródromos. Bogotá: Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2014. [En línea] <<http://www.aerocivil.gov.co/AIS/AIP/Paginas/Aeródromos.aspx>>
9. AERONÁUTICA CIVIL, Publicación de Información Aeronáutica – En ruta. Bogotá: Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2014. [En línea] <<http://www.aerocivil.gov.co/AIS/AIP/Paginas/En-ruta.aspx>>
10. AERONÁUTICA CIVIL, Publicación de Información Aeronáutica - Generalidades. Bogotá: Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2014. [En línea] <<http://www.aerocivil.gov.co/AIS/AIP/Paginas/Generalidades.aspx>>
11. AERONÁUTICA CIVIL, Publicación de Información Aeronáutica – Página inicial. Bogotá: Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2014. [En línea] <<http://www.aerocivil.gov.co/AIS/AIP/Paginas/Inicio.aspx>>
12. AERONÁUTICA CIVIL. ENR 6.4 TMA Bogotá [En Línea] <<http://www.aerocivil.gov.co/AIS/AIP/AIP%20Generalidades/En%20Ruta/45%20ENR%206.4.pdf>>
13. AERONÁUTICA CIVIL. Informe del accidente de la aeronave - Vuelo 422. Página 6. [En Línea] <<http://www.aerocivil.gov.co/AAeronautica/InvAccidentes/Accidentes/HCBSU.PDF>>

14. AERONÁUTICA CIVIL. Informe del accidente de la aeronave HK-3667. Página 3. [En Línea] <<http://www.aerocivil.gov.co/AAeronautica/InvAccidentes/LAccidentes/Accidentes/HK-3667.pdf>>
15. AGENCIA ESTATAL DE SEGURIDAD AÉREA, Gobierno de España, Ministerio de Fomento. Madrid, 2013. [En Línea] <http://www.seguridadaerea.gob.es/lang_castellano/navegacion/programas/navegacion_area/conceptos.aspx>
16. AIRBUS, Toulouse, Francia. 2013. [En Línea] <http://www.airbus.com/fileadmin/media_gallery/files/tech_data/General_information/Airbus_ICAO-ARC_FAA-ADG_App-Cat-Feb2013.pdf>
17. AIRBUS. A318 Technical Specifications. Toulouse, Francia, 2015. [En línea] <<http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a320family/a318/specifications/>>
18. AIRBUS. A319 Technical Specifications. Toulouse, Francia, 2015. [En línea] <<http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a320family/a319/specifications/>>
19. AIRBUS. A320 Technical Specifications. Toulouse, Francia, 2015. [En línea] <<http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a320family/a320/specifications/>>
20. AIRLINERS.NET, A320 Technical Data. Seattle, WA, EE.UU., 2013 [En línea] <<http://www.airliners.net/aircraft-data/stats.main?id=23>>
21. AIRLINES INFORMATION. CFM56-5B Technical Data. Chicago, IL, EE.UU., 2012. [En Línea] <<http://www.airlines-inform.com/commercial-aircraft/airbus-a319.html>>
22. ANDERSON, John. Aircraft Performance and Design, 1° Ed. Ed. McGraw Hill. Washington D.C, 1999. ISBN 0-07-001971-1.
23. ARQHYS ARQUITECTURA. Dimensiones Torre Colpatria, Bogotá. 2014. [En Línea] <<http://www.arqhys.com/construccion/torre-colpatria.html>>

24. Autor desconocido. Fumigando sobre Rosario. Rosario, Argentina, 2015 [En Línea]
<<http://chemrosario.webcindario.com/paracontrolar/comofunciona.htm>>
25. CÁMARA DE COMERCIO DE PASTO, SATENA otra vez anuncia que abandonará su ruta Pasto-Bogotá-Pasto. Pasto, 2015. [Artículo En Línea]
<<http://www.ccpasto.org.co/index.php/component/k2/item/141-satena-otra-vez-anuncia-que-abandonar%C3%A1-su-ruta-pasto-bogot%C3%A1-pasto>>
26. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. Reordenamiento Institucional y Plan de Expansión del Sistema Aeroportuario. Bogotá, 1994. [En Línea]
<<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/CONPES/Econ%C3%B3micos/2727.pdf>>
27. EDIFICIOS BD BACATA. Dimensiones del edificio. Bogotá, 2015. [En Línea]
<<http://www.bdbacata.com/index.php/noticias/276-los-cuatro-rascacielos-que-le-cambiaran-la-cara-a-bogota>>
28. HALE, Francis J. Introduction to aircraft performance, selection and design. JOHN WILEY & SONS, INC., 605 THIRD AVE. NEW YORK, NY 10158, USA, 1984, 416, 1984.
29. INSTITUTO DISTRITAL DE TURISMO. Santuario de Monserrate. Bogotá, 2012. [En Línea] <<http://www.bogotaturismo.gov.co/santuario-de-monserrate>>
30. LAYTON, Donald M. Aircraft Performance. 1984. Ed. Wiley, Chichester, Reino Unido.
31. LOBO-GUERRERO, Alberto. La Falla de Bogotá en Cundinamarca. Artículo PDF. [En Línea]
<http://www.logemin.com/eng/Download/pdf/23_Falla_de_Bogota_en_Cundinamarca_completo.pdf>
32. ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL Documento 9137, Parte 6, Montreal: OACI, Segunda Edición, 1983.

33. ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL. Anexo 14 - Aeródromos, Montreal: OACI, 2004.
34. ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL. Documento 8168 – Operación de Aeronaves, Vol. II. Montreal, Canadá: OACI, 2006.
35. ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL. Documento 9613 – Manual para la Navegación Basada en el Rendimiento (PBN), Vol. 1. Bogotá: Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2010.
36. ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL. Documento 9750-AN/963 – Plan Mundial de Navegación Aérea 2013-2028. OACI: Montreal, Canadá, 2013.
37. ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL. Documento 9854 – Concepto operacional de gestión de tránsito aéreo mundial, 1° Ed. Montreal, Canadá, 2005.
38. ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL. Documento 9905 – Manual de Diseño de Procedimientos de Performance de Navegación Requerida con Autorización Obligatoria (RNP AR). OACI: Montreal, Canadá, 2009.
39. PAMADI, Bandu N. Performance, stability, dynamics, and control of airplanes. AIAA, 2004.
40. PÉREZ, Sonia. Convenio de Operaciones Internacionales de Salvamento y Extinción de Incendios en la Frontera Amazónica entre Colombia y Brasil. Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, Bogotá, 2001 [En línea] <<http://www.aerocivil.gov.co/Educacion/CEA/Documents/Curso%20SEI%2029%20Proyecto%201.pdf>>
41. PLANESPOTTERS.NET. CC-BAM LAN Chile Airbus A320-233(WL). Berlín, Alemania, 2015. <<https://www.planespotters.net/photo/327740/cc-cqp-lan-airlines-airbus-a320-233>>
42. PLANESPOTTERS.NET. D-AVYG Avianca Airbus A319-115(WL). Berlín, Alemania, 2015. [En línea] <<https://www.planespotters.net/photo/603945/d-avyg-avianca-airbus-a319-115wl>>

43. PLANESPOTTERS.NET. PR-AVJ Avianca Brasil Airbus A318-121. Brasilia, Brasil, 2013. [En línea] <<https://www.planespotters.net/photo/347013/pr-avj-avianca-brasil-airbus-a318-121>>

44. PRIETO, Carlos. Era Satelital Llegó a la Aerocivil. Artículo de El Tiempo. Bogotá, 2000. [En Línea] <<http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-1246947>>

45. SCHOLZ, D. NIȚĂ, M. Estimating the Oswald Factor from Basic Aircraft Geometrical Parameters [En Línea] <http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/OPerA/OPerA_PUB_DLRK_12-09-10.pdf>

46. SKYSCRAPERPAGE.COM. Edificio Avianca, Bogotá, 2010. [En Línea] <<http://skyscraperpage.com/cities/?buildingID=917>>

47. SWATTON, Peter J. Aircraft performance theory and practice for pilots. Wiley-Blackwell, 2008.

48. TREKKING CHILE, Santiago, 2012. [En línea] <<http://www.trekkingchile.com/fair-chile/es/viajar-calculo-co2.php>>

49. UNIVERSITY OF TEXAS, Aerospace Engineering and Engineering Mechanics. Typical Values for maximum Lift coefficient. [En Línea] <<http://www.ae.utexas.edu/~plv955/class/aircraft/Suggestions.pdf>>

50. VILLOTA, Belfor. Historia breve del Control Aéreo en Colombia. [En línea] <<http://atchistory.blogspot.com.co/search/label/HISTORIA%20DEL%20ATC>>

51. WIKIMAPIA. Dimensiones Edificio Davivienda, Bogotá, 2009. [En Línea] <<http://wikimapia.org/4470055/es/Edificio-Centro-de-Comercio-Internacional>>