



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA

**SIMULACIÓN DE LA FACTIBILIDAD DEL DESVÍO DEL
TRÁNSITO AÉREO DENTRO DEL SISTEMA METROPOLITANO
DE AEROPUERTOS DE LA CDMX**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS - INGENIERÍA INDUSTRIAL

PRESENTA:
KARLA ELIZABETH BRAMBILA LOZA

DIRECTORA DE TESIS
M.I. ANN GODELIEVE WELLENS
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX, DICIEMBRE 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria

Los resultados no solo de esta investigación, sino de toda la aventura que ha sido estudiar un posgrado, se lo dedico a mis padres, Martha y Laureano, y hermanos, Luis Antonio y Dulce Monserrat.

Elas y ellos han sido la motivación intrínseca de mi vida y se merecen todo lo que he sido y lo que llegaré a hacer, ellos saben los sacrificios y las bendiciones que he recibido desde el momento en el que decidí emprender un posgrado en un lugar de residencia alejado de ellos. Los amo con todo mí ser.

Agradecimientos

A Dios que, con su infinito amor ha puesto en mi corazón este proyecto que por fin he concluido con éxito. Él sabe que no fue nada fácil, pero marcó mi corazón con momentos gloriosos.

A mis padres, porque a pesar de todo, siguen creyendo en mí.

A mis hermanos, porque han sabido acompañarme en todas las locuras de mi vida y quiero que vean que son capaces de lograr todo lo que se propongan.

A mis abuelos, porque quiero que se sientan orgullosos de su descendencia que con tanto amor han criado.

A mis padrinos, Angelina y Rigoberto que, desde la secundaria me siguen motivando y acompañando profesional y emocionalmente en cada emprendimiento de mi vida. Los aprecio mucho.

A mis amigas a la distancia Esmeralda, Ceci, Alma y Yajaira. No les importó mi ausencia física, estuvieron más presente que nunca en mi vida. Las quiero demasiado.

A mis amigas en cancha local, Brenda, Magaly, Gayatri, Regina, Hna. Alicia y Aranza. Lograron acogerme en un sitio del que no era parte, hicieron de esta etapa un bello encuentro sororo y perpetuo. Gracias por ayudarme a creer en mí misma y apapacharme en las andanzas diarias.

A mis amigos en la fe, Ego Sum (no alcanzo a nombrar a todos), Fray Miguel, Fray Fernando, Fray Juan, Sor Elia y tantos hermanos con los que pude compartir una experiencia de la fe viva, sin duda fueron el pilar de mi crecimiento espiritual.

A mis profesores, porque con su paciencia, dedicación y esfuerzo, lograron sacar lo mejor de mí en este proyecto, especialmente de aquellos a los que les aprendí la pasión por la enseñanza.

A todos aquellos que ya no puedo nombrar individualmente, pero que mi agradecido corazón se enternece al recordar todo lo bueno que recibí y sigo recibiendo de ellos.

Este agradecimiento lo extiendo principalmente a dos personas: mi tutora la Mtra. Ann Wellens y la Dra. Catya Zúñiga; porque creyeron en mí, soportaron mis altibajos y supieron guiarme académicamente sentando las bases profesionales para el resto de mi vida. Me siento infinitamente agradecida con ellas, las estimo desde el corazón.

Contenido

i. Introducción	7
ii. Justificación	9
iii. Objetivos	9
iv. Objetivos particulares	9
v. Alcances y limitaciones	10
vi. Suposiciones	10
vii. Estructura de la tesis	11
Capítulo 1 MARCO TEÓRICO	12
1.1 Aviación en México	12
1.2 Flujo operativo en los aeropuertos de México	15
1.3 Operaciones en el aeropuerto de la Ciudad de México	17
1.4 Proyecto del Nuevo Aeropuerto de la Ciudad de México	20
1.5 Estrategias para manejo de la capacidad en aeropuertos congestionados	22
1.6 Sistema Metropolitano de Aeropuertos	24
1.7 Simulación	27
Capítulo 2 ASPECTOS TÉCNICOS DE LA AVIACIÓN	28
2.1 Carta aeronáutica	28
2.2 Espacio aéreo	31
2.3 Métricas operativas	32
2.3.1 Niveles de saturación de un aeropuerto	32
2.3.2 Salidas y llegadas en ruta	32
2.3.3 Código de referencia aeroportuario	35
2.3.4 Separación de estela de turbulencia	36
2.4 <i>Stakeholders</i>	36
2.4.1 Aerolíneas	37
2.4.2 Aeropuertos	41
2.4.3 Controlador aéreo	41
2.4.4 Clasificación del pasajero	42
Capítulo 3 METODOLOGÍA	43
3.1 Definición del sistema	44
3.2 Investigación documental	44
3.3 Obtención de la información	47
3.3.1 Sistema multi-aeropuerto de México	48
3.3.2 AICM, CDMX	50
3.3.3 Cuernavaca, Morelos	52
3.3.4 Puebla, Puebla	53
3.3.5 Querétaro, Querétaro	54

3.3.6 Santa Lucía, Estado de México	55
3.3.7 Toluca, Estado de México	55
3.4 Análisis estadístico	57
3.5 Construcción del modelo de simulación	59
3.5.1 Modelado conceptual.....	62
3.5.2 Configuración de la red interna	67
3.5.3 Generador de escenarios	70
Capítulo 4 RESULTADOS	71
4.1 Verificación del modelo.....	71
4.2 Validación del modelo	72
4.3 Escenarios propuestos.....	74
4.3.1 Escenario 1	76
4.3.2 Escenario 2	77
4.3.3 Escenario 3	78
4.3.4 Escenario 4	79
4.4 Análisis de la información	80
4.5 Soluciones y propuestas.....	81
Capítulo 5 CONCLUSIONES.....	85
Trabajos futuros	87
Referencias	88
Lista de acrónimos	97

Índice de tablas

Tabla 1.1 Sistemas multi-aeropuerto alrededor del mundo	26
Tabla 2.1 KPIs de tiempos de vuelos	34
Tabla 2.2 Código de referencia aeroportuaria en números	35
Tabla 2.3 Código de referencia aeroportuaria en letras	35
Tabla 2.4 Categoría de estela turbulenta	36
Tabla 2.5 Características del producto de las aerolíneas de bajo costo y servicio completo	38
Tabla 2.6 Alianzas y aerolíneas pertenecientes	40
Tabla 3.1 Aeropuertos más cercanos al Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México	44
Tabla 3.2 Características de los aeropuertos del sistema multi-aeropuerto	48
Tabla 3.3 Características específicas de los aeropuertos	50
Tabla 3.4 Número de llegadas por aerolínea	59
Tabla 3.5 Valores de entrada del modelo de simulación	60
Tabla 3.6 Sectorización de los aeropuertos con ruta desde/hacia MEX para la conexión con los VOR	66
Tabla 4.1 Outputs del modelo de simulación	72
Tabla 4.2 Semáforo de saturación	72
Tabla 4.3 Resultados del escenario 1	77
Tabla 4.4 Resultados del escenario 2	78
Tabla 4.5 Resultados del escenario 3	79
Tabla 4.6 Resultados del escenario 4	80
Tabla 4.7 Picos de llegadas por escenario	83

Índice de figuras

Figura 1.1. Estadísticas del número de pasajeros de los diez aeropuertos principales de México.	15
Figura 1.2. Millones de pasajeros transportados por año en México.....	16
Figura 1.3. Llegada total de pasajeros de los 10 principales aeropuertos en enero-febrero en los últimos tres años.....	17
Figura 1.4. Vista aérea del terreno donde se localiza el AICM y la zona residencial localizada alrededor.	18
Figura 1.5. Vuelos desde la Ciudad de México.	19
Figura 1.6. Red Aeroportuaria Nacional.	20
Figura 1.7. Vista aérea de la ruta terrestre en el actual y el nuevo aeropuerto.	21
Figura 1.8. Estrategias para el manejo del tránsito aéreo	23
Figura 2.1 Extracto de carta de navegación en ruta del espacio aéreo superior H2.	30
Figura 2.2 Extracto de carta de navegación en ruta del espacio aéreo inferior L2.	30
Figura 2.3 Espacio aéreo controlado y no controlado.	31
Figura 2.4 La medición del ATM.	33
Figura 2.5 Referencia de distancia en ruta.	34
Figura 2.6 Tránsito aéreo mundial 2018 por alianza.....	40
Figura 2.7 Diagrama de relación de stakeholders	42
Figura 3.1 Diagrama de la metodología propuesta	43
Figura 3.2 Ubicación de los aeropuertos del Valle de México, distancias y direcciones de pista.	46
Figura 3.3 Esquema para el criterio de desvío de ruta en el TMA del sistema multi-aeropuerto propuesto.	47
Figura 3.4 Plano de aeródromo MEX.....	51
Figura 3.5 Plano de aeródromo CVJ	52
Figura 3.6 Plano de aeródromo PBC.....	53
Figura 3.7 Plano de aeródromo QRO.....	54
Figura 3.8 Plan maestro para el aeródromo NLU	55
Figura 3.9 Plano de aeródromo TLC	56
Figura 3.10 Gráfica de número de llegadas por hora.....	58
Figura 3.11 Vista del modelo de simulación con VORs y los aeropuertos del sistema multi-aeropuerto con rutas internas.....	60
Figura 3.12 Diagrama de la construcción del modelo de simulación	61
Figura 3.13 Carta aeronáutica del TMA del MEX.....	63
Figura 3.14 TMA de MEX indicando el sistema multi-aeropuerto	64
Figura 3.15 TMA de MEX indicando los VORs incluidos.....	64
Figura 3.16 Sectorización del espacio aéreo de MEX.....	65
Figura 3.17. Aeropuertos conectados a los VOR por sector.....	67
Figura 3.18 Simplificación del TMA del MEX considerando VORs, aeropuertos y aerovías.....	68
Figura 3.19 Vista del modelo de simulación con VORs y los aeropuertos del sistema multi-aeropuerto con rutas internas.....	69
Figura 3.20 Tabla pivote para la generación de escenarios.....	70
Figura 4.1 Pantalla de la corrida de la simulación	71
Figura 4.2 Gráfica del número de operaciones por hora.....	73
Figura 4.3 Criterios para armado de escenarios para simular.....	75
Figura 4.4 Modelo esquemático del escenario 1	76
Figura 4.5 Modelo esquemático del escenario 2	77
Figura 4.6 Modelo esquemático del escenario 3	78
Figura 4.7 Modelo esquemático del escenario 4	79

i. Introducción

La aviación ha permitido globalizar vertiginosamente el mundo y su intercambio comercial por ser un medio veloz para el transporte de personas y carga a nivel mundial. Esto ha impactado positivamente el mercado y trae consigo beneficios comerciales, económicos, turísticos y culturales que han llevado a los países tercermundistas a cruzar fronteras y potencializar sus relaciones internacionales.

México, siendo un país en vías de desarrollo y debido a su localización geográfica es un destino muy solicitado por los diversos medios de transporte, especialmente por el aéreo; por lo cual, constantemente se rebasa la capacidad operativa de los principales aeropuertos del país, como el caso del aeropuerto de la Ciudad de México que se ha visto sobrepasado y constantemente ha sido exhortado por los organismos internacionales sobre la necesidad de mejorar su gestión aérea y brindar mejor calidad operativa y de servicio para los pasajeros.

A través de los años han existido diversos proyectos para incrementar la capacidad aérea del aeropuerto de la Ciudad de México, aunque la mayoría de estos solo han dado soluciones a corto y mediano plazo, por lo que el problema de saturación se repite en unos pocos años. Las soluciones han sido desde la ampliación de las instalaciones, incentivos económicos para las aerolíneas, diversificación del turismo a otros destinos de México, un sistema metropolitano de aeropuertos, con el envío de operaciones a aeropuertos cercanos; no obstante, ninguna implementación está respondiendo a la creciente demanda operativa en tendencia a nivel global.

El año 2020 ha sido un año atípico para todos los sectores de transporte y comunicación, sobre todo para el sector del turismo debido a la pandemia del coronavirus porque los aeropuertos se consideraron las principales fuentes de contagio y exposición al virus, por lo que la interrupción de operaciones de vuelo fue parte de la estrategia para controlar la propagación de la enfermedad. Este evento disminuyó las noticias sobre los problemas de saturación a los que suele enfrentarse el aeropuerto de la Ciudad de México; pero se sabe que una vez que se haya controlado esta pandemia, la aviación será una pieza clave para la reactivación económica local y global, y el aeropuerto nuevamente se enfrentará a las condiciones de saturación ya identificadas. Este nivel de impacto que afecta directamente al aeropuerto incita a preparar el terreno para cuando se pueda reactivar al cien por ciento la actividad y se muestren nuevas estrategias para dar respuesta al problema de la saturación operativa del aeropuerto de la Ciudad de México.

El desarrollo de las estrategias propuestas en este proyecto considera los intereses de los diferentes participantes (mejor conocidos como *stakeholders*): aeropuertos, aerolíneas y controladores aéreos, pero principalmente radica en la necesidad de aprovechar los recursos y la infraestructura de los aeropuertos cercanos ya existentes, todo eso basado

en la teoría de la gestión aeroportuaria que ya se aplica en sistemas aeroportuarios alrededor del mundo.

Hay herramientas que ayudan a analizar la eficiencia de las propuestas de liberación de saturación en el transporte, especialmente en los casos de alto riesgo e impacto económico, como es la aviación. Para estos casos, la simulación es una herramienta que ayuda a recrear las condiciones actuales y evaluar virtualmente la viabilidad de cada una de las propuestas, sin que esto implique un riesgo operativo, riesgo para la integridad de los pasajeros ni el impacto económico de implementarlo en la vida real. De esta manera, se realiza un análisis de la eficiencia de las propuestas de la liberación de la saturación aérea para la Ciudad de México con base en un modelo de simulación para la gestión del tránsito aéreo combinando las operaciones aéreas con aeropuertos cercanos, además de considerar las implicaciones técnicas del control y gestión aeroportuaria para cumplir con las principales normas de seguridad y recomendaciones de organismos internacionales para hacer eficientes las operaciones en aire y en tierra. Las necesidades de los principales *stakeholders* también son consideradas para el análisis de los resultados, es decir, se busca en medida de lo posible atender sus intereses y presentar de forma atractiva las ventajas competitivas de mejorar los niveles de servicio y compartir las operaciones con aeropuertos cercanos.

ii. Justificación

La liberación de la saturación aérea es uno de los mayores retos a nivel mundial, por lo que proponer opciones para mejorar e incrementar el flujo de las operaciones aéreas a largo plazo será el área de oportunidad para el mercado de la aviación y la conectividad turística de México con el mundo.

iii. Objetivos

Analizar, mediante un modelo de simulación de eventos discretos en SIMIO®, la factibilidad del desvío de operaciones aéreas de la Ciudad de México a aeropuertos cercanos para disminuir los niveles de saturación de este aeropuerto, todo esto desarrollando diferentes escenarios y evaluando los indicadores de capacidad del sistema.

iv. Objetivos particulares

- a) Análisis de las estrategias para la gestión de las operaciones aéreas en sistemas multi-aeropuerto alrededor del mundo
- b) Análisis del flujo de operaciones aéreas de la Ciudad de México
- c) Análisis de las características de los aeropuertos cercanos a la Ciudad de México y la capacidad de la infraestructura
- d) Desarrollo de un modelo de simulación para las operaciones aéreas de la Ciudad de México
- e) Definición de los datos de entrada del modelo de simulación
- f) Generación de hipótesis y escenarios para la simulación
- g) Simulación de desvío de operaciones del aeropuerto de la Ciudad de México a aeropuertos cercanos y su impacto.

v. Alcances y limitaciones

El estudio se llevó a cabo con la información histórica del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México y de los aeropuertos cercanos: Puebla, Querétaro, Cuernavaca, Toluca y recientemente Santa Lucía.

Además, se consideran las siguientes limitaciones:

- El análisis de las operaciones aéreas está basado únicamente en la información públicamente disponible
- Las diferentes posturas políticas sobre la viabilidad de los proyectos de los aeropuertos y la variación presentada a través del desarrollo de esta investigación
- El modelo de simulación al ser una herramienta conceptual basada en simplificaciones del mundo real solo muestra resultados basados en estas simplificaciones
- Las normas de aviación internacional para las operaciones aéreas e infraestructurales para la propuesta de la desviación de las operaciones en el sistema
- Para el modelo de simulación se sigue una regla teórica de asignación, pero en la práctica se sabe que los controladores toman las decisiones en tiempo real, considerando factores que no se pueden simular (como el clima, accidentes, eventualidades en tierra, etc.)
- No se considera la psicología del pasajero, sino las tendencias generales y mejores niveles de servicio.

vi. Suposiciones

Para desarrollar el modelo de simulación se consideraron las siguientes suposiciones:

- El desarrollo del proyecto considera la capacidad actual de los aeropuertos sin modificaciones a su configuración estructural y de políticas de servicio
- No se considera como opción la reactivación del Nuevo Aeropuerto de la Ciudad de México (NAICM)
- La demanda del servicio no cambiará a pesar de cambiar el destino de los vuelos
- Los distintos aeropuertos cuentan con los empleados necesarios para ofrecer el servicio; es decir, no se considera el traslado de los trabajadores, despido o contrato de ellos.

vii. Estructura de la tesis

Capítulo 1 abordará el alcance de la aviación a escala global hacia las particularidades del flujo operativo en el aeropuerto de la Ciudad de México, desde su inauguración los problemas de saturación a los que se ha enfrentado y las diversas estrategias para incrementar su capacidad que van desde la expansión de edificios, el desarrollo de un nuevo aeropuerto, hasta la creación de una red de aeropuertos. Se analizan algunos ejemplos internacionales y el fundamento técnico para la viabilidad del sistema de aeropuertos en México.

Capítulo 2 mencionará los indicadores de la aviación, el impacto en cada uno de los *stakeholders* y la implicación en la toma de decisiones.

Capítulo 3 describirán cada uno de los pasos necesarios para la obtención de la información, el análisis y la lógica del modelo de simulación. En este capítulo se detallan todos los procedimientos y herramientas empleadas para construir el modelo y validar los datos obtenidos en la corrida del modelo implementado.

Capítulo 4 recabará los resultados obtenidos mediante el análisis y las corridas del modelo de simulación, se analizará la viabilidad de cada uno de los escenarios y se propone la forma de implementación en el sistema real.

Capítulo 5 reunirá todas las conclusiones, las implicaciones técnicas de las soluciones propuestas y el impacto que podría tener en el sistema real actual.

CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO

En esta sección se abordan los temas teóricos sobre la historia de la aviación en México, las estrategias del manejo del tránsito aéreo y el flujo actual de las operaciones aéreas en el aeropuerto internacional de la Ciudad de México.

1.1 Aviación en México

El primer vuelo realizado en la Ciudad de México fue el 8 de enero de 1910 a cargo de Alberto Braniff en un avión francés, en los llanos de Balbuena, hoy la Av. Francisco del Paso y Troncoso, y es considerado el primer vuelo en los países latinoamericanos. Esta fue la primera y más importante hazaña de lo que sería la aviación en México, aunque en este contexto los avances que se lograron en poco tiempo habían sido más bien con fines bélicos durante la Revolución de 1910 (Chías, 1981; Bintaned, 2014; SCT, 2019). El gobierno de ese tiempo impulsó fuertemente el desarrollo de los aviones y en 1913 se llegaron a ensamblar algunos imitando a los aviones europeos con importación de piezas francesas, históricamente México fue el primer país latinoamericano en fabricar aviones. Desde 1915 por decreto presidencial de Venustiano Carranza se establece la aviación castrense de México y poco tiempo después el Departamento de Aeronáutica Militar junto con talleres de fabricación y reparación. En algún momento la producción de las partes de hierro antes importadas estaban a cargo de las fundidoras mexicanas, sin embargo, el desarrollo se vio abruptamente detenido por la competencia externa provocada por la segunda guerra mundial.

El desarrollo de la aviación captó la atención de los empresarios, que veían a la industria aeronáutica como una opción viable, por lo que para el año 1919 se establecieron las compañías aéreas de Alemania, Francia, Inglaterra y Holanda. En México los primeros vuelos se dieron con Estados Unidos en los años 20's, que al principio al igual que todos, fue para tener un servicio postal entre las ciudades y que según datos históricos fue hasta el año de 1935 cuando se superaron los ingresos económicos del correo por el de los pasajeros.

En 1924 nace la Compañía Mexicana de Aviación que, con la intervención de la firma estadounidense Pan Am comenzó a expandirse y aumentar la capacidad de los aviones. Antonio Díaz Lombardo junto con la Alianza de Camioneros de México, fundó en 1934 Aeronaves de México también conocida como Aeroméxico, que en 1957 fue adquirida por el gobierno federal del país para ser la aerolínea "nacional" (Chías, 1981).

Alrededor del mundo han ocurrido otros fenómenos que han influenciado fuertemente a los modelos comerciales de la aviación internacional. Quizá la más importante es que en 1971 surge el modelo de negocio Low Cost Carrier (LCC) con la aerolínea SouthWest.

En 1978, EEUU implementa la desregularización aérea con la que promueve una libre competencia y la disminución de precios ha sido de hasta 5 veces menor y en 1989 surge la primera alianza comercial Alianza Wings entre KLM y NorthWest que brindan ventajas competitivas, por lo que el modelo es replicado unos años después por OneWorld y SkyTeam (ALN News, 2014).

La aviación global transportó en el año 2018 a 4,400 millones de pasajeros, mostrando un incremento del 6.9% con respecto a 2017. Los pasajeros de Norteamérica representan una cuarta parte de los pasajeros globales y el factor de ocupación por aeronaves alcanzó el 81.9% a nivel global (IATA, 2019). El sistema aeroportuario de todo México contribuye en 38 mil millones de dólares anuales que equivalen al 3.04% del Producto Interno Bruto (PIB) del país y genera más de 1 millón de empleos (Castellanos, 2017; IATA, 2019), además de que promueve el turismo y el comercio internacional, el intercambio social y cultural, rompe las fronteras y genera lazos con el mundo exterior. El Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) se revela como un nodo importante cuya operación afecta a la completa red nacional de aeropuertos (Wellens et al., 2017). Bajo este concepto, México debe buscar potenciar su economía con base en una estrategia de relaciones entre sus *stakeholders*: aeropuertos, aerolíneas y controladores.

Durante el año 2020 y a consecuencia de la pandemia del COVID-19 la aviación internacional fue uno de los sectores más afectados. La OACI, Organismo Internacional de Aviación Civil (2020) señala que el tránsito de pasajeros disminuyó hasta en un 60% frente al crecimiento exponencial de los más recientes años y con esto se calculan pérdidas económicas de más de 50% a nivel mundial. El panorama a nivel internacional tiene una pinta parecida, y al ser un sector global, los impactos serán equivalentes en las diversas regiones del mundo. El retorno a la normalidad parece depender de los protocolos que se implementen en los aeropuertos, por lo que será difícil predecir los números futuros.

Varias industrias del país dependen del transporte aéreo para mantener sus políticas de producción que mantienen la competitividad de su cadena de suministro. La conectividad aérea permite mayores beneficios económicos y sociales, considera factores como:

- número de rutas
- importancia de los destinos
- frecuencia de los servicios
- número de asientos disponibles.

La saturación del AICM y su imposibilidad de crecimiento se han identificado desde la década de 1990 y en el año 2018 fue clasificado en el *Ranking The Busiest Airports in the World* en el lugar número 33 (International Airports Council, 2018) operando al más de 50% de su capacidad. Las consecuencias se muestran en la complejidad de su manejo y la dificultad en el control de las operaciones tanto aéreas como terrestres.

La Ciudad de México sigue creciendo y el país también ganó importancia como destino turístico y de negocios. Esto se ve reflejado en la alta actividad del aeropuerto de esta ciudad y los niveles de saturación presentados desde hace más de dos décadas. El Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) es muy importante por el número de operaciones anuales, así como su funcionalidad como *hub* o centro de conexiones aéreas para ciertos transportistas. Durante más de 15 años, las autoridades aeroportuarias y el gobierno federal han propuesto alternativas de desarrollo para el aeropuerto actual, como la ampliación de la terminal 1 y la construcción del edificio terminal 2. La falta de espacio en las instalaciones no permite la ampliación de la capacidad de las pistas (Herrera García, 2001), por lo que las operaciones del AICM se verán limitadas a la capacidad actual de las pistas de aterrizaje.

El gobierno del presidente Peña Nieto (2012-2018) acordó en 2014 la construcción de un nuevo aeropuerto en Texcoco, sin embargo, al comienzo del nuevo gobierno federal (2018-2024) esta iniciativa se suspendió a favor de la expansión de la Base Militar No. 1 en Santa Lucía, Edo. Mex., lo que ha requerido cambios sustanciales en las propuestas de expansión originales (Villanueva, 2019). Surgió un renovado interés en una de las propuestas anteriores para cubrir la demanda con una red de aeropuertos metropolitanos con aeropuertos secundarios (ASA, 2006; Gordo, 2016), que incluye a Puebla, Querétaro, Toluca y Cuernavaca, ya que están cerca de la Ciudad de México y ya tienen la infraestructura necesaria para operar (Galindo López et al., 2011). Cabe mencionar que algunos de los aeropuertos secundarios o regionales podrían generar pérdidas en lugar de ser rentables (Doganis, 1995), por lo que se tienen que estudiar no sólo los factores técnicos, sino la viabilidad del sistema como una oferta atractiva para todos los elementos involucrados.

Este tipo de sistema aeroportuario se ha utilizado en varias ciudades grandes donde el aeropuerto principal tiene una ocupación muy alta; en cambio, opera eficientemente con el apoyo de aeropuertos secundarios, como el caso de Londres, donde un conjunto de seis aeropuertos satisface la demanda de toda la ciudad (Cantera, 2018), París, donde se utilizan cuatro aeropuertos o Nueva York que se integra con tres aeropuertos cercanos (De Neufville, 2013).

En el año 2018 el gobierno federal ha propuesto un plan para la creación de una red de aeropuertos que incluye la construcción de la terminal 3 donde ahora se encuentra el hangar presidencial, así como actualizaciones en la infraestructura actual. También se propone ampliar la capacidad del Aeropuerto Internacional de Toluca a más de 10 millones de pasajeros y se iniciaría la construcción del nuevo Aeropuerto Internacional 'General Felipe Ángeles' en la base militar de Santa Lucía en el Estado de México. Esta red aeroportuaria podría atender a 20 millones de pasajeros en Toluca, 50 millones en la Ciudad de México y en la etapa final 120 millones en Santa Lucía, aunque para su inauguración en el 2022 sólo podrá atender a 20 millones de pasajeros (ObrasWeb, 2019).

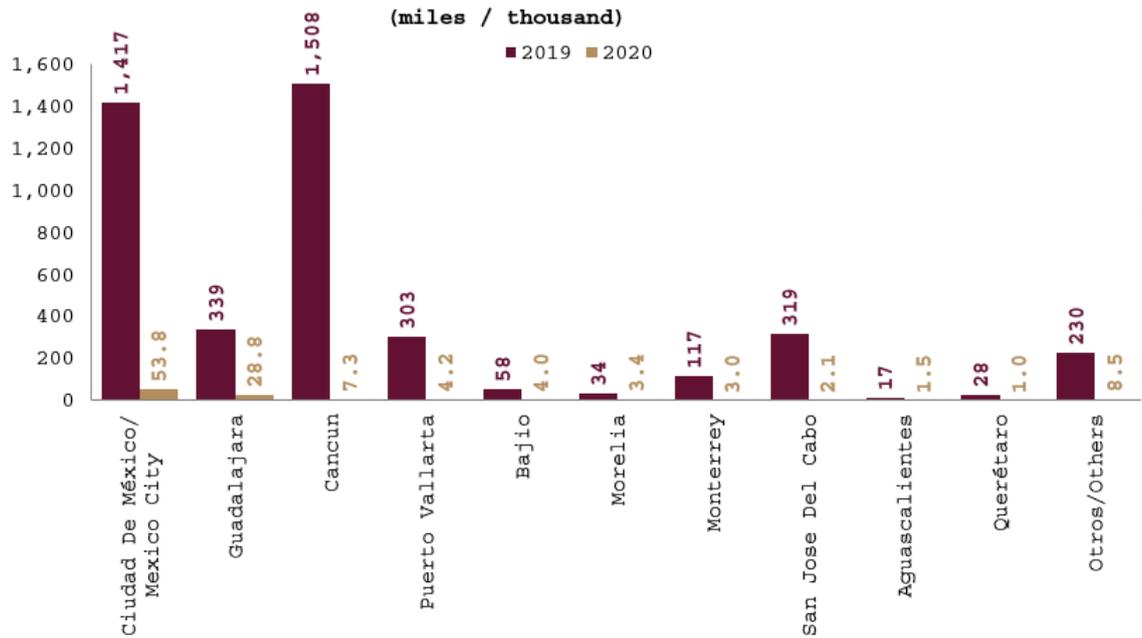


Figura 1.1. Estadísticas del número de pasajeros de los diez aeropuertos principales de México.

Fuente: SCT, 2020.

Se han propuesto diferentes soluciones para liberar la saturación del aeropuerto de la Ciudad de México en sus diferentes momentos históricos. A continuación, se enlistan las más relevantes:

- Mejoras del edificio terminal del AICM
- Construcción del edificio terminal 2 (2005-2007)
- Construcción del edificio terminal 3 (2019), pero el proyecto está parado (Flores, 2020)
- Implementación del Sistema Metropolitano de Aeropuertos (2006)
- Expansión de los aeropuertos cercanos (Toluca en 2006)
- Construcción de un nuevo aeropuerto (pero cancelado en 2018)
- Expansión de la base militar de Santa Lucía (2022)

La saturación del AICM también es una ventana de oportunidad para otros proyectos que buscan solventar la saturación del AICM proponiéndolo como *hub*, es decir, un centro de operaciones aéreas.

1.2 Flujo operativo en los aeropuertos de México

Para el año 2021, México cuenta con 77 aeropuertos, de los cuales 64 son aeropuertos internacionales bajo 15 concesiones, el AICM pertenece a una concesión paraestatal, existen 85 rutas de pasajeros y 4 de carga autorizadas (SCT, 2020). En el caso de la Ciudad de México, el aeropuerto cuenta con 137 rutas nacionales y 453 itinerarios

internacionales para todas las aerolíneas mexicanas (González et al., 2019), además de encabezar la lista de los *hubs* más conectados de América Latina.

El Banco Mundial (2019) muestra que el crecimiento de la aviación en México salta vertiginosamente a partir del año 2010, con una diferencia notable de los años anteriores, para llegar al año 2018 con casi 65 millones de pasajeros transportados (Banco Mundial, 2019), ver la figura 1.2.

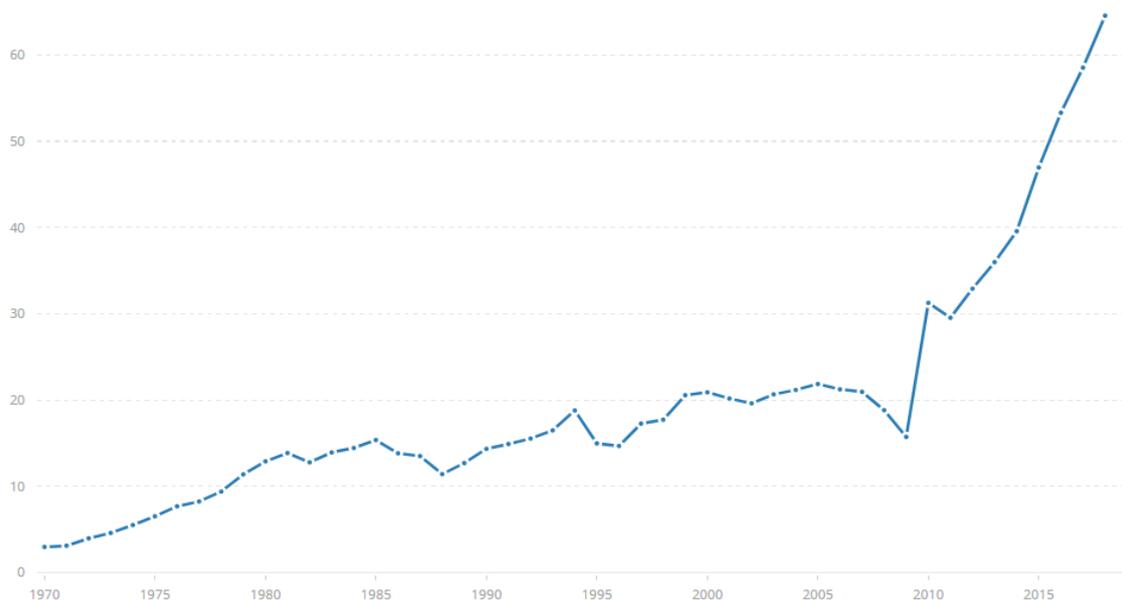


Figura 1.2. Millones de pasajeros transportados por año en México

Fuente: Banco Mundial, 2018

La figura 1.2 brinda un panorama positivo para México, con un crecimiento anual de sus operaciones aéreas estimado del 3.6% durante las próximas dos décadas (González et al., 2019) y con esto el aumento de la actividad comercial para todo el país. De acuerdo con la información ofrecida por la SCT (2020), la industria de la aviación en México presentó las siguientes cifras en el año 2019:

- Transportó 102.5 millones de pasajeros
 - 70.304 millones en aerolíneas mexicanas
 - 32.158 millones en aerolíneas extranjeras
- Las aerolíneas nacionales crecieron 8.5% con respecto al año anterior, principalmente las LCC
- El factor de ocupación de aerolíneas nacionales creció al 81.8%
- El transporte de carga alcanzó 859.3 mil toneladas de mercancía.

El número de pasajeros transportados por cada aeropuerto se presenta en la figura 1.3.

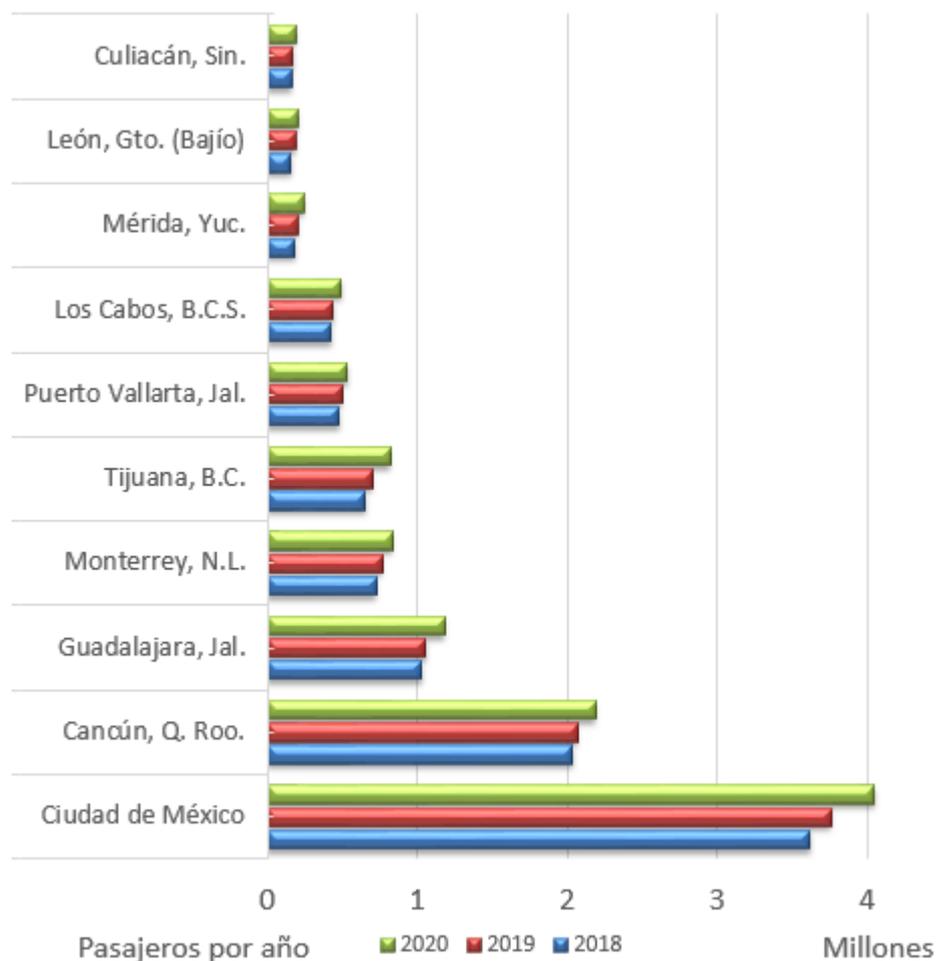


Figura 1.3. Llegada total de pasajeros de los 10 principales aeropuertos en enero-febrero en los últimos tres años

De acuerdo con las cifras de enero-febrero de los años 2018, 2019, 2020, los aeropuertos que transportan mayor número de pasajeros son Ciudad de México, Cancún y Guadalajara. A continuación, se analizarán las características operativas del aeropuerto de la Ciudad de México por ser el principal aeropuerto del país.

1.3 Operaciones en el aeropuerto de la Ciudad de México

El aeropuerto de la Ciudad de México está sobrepasado en su capacidad operativa, incluso ya desde 1979 se habían considerado nuevas locaciones para el establecimiento de un nuevo aeropuerto para captar operaciones y disminuir la saturación del aeropuerto. Las posibles localizaciones nuevas eran lugares como Cuautla, Morelos; Tizayuca, Hidalgo y Santa Lucía en el Estado de México (Mendoza et al., 2014), pero ninguna opción se llevó a cabo, por lo que los niveles de saturación del AICM siguieron en aumento. Años después se realizaron modificaciones en las instalaciones de la terminal aérea, lo que le dio al pasajero mayores niveles de servicio, pero factores como

el crecimiento económico y el Tratado de Libre Comercio incentivaron el crecimiento de la industria de la aviación y con esto los niveles de saturación se volvieron a presentar prontamente.

En el año 1988, el AICM se encontraba en la posición 48 de los aeropuertos más grandes del mundo (Cohas, 1993), y a finales de 1999 el AICM ya se reportaba casi saturado, por lo que resurge un interés en la construcción de un nuevo aeropuerto, aunque todos los intentos de los sexenios del 2000 a la fecha fueron un fracaso (Mendoza et al., 2014). La principal limitante del desarrollo de la infraestructura del AICM es la localización geográfica, ya que el terreno en el que se encuentra localizado no tiene extensión territorial para crecer debido a la conglomeración habitacional de alrededor tal como se muestra en la figura 1.4.

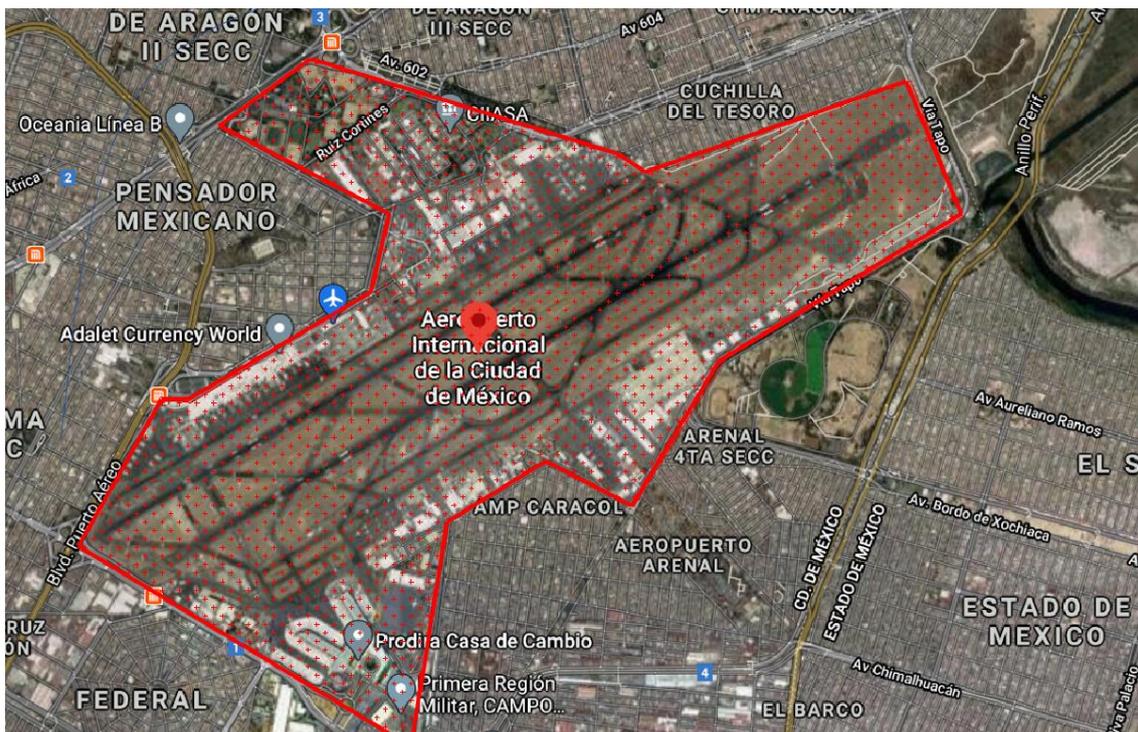


Figura 1.4. Vista aérea del terreno donde se localiza el AICM y la zona residencial localizada alrededor.

Fuente: Google Maps, 2021.

El aeropuerto de la Ciudad de México encabeza la lista de los aeropuertos más ocupados de América Latina (Murillo Dias, 2019), y debido a la infraestructura limitada los niveles de saturación son altos lo cual repercute negativamente en todos los *stakeholders* (Sidiropoulos et al., 2018). El número de operaciones retrasadas aumentan y se vuelve más complejo el control aéreo, por lo que se enfrenta a más problemas debido a la demanda de las aerolíneas de bajo costo que van en aumento (Infobae, 2019). Esto trae aumento de costo de operaciones y saturación del espacio aéreo al mantener los vuelos en el aire esperando el permiso para aterrizar.

La saturación de las operaciones aéreas incrementa los costos de operación de las aerolíneas y los pasajeros son afectados negativamente al perder el tiempo a causa de la formación de líneas de espera (Herrera García, 2014). En este sentido las operaciones en el AICM se ven en desventaja competitiva frente a la capacidad de otros aeropuertos y si no se encuentra una pronta solución para la saturación se pueden perder conexiones aéreas importantes (ALN News, 2019) debido a la complejidad operativa que implica y a la preferencia de las aerolíneas para cambiar de destino. Actualmente, el AICM tiene 110 destinos con 26 aerolíneas (Flightsfrom, 2020), las cuales se muestran en la figura 1.5.



Figura 1.5. Vuelos desde la Ciudad de México.

Fuente <https://www.flightsfrom.com/MEX>

Además de los vuelos nacionales (localizados con puntos rojos), también se tienen conexiones con destinos en el norte, centro y sur de América, así como conexiones directas con los principales aeropuertos de Europa y pocos con el continente asiático.

La Red Aeroportuaria Nacional está conformada por 5 grupos aeroportuarios: Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA), Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM), Grupo Aeroportuario del Centro Norte (OMA), Grupo Aeroportuario del Sur (ASUR) y Grupo Aeroportuario del Pacífico (GAP); además de existir otras sociedades del gobierno federal con gobiernos de los estados y con inversión de partes privadas. Los grupos suelen operar bajo las mismas condiciones en todos los aeropuertos bajo su gestión, además de que las políticas de conexión son más sencillas y los canales de

comunicación más abiertos en los aeropuertos del mismo grupo. En la figura 1.6 se muestra la distribución de aeropuertos de acuerdo con su grupo aeroportuario.



Figura 1.6. Red Aeroportuaría Nacional.

Fuente: ASA, 2019.

Cada grupo aeroportuario gestiona a sus aeropuertos bajo las mismas políticas operativas, que no siempre son iguales a las del resto, además de que poseen formas particulares para gestionar los recursos internos del aeropuerto. Su compatibilidad operativa depende de la sinergia con los otros grupos aeroportuarios.

Los aeropuertos operados por sociedades del gobierno federal con los estados de la República Mexicana e inversión privada son:

- Toluca
- Querétaro
- Cuernavaca
- Tuxtla Gutiérrez
- Palenque

1.4 Proyecto del Nuevo Aeropuerto de la Ciudad de México

La propuesta de un nuevo aeropuerto que atienda a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México surge en la década de 1990, en los terrenos en la Zona Federal de un ex vazo

de Texcoco, Estado de México, sin embargo, este proyecto se pospuso para dar paso a la construcción de la terminal 2 del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. El Nuevo Aeropuerto de la Ciudad de México se reactivó durante el gobierno federal de 2012-2018 y sustituiría completamente al AICM impactando poco en el manejo del tránsito aéreo del Área Terminal de México (OACI, 2013), debido a la cercanía de los aeropuertos. La figura 1.7 muestra la ubicación del NAICM, que se localiza aproximadamente a 26 minutos en coche desde el AICM.

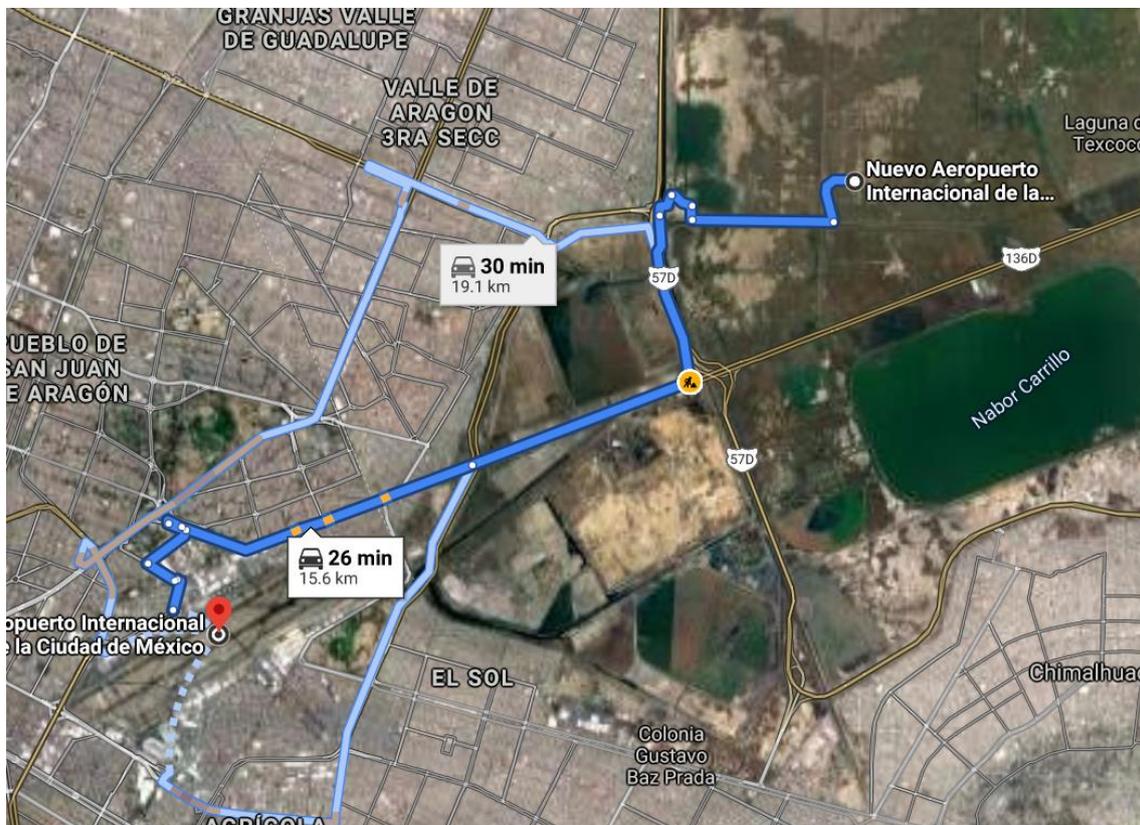


Figura 1.7. Vista aérea de la ruta terrestre en el actual y el nuevo aeropuerto.

Fuente: Google maps, 2021.

Este proyecto aumentaría la capacidad de pasajeros hasta en 135 millones por año, además de tener mayor versatilidad aérea porque se proyecta la construcción de seis pistas paralelas independientes con capacidad de hasta 182 operaciones por hora, 313.8% más de lo que se tiene actualmente, lo que ofrece un campo de vuelos flexible, mayor adaptación a los picos de llegadas y salidas, teniendo todas las características para ser un *hub* y además sustituiría un sistema multi-aeropuerto. Este proyecto es una solución a largo plazo para resolver los problemas de capacidad del sistema aeroportuario actual, sin embargo, se suspende el 3 de enero de 2019 por el gobierno federal actual y se impulsa la ampliación del Aeropuerto de Santa Lucía y la habilitación del Aeropuerto de Toluca.

1.5 Estrategias para manejo de la capacidad en aeropuertos congestionados

La velocidad exponencial de la demanda de servicios aéreos en comparación con una lenta respuesta en la capacidad de la infraestructura de los aeropuertos del mundo (crecimiento lineal de la capacidad aeroportuaria contra el crecimiento exponencial de la oferta y demanda de servicios aeroportuarios) han incentivado otras opciones para la optimización de los recursos, tanto para la infraestructura como para planes maestros de planificación. La gestión del tránsito aéreo es una herramienta útil en el control de este y el manejo del equilibrio entre la capacidad y la demanda. Estas iniciativas de control de tránsito aéreo pueden ser desde el manejo de los programas en tierra, el direccionamiento de operaciones aéreas, la retención del transporte aéreo, hasta la restricción de millas en el camino (Chatterji et al., 2004; Brunner, 2014).

Hamzawi (1992) habla sobre la saturación de la capacidad aeroportuaria y una constante problemática de la pérdida económica por los retrasos (siendo esta la consecuencia más grave y evidente) y la política de las aerolíneas que saturan el sistema al concentrar sus vuelos en los horarios con mayor demanda. Todos estos factores reunidos podrían llevar a un posible colapso del sistema aeroportuario.

En caso de que la capacidad del aeropuerto esté limitada al número de pistas, el tránsito puede ser desviado de acuerdo con: (1) los vuelos con menor alcance entre aeropuertos secundarios, (2) tanto a clientes como a turistas ofrecerles un aeropuerto secundario a menor costo o (3) concentrar las operaciones de un operador (alianza) en una base independiente pero dentro de la región metropolitana (De Neufville, 1995).

La clave es entender las causas de la saturación del sistema:

Cuándo la demanda del servicio excede a la capacidad del sistema:

según Hamzawi (1992) comienza a ocurrir cuando se alcanza tres cuartas partes de la capacidad del sistema.

Es importante equilibrar la *demanda y capacidad*, ya sea restringiendo la demanda o aumentando la capacidad. En este contexto, Hamzawi (1992) propone cuatro estrategias para el manejo del tránsito aéreo mostradas en la figura 1.8., en la cual los conceptos del lado izquierdo representan las necesidades del aeropuerto y las relaciones de la derecha algunas de las soluciones propuestas para resolver esa necesidad.

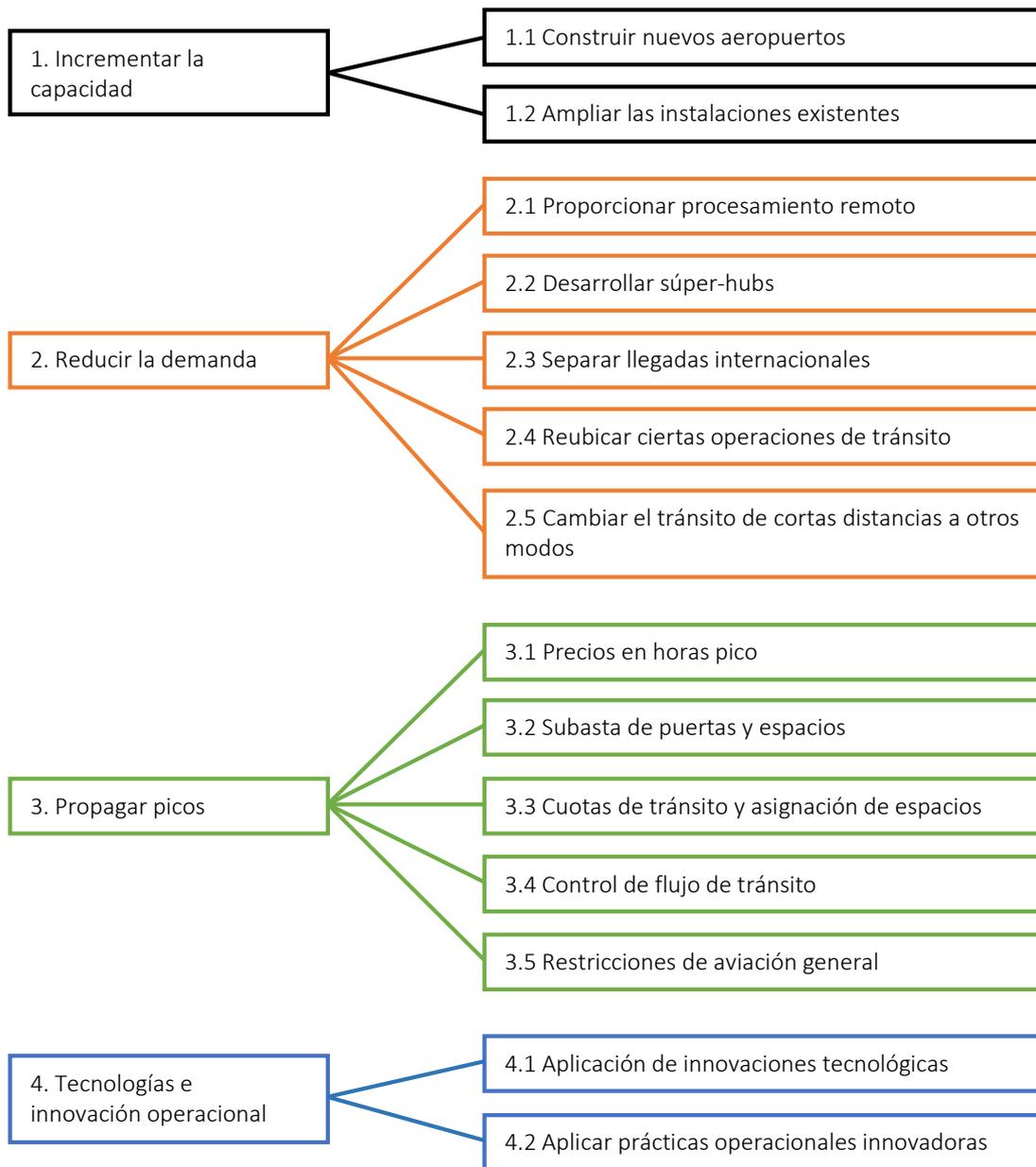


Figura 1.8. Estrategias para el manejo del tránsito aéreo

Estas estrategias buscan soluciones para todos los niveles operativos de acuerdo con las áreas de oportunidad del aeropuerto como principal *stakeholder*. Las estrategias van desde crecer las instalaciones, implementación de normas o proposiciones de desvíos de operaciones a otro aeropuerto, así como estrategias económicas que motiven a los pasajeros y aerolíneas a buscar opciones en otros horarios y la necesaria pero costosa implementación de tecnología para el control operacional.

1.6 Sistema Metropolitano de Aeropuertos

Un *sistema multi-aeropuerto* (MAS: *multi-airport system*) o “metroplex” (término empleado por Donaldson et al., 2010) de acuerdo con el autor De Neufville (1986) es un grupo de dos o más aeropuertos comerciales en una región metropolitana, entendiéndose como aeropuerto comercial aquel que maneja más de dos millones de pasajeros por año. Para Sidiropoulos et al. (2018) está definido como un grupo de dos o más aeropuertos adyacentes cuyas operaciones de llegada y salida son altamente interdependientes, justificado en un manejo de altos niveles de tránsito, pasajeros y aerolíneas (De Neufville, 1995). Para otros autores el uso del sistema multi-aeropuerto es una opción viable para la distribución del tránsito aéreo entre aeropuertos (Cohas, 1993). El sistema multi-aeropuerto en algunos casos, podría ser la única alternativa porque las restricciones de tierra no permiten más expansiones en la ubicación original (Martin et al., 2011). Bajo esta situación una red paralela de aeropuertos secundarios puede servir para el tránsito de bajo costo (De Neufville, 2005) y pueden crecer bajo nichos de mercado que sirvan a diferentes necesidades de los pasajeros. La planeación de la capacidad de los aeropuertos que pertenecen al sistema multi-aeropuerto supone más retos porque se localizan muy cerca y comparten el espacio aéreo, por lo que las decisiones deben estar coordinadas y direccionadas a minimizar las interferencias en el flujo de despegues y aterrizajes (Rocha et al., 2018).

Los aeropuertos que pertenecen al sistema multi-aeropuerto se clasifican en primarios y secundarios de acuerdo con el flujo de tránsito que manejan. Para que un aeropuerto se considere primario tiene que manejar más del 20% del tránsito total del sistema multi-aeropuerto, en cambio los aeropuertos secundarios manejarán menos del 20% del tránsito total (Bonney, 2008) y suelen ser suficientemente accesibles y económicos comparados con los primarios. El nivel de provisión para el manejo de las operaciones aéreas debe ser calibrado según la perspectiva del nivel de tránsito y la tasa de crecimiento (De Neufville, 1995) dentro del sistema de aeropuertos.

De Neufville (1995) propone características competitivas entre los aeropuertos primarios y secundarios:

- *El éxito de los aeropuertos primarios depende en gran medida de la percepción del cliente sobre el rango de destinos, la frecuencia del servicio y la confiabilidad de sus horarios. Las aerolíneas tendrán que percibir que verdaderamente tienen una ventaja competitiva frente a las aerolíneas banderas, es decir, la aerolínea nacional de cada país.*
- *El éxito de los aeropuertos secundarios se deberá en gran medida a la accesibilidad del aeropuerto para el pasajero y con niveles más altos de servicio, y las aerolíneas estarán dispuestas a utilizar los aeropuertos secundarios si se les garantiza el mercado y se les permite mantener rutas competitivas o con alta captación del*

mercado. Se sobreentiende que las aerolíneas buscarán posicionar sus vuelos en aeropuertos menos congestionados y buscarán sacar ventajas entre aerolíneas.

Para el caso del *Sistema Metropolitano de Aeropuertos de México*, la consultora MITRE (2018) señala que la coexistencia de los aeropuertos de Toluca y el de Santa Lucía sí es factible y la capacidad puede aumentar hasta 140 vuelos por hora en comparación con los 60 actuales que puede manejar el AICM (Manufactura, 2018). Estos aeropuertos tendrán limitaciones de capacidad (Rocha et al., 2018) de acuerdo con las trayectorias de vuelos; además de que necesitará la implementación de nuevas tecnologías para estudiar a detalle el espacio aéreo en función del aumento del volumen del tránsito aéreo cuando de aeropuertos cercanos se trata (MITRE, 2018). Un estudio eficiente evitará “embotellamientos”, sin embargo, toda esta integración necesitará de una cooperación conjunta de los elementos de control aéreo.

En 2003, mediante un programa para la atención de la demanda de Servicios Aeroportuarios en el centro del país, se amplía el Aeropuerto de la Ciudad de México, Toluca, Puebla, Querétaro y Cuernavaca y se conforma el Sistema Metropolitano de Aeropuertos de México. La capacidad del sistema se incrementaría a 58 millones de pasajeros por año, y se descentralizaría la demanda de servicios aéreos en distribuidores regionales (*hub*) en los aeropuertos de Guadalajara, Monterrey y Cancún (ASA, 2006; Mendoza et al., 2014); no obstante, el uso de un sistema metropolitano de aeropuertos complicaría aún más el espacio aéreo de la Ciudad de México (Valadez, 2019), por lo que no fue una solución adoptada. De acuerdo con el último plan de desarrollo aeroportuario del centro del país, se rehabilitarán las capacidades de algunos aeropuertos, todo esto pese a la complejidad del manejo del espacio aéreo.

La información sobre los sistemas multi-aeropuertos proviene principalmente de De Neufville (2016) que para entender cómo funcionan las capacidades de los aeropuertos, los clasifica como aeropuertos primarios y secundarios de acuerdo con su porcentaje de manejo de pasajeros durante el año. En la tabla 1.1 se muestran algunos sistemas en el mundo y cómo se clasifican en el año 2019.

Tabla 1.1 Sistemas multi-aeropuerto alrededor del mundo
Adaptado de Neufville, 2013

Región metropolitana	Código IATA	Nombre del aeropuerto	Tipo de aeropuerto	Tránsito de pasajeros (año 2019)	Tránsito de pasajeros en el MAS	% de tránsito compartido
Los Ángeles	LAX	Los Angeles/Int	Primario	88,068,000	113,792,000	77%
	SNA	Santa Ana	Secundario	10,656,000		9%
	BUR	Burbank	Secundario	5,984,000		6%
	ONT	Ontario	Secundario	5,500,000		5%
	LGB	Long Beach	Secundario	3,584,000		3%
Londres	LHR	Heathrow	Primario	88,900,000	186,964,000	48%
	LGW	Gatwick	Primario	46,574,000		25%
	STN	Stansted	Secundario	28,390,000		15%
	LTN	Luton	Secundario	18,000,000		9%
	LCY	London/City	Secundario	5,100,000		3%
Ámsterdam	AMS	Schiphol	Primario	71,700,000	83,334,000	86%
	EIN	Eindhoven	Secundario	9,500,000		11%
	RTM	Rotterdam	Secundario	2,134,000		3%
Buenos Aires	AEP	Newbery	Primario	12,311,326	24,129,600	51%
	EZE	Pistarini	Primario	11,818,300		49%

En la tabla 1.1 se presenta la carga operativa que tiene cada uno de los aeropuertos del sistema y la clasificación que reciben de acuerdo con esa carga, resaltando que pueden existir más de un aeropuerto primario y más de un aeropuerto secundario en el mismo sistema.

En 2019, se habló nuevamente sobre generar una red aeroportuaria que incluyera el aeropuerto de Toluca (TLC) y el de Santa Lucía (NLU, código IATA) y el AICM (FORBES, 2019), sin embargo, la propuesta de integrar el Aeropuerto Internacional de Toluca al sistema multi-aeropuerto del centro del país ya existía desde junio de 1991 y años más tarde ya comenzaba a recibir operaciones de aviación general del AICM (AIT, 2020).

En 2005, el aeropuerto de Toluca recibió una fuerte inversión por parte del Gobierno Federal para el aumento de la capacidad del edificio terminal, así como el equipamiento tecnológico de la pista de aterrizaje (GOB, 2020). En el año 2006 se inició el proyecto de ampliación con dos edificios terminales y dos años después lograría el número más alto al recibir casi 4 millones de pasajeros. Desafortunadamente, los años posteriores no han

favorecido las operaciones del aeropuerto y han disminuido drásticamente a menos de un millón de pasajeros en el 2019, como consecuencia de que las aerolíneas Interjet y Volaris, que solo operaban en este aeropuerto, trasladaron sus operaciones al AICM al salir de operación la aerolínea Mexicana de Aviación.

Las autoridades gubernamentales han retomado la propuesta de incluir TLC en una red aeroportuaria, pero para que pueda ser incorporado al sistema multi-aeropuerto se tendrá que adquirir la parte accionaria (49%) que no es federal (Dávila, 2019; Proceso, 2019), además de ofrecer mayores garantías a las aerolíneas para que trasladen parte de sus operaciones del AICM al TLC (Valadez, 2020). Con la reactivación del TLC se aprovecharía mejor la capacidad técnica del aeropuerto y se abrirían áreas de oportunidad para mayor crecimiento económico local.

1.7 Simulación

La simulación es una técnica para imitar el comportamiento de un sistema a través de un modelo que se aproximen a la realidad (Bermúdez et al., 2011), para su manipulación y análisis del comportamiento con la finalidad de describirlo, resolverlo o mejorarlo (Cantú-González et al., 2016); es decir, permite a las organizaciones estudiar sus procesos desde una perspectiva sistémica que procura una mejor predicción de ciertas situaciones (Belda et al., 2009).

Existen diversos modelos de simulación que permiten aproximar el sistema a la realidad. De acuerdo con el tipo de fenómeno que representan pueden ser: discretos, continuos, determinísticos, estáticos, con y sin retroalimentación, etc. En el caso de las operaciones aéreas se consideran fenómenos discretos porque dependen del tiempo. La simulación de eventos discretos está determinada por una secuencia de eventos que ocurre en puntos temporales aleatorios (t_1, t_2, \dots, t_n) que cambian en cierto instante y permanecen constantes el resto del tiempo (Guasch et al., 2003).

Diversos autores han utilizado las herramientas de simulación para analizar el flujo de operaciones aéreas, incluso conjuntando herramientas de simulación híbrida para la resolución de vuelos libres (John Koo et al., 1997). Hay quienes han usado métodos de visualización del tránsito para analizar el futuro de las operaciones y mejorar el rendimiento de estas para solucionar algunos problemas del transporte aéreo (Molina et al., 2014). Además, existen en el mercado un amplio número de empresas dedicadas a la simulación en tiempo real para la gestión del tránsito aéreo.

CAPÍTULO 2 ASPECTOS TÉCNICOS DE LA AVIACIÓN

Se mencionan los aspectos técnicos de la aviación, la normativa internacional, algunos métricos para la medición del rendimiento de los sistemas aeroportuarios y los principales *stakeholders* implicados.

2.1 Carta aeronáutica

De acuerdo con la OACI (2009), la carta aeronáutica es la representación de una porción de la Tierra, su relieve y construcciones, diseñada especialmente para satisfacer los requisitos de la navegación aérea. Es un mapa que refleja las rutas para las aeronaves y facilita las ayudas y los procedimientos que deben seguir los pilotos. En este caso, los órganos reguladores son la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT), Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), hoy Agencia Federal de Aviación Civil (AFAC) y los Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM).

Las cartas de navegación contienen (*las definiciones son tomadas de la OACI*):

- **aeródromos:** utilizados por la aviación civil internacional en los que pueda efectuarse una aproximación por instrumentos.



- **zonas prohibidas, restringidas o peligrosas:** correspondientes a la capa del espacio aéreo, con su identificación y límites verticales.



- **aerovías:** área de control o parte de ella dispuesta en forma de corredor para la navegación.
- **radioayudas:** para la navegación relacionada con el sistema de los servicios de tránsito aéreo, junto con sus nombres, identificadores, frecuencias y coordenadas geográficas en grados, minutos y segundos. Son sistemas electrónicos de ondas de radio y que son recogidas por la aeronave proporcionando información sobre la posición y ayuda en el desplazamiento de un lugar a otro (Bustos, 2017).



- **aerovías (AWY):** área de control o parte de ella dispuesta en forma de corredor para la navegación.



- **ruta ATS:** para vuelo en ruta que incluye los designadores de ruta, la ruta en ambos sentidos a lo largo de cada tramo de las rutas redondeadas al grado más próximo que incluye cualquier limitación y el sentido del movimiento del tránsito.



- **puntos significativos:** que no estén señalados por la posición de una radioayuda para la navegación, así como sus distancias, junto con sus nombres-claves y coordenadas geográficas en grados, minutos y segundos.
- **distancia entre puntos de notificación en AWY.**



- **VOR/DME:** los puntos de control de alcance omnidireccional (VOR) o de muy alta frecuencia (VHF), utilizados como puntos de control y referencia en las vías aéreas (FAA, 2020). Estas permiten al controlador de tránsito aéreo rastrear el avión e indicarle al piloto mediante la comunicación en tiempo real la ruta a seguir.



- **puntos de notificación:** obligatorios y facultativos.



- **rosa de los vientos:** es utilizada en algunos casos en combinación con otros símbolos de VOR, VOR/DME, por ejemplo, y representan los grados magnéticos de la tierra.



A continuación, se presentan extractos de las cartas de navegación del espacio aéreo inferior y superior de México tomando en consideración el área donde se encuentran los aeropuertos del sistema multi-aeropuerto de México.

La figura 2.1 corresponde a una porción de la carta aeronáutica del espacio aéreo superior de la Zona Metropolitana del Valle de México, para aviones grandes; la figura 2.2 representa el espacio aéreo inferior, para aviones más pequeños.

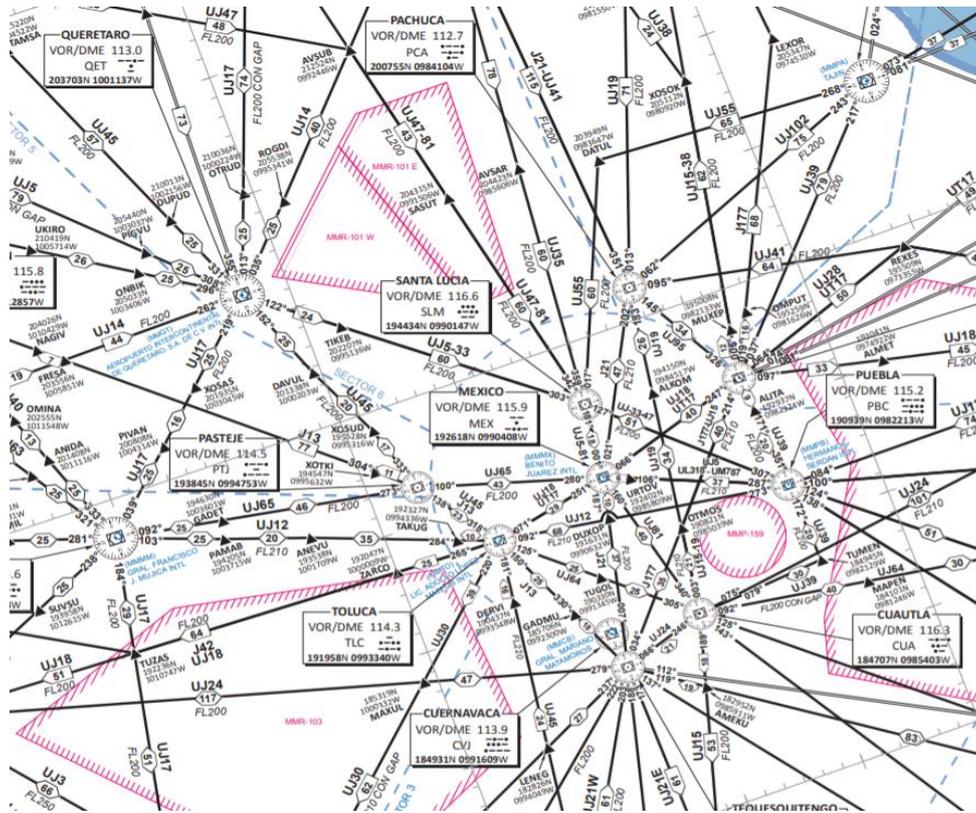


Figura 2.1 Extracto de carta de navegación en ruta del espacio aéreo superior H2.

Fuente: AIP de México, 2019

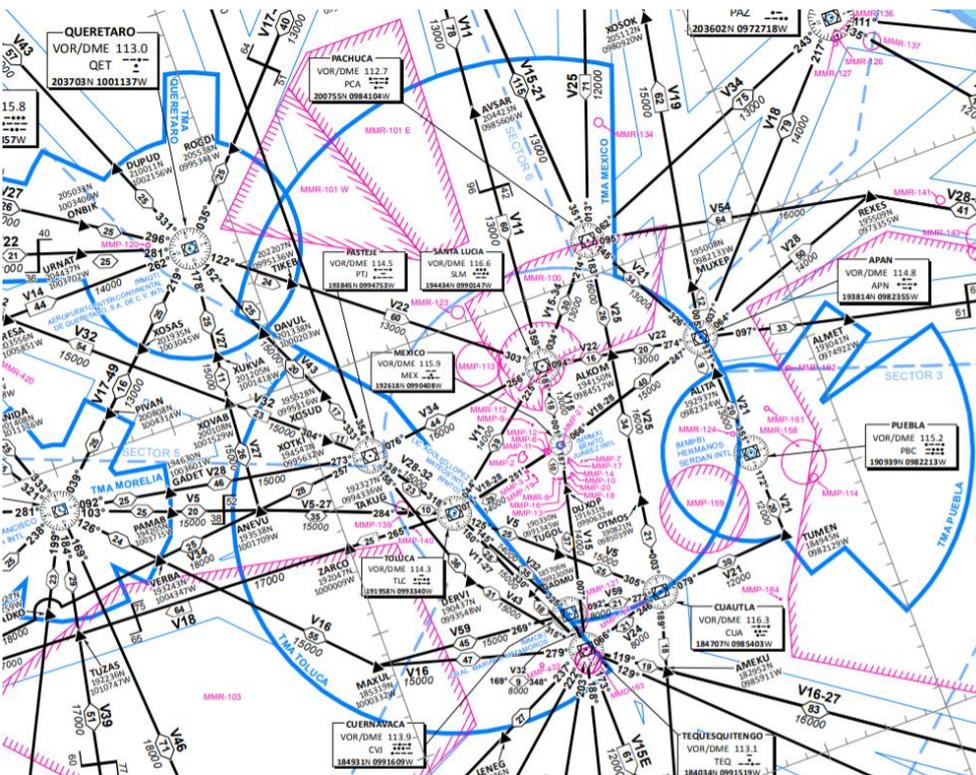


Figura 2.2 Extracto de carta de navegación en ruta del espacio aéreo inferior L2.

Fuente: AIP de México, 2019

2.2 Espacio aéreo

El espacio aéreo es aquel que se extiende tanto sobre la propia tierra como sobre el mar y que pertenece a un estado soberano propio, siendo además regulado por el propio país (Bustos, 2017). Está clasificado en espacio aéreo controlado y no controlado.

Un espacio aéreo controlado es el área donde se realizan vuelos bajo un control de tránsito. El espacio aéreo está regulado por las Reglas de Vuelo Instrumentales (IFR, por sus siglas en inglés) y Reglas de Vuelos Visuales (VFR, por sus siglas en inglés), tal como se muestran en las cartas de navegación bajo los estándares de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). El espacio aéreo restante se considera espacio aéreo no controlado (OACI, 2009) como se muestra en la figura 2.3.

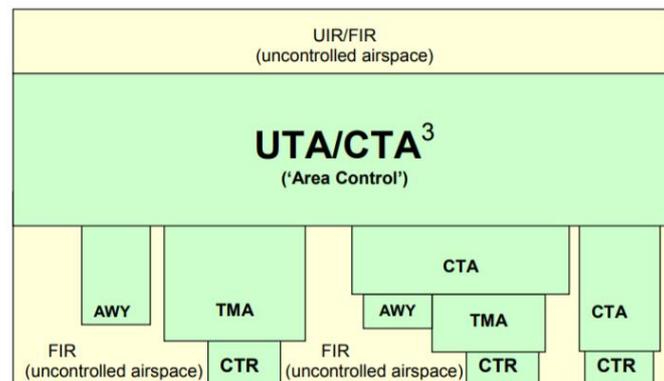


Figura 2.3 Espacio aéreo controlado y no controlado.

Fuente: Hipadrones, 2019

Un área de control, *Terminal Manoueverign Area* (TMA) o maniobra de terminal es un área de espacio aéreo controlado establecido en la confluencia de rutas de vuelo en la vecindad de un aeropuerto importante. Bustos (2017) define el TMA como la zona establecida en las inmediaciones de un aeropuerto y cuya función es contener el tránsito controlado cerca de los aeropuertos, es decir, conecta la fase de vuelo con la de aproximación. Generalmente, corresponde al área de mayor conflicto de un aeródromo, ya que las maniobras de aterrizaje se realizan principalmente a través de VFR y se requiere un estricto control aéreo para evitar cualquier tipo de incidente cuando la aeronave se acerca al aeropuerto.

El manejo del tránsito aéreo en un TMA de un sistema multi-aeropuerto es más compleja e interdependiente y limitada a los horarios de los vuelos, la capacidad del edificio terminal y la capacidad estática del espacio aéreo (Sidiropoulos et al., 2018).

La capacidad del espacio aéreo depende de la capacidad del control de tránsito aéreo en el área de control de tránsito (CTA) para la gestión de operaciones y, por lo tanto, del número de elementos en la vía aérea manteniendo una distancia segura para evitar peligros en el control de las operaciones. Esto a su vez depende del tamaño de la

aeronave: mediana, grande y pesada, de acuerdo con su peso máximo de despegue y el tamaño del vórtice o la categoría de estela (OACI, 2017; FAA, 2020). Controla las distancias de separación y/o el tiempo entre aeronaves de acuerdo con su categoría de generación de estela (tabla 2.5). Como la seguridad de todo el proceso depende del control del tránsito aéreo, es un aspecto crítico en la aeronáutica porque regula el masivo flujo de vuelos.

2.3 Métricas operativas

Los *key performance indicators* (KPI) o indicadores clave de rendimiento en el desarrollo de actividades en los aeropuertos, tiene por objetivo la medición de algunos parámetros para que puedan ser mejorable las operaciones internas. La industria de la aviación al igual que muchas otras, tiene por objetivo mejorar su eficiencia operativa. Se enlistan a continuación algunos parámetros que miden el nivel de rendimiento en los aeropuertos.

2.3.1 Niveles de saturación de un aeropuerto

Con base en la legislación mexicana en materia de aviación, la saturación aeroportuaria sucede cuando se rebasa el número máximo de operaciones o solicitudes que pueden ser atendidas en un aeropuerto, tanto en su campo aéreo, como en sus edificios terminales (Mendoza et al., 2014).

Un aeropuerto se considera saturado cuando sucede alguna de las siguientes condiciones:

- a) Cuando en el campo aéreo, en más de 52 ocasiones en el año y en una hora determinada, se rebasa el número máximo de operaciones o solicitudes que pueden ser atendidas, o se demora el aterrizaje o despegue de aeronaves.
- b) Cuando el edificio terminal, en más de 25 ocasiones en el año en una hora determinada, se registra una demanda superior al número de pasajeros que se pueden atender o se rechacen solicitudes de aterrizaje o despegue a consecuencia del número de pasajeros que pueden ser atendidos (Mendoza et al., 2014).

2.3.2 Salidas y llegadas en ruta

De acuerdo con Todorov et al. (2017) la eficiencia puede ser dividida en 7 áreas: capacidad, eficiencia de costos, eficiencia, flexibilidad, predictibilidad, seguridad y protección ambiental. La seguridad es el indicador de eficiencia más importante para la industria de la aviación.

Para medir la eficiencia aérea se considera el número de aeronaves controladas, tiempo de vuelo para vuelos controlados en horas, kilómetros recorridos por aeronaves y número de rutas proporcionadas por el servicio del control aéreo (Todorov et al., 2017). El rendimiento de un sistema de Administración de Tránsito Aéreo (ATM) debe ser comparado con el ideal para identificar correctamente las mejoras potenciales siempre en colaboración con todos los *stakeholders*, esto sabiendo que se tienen intereses interrelacionados (CANSO, 2015) y tienen metas en común. La figura 2.4 muestra las fases del vuelo de las aeronaves y la implicación en los tiempos de salida y llegada.

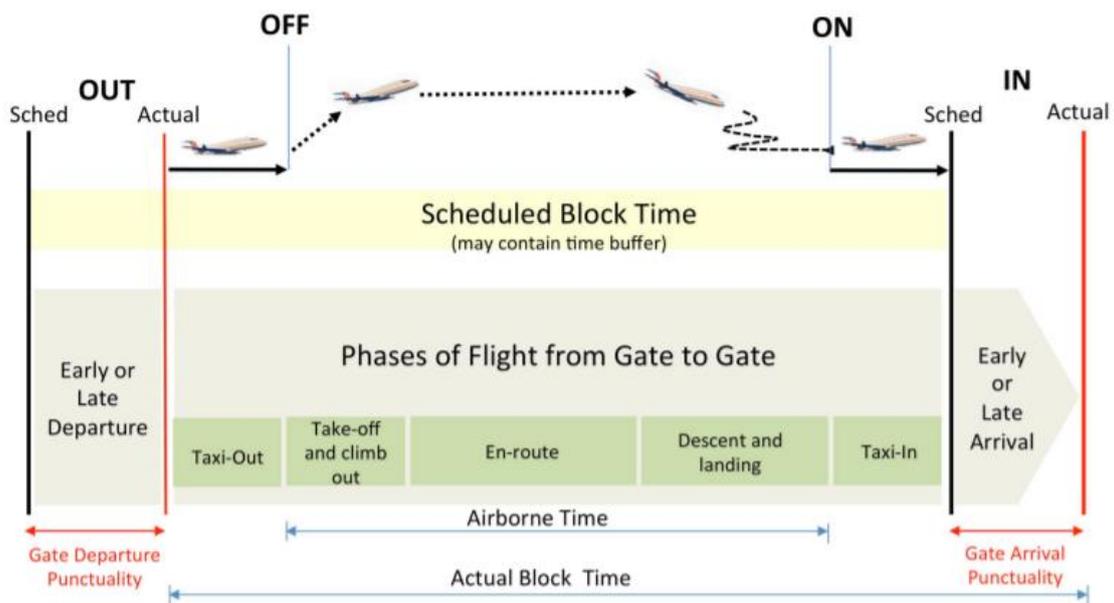


Figura 2.4 La medición del ATM.

Fuente: CANSO, 2015

Estas fases de vuelo de las aeronaves impactan en el diseño del espacio aéreo y las restricciones de separación. Con el tiempo correctamente empleado en las distintas fases de vuelo se garantiza la seguridad operativa tanto en aire como en tierra, cumpliendo también con el control aéreo tal como se muestra en la figura 2.5:

- Eficiencia de la terminal de salida (*departure terminal*: a 40 millas náuticas (nm) alrededor del aeropuerto)
- Eficiencia de la ruta (*en-route*: entre 40 nm del aeropuerto de salida y 100 nm del aeropuerto de destino)
- Eficiencia del aterrizaje (*arrival terminal*: una circunferencia de 100 nm alrededor de la pista de aterrizaje).

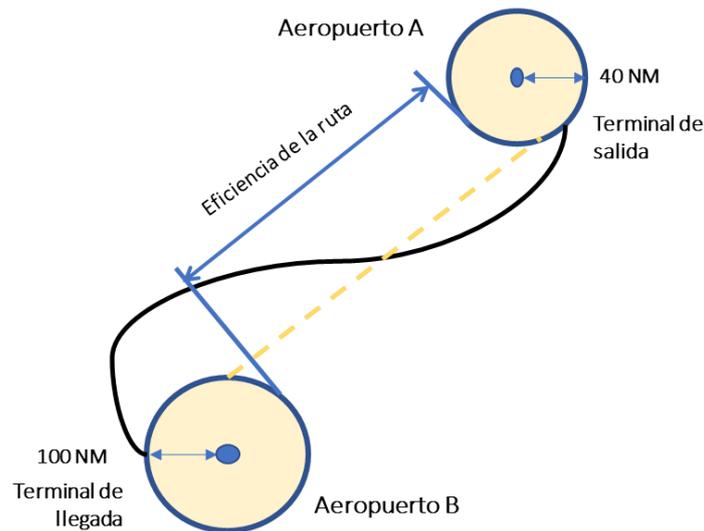


Figura 2.5 Referencia de distancia en ruta.

Adaptado de CANSO, 2015

Para el análisis del flujo aéreo se utilizan dos conceptos empleados por los controladores aéreos:

- **ATM:** es el concepto de todos los sistemas y procesos para guiar con seguridad los aviones a través del cielo y en tierra (Ehliar et al., 2016). De antemano se sabe que el 100% de seguridad solo se alcanza cuando los aviones están en tierra.
- **ATFCM** (Air Traffic Flow and Capacity Management): es la función de optimizar el flujo del tránsito aéreo a través del espacio aéreo en disputa (Ehliar et al., 2016). Es la parte estratégica más importante para conservar la seguridad, como principal objetivo del ATM.

Los conceptos anteriores reafirman las limitaciones del espacio aéreo y la complejidad operativa. En cuanto a los indicadores con mayor peso para este análisis, se consideran los mostrados en la tabla 2.2.

Tabla 2.1 KPIs de tiempos de vuelos

Obtenidos de CANSO, 2015

Salida	En ruta	Llegada
<ul style="list-style-type: none"> ● Número de aeronaves con retraso en el espacio de la terminal aérea ● Promedio de distancia entre vuelos 	<ul style="list-style-type: none"> ● Distancia entre aviones en vuelo ● Tiempo promedio de vuelo ● Distancia por vuelo 	<ul style="list-style-type: none"> ● Tiempos de ocupación de las pistas ● Trayectoria ideal por grupos de aviones

Estos KPIs son la brújula para el control aéreo en el cumplimiento de los estándares mínimos de seguridad para las aeronaves en vuelo.

2.3.3 Código de referencia aeroportuario

El código de referencia aeroportuario es una categoría de la Organización Internacional de Aviación Civil (OACI) para los aeropuertos. Estos códigos indican los tipos de aeronaves que pueden operar en él de forma ordinaria y consta de una combinación de un número y una letra (OACI, 2019).

- **Número:** hace referencia a la longitud de campo de referencia del avión o distancia de despegue, o sea la longitud mínima necesaria para el despegue con el peso máximo homologado de despegue al nivel del mar. Se considera la atmósfera tipo, sin viento y con pendiente de pista cero como se indica en el correspondiente manual de vuelo del avión, prescrita por la autoridad que otorga el certificado según los datos equivalentes que proporcione el fabricante del avión (mostrados en la tabla 2.2).

Tabla 2.2 Código de referencia aeroportuario en números

Fuente: OACI, 2019

Código (número)	Longitud de campo de referencia
1	hasta 800 m
2	de 800 m a 1200 m
3	de 1200 m a 1800 m
4	más de 1800 m

- **Letra:** se refiere a la envergadura de la aeronave y la distancia externa del tren de aterrizaje principal de la aeronave (tabla 2.3).

Tabla 2.3 Código de referencia aeroportuario en letras

Fuente: OACI, 2019

Código (Letra)	Envergadura de la aeronave	Distancia externa del tren de aterrizaje
A	hasta 15 m	hasta 4.5 m
B	de 15 m a 24 m	de 4.5 m a 6.0 m
C	de 24 m a 36 m	de 6.0 m a 9.0 m
D	de 36 m a 52 m	de 9.0 m a 14.0 m
E	de 52 m a 65 m	de 9.0 m a 14.0 m
F	de 65 m a 80 m	de 14.0 m a 16.0 m

Esta clasificación es usada para identificar a cada aeropuerto según sus capacidades infraestructurales. Si se tuviera una pista de aterrizaje de 1200 m de longitud por 48 m de ancho, se tendría un aeropuerto de clasificación 3D. Con esta clasificación es posible saber qué tipo de avión podría recibir de acuerdo con la distancia que necesita para aterrizar y despegar y la envergadura de la aeronave.

2.3.4 Separación de estela de turbulencia

Los vórtices de estela están presentes en todos los aviones. Es un fenómeno físico que se genera detrás de las puntas de las alas de grandes aviones a reacción. Los vórtices son peligrosos para el avión siguiente, especialmente en las fases de despegue, ascenso, aproximación final y aterrizaje (OACI, 2017). La OACI propone una tabla con las distancias entre aeronaves de acuerdo con el tamaño de la nave, es la estela que provocan y por lo tanto la distancia que debe conservar entre la siguiente aeronave, tal como se muestra en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Categoría de estela turbulenta

Fuente: OACI, 2017

Categoría de la aeronave		Mínima distancia de separación debido a la estela turbulenta
Aeronave precedente	Aeronave sucesiva	
	Pesada	7.4 km (4 nm)
Pesada	Mediana	9.3 km (5 nm)
	Ligera	11.1 km (6 nm)
Media	Ligera	9.3 km (5 nm)

Esta misma clasificación de aeronaves es mundial y coloquialmente se usa para clasificar las aeronaves en la operación como: ligera, mediana y pesada.

2.4 Stakeholders

Un *stakeholder* es cualquier individuo o grupo que puede beneficiarse o verse afectados por el logro de los objetivos de una organización, es un término propuesto por Richard Edward Freeman en 1984 (González, 2007). Bajo este concepto Schaar et al. (2010), propone una lista de *stakeholders* implicados en un aeropuerto junto con sus intereses y metas. A continuación, se mencionan los que se han considerado:

- Pasajeros
- Aerolíneas
- Controladores aéreos
- Usuarios de la aviación general
- Organización del aeropuerto
- Inversionistas
- Concesionarios
- Proveedores de servicios
- Empleados

- Gobierno federal
- Gobierno local
- Comunidades afectadas por las operaciones del aeropuerto
- ONGs, como cuerpos medio ambientales
- Negocios, comercio, turismo, artes, deportes y organizaciones de educación
- Operadores de estacionamiento y proveedores de transporte en tierra
- Proveedores aeroportuarios

Sin embargo, existen tres *stakeholders* decisores con una capacidad de impacto mayor al resto. Entre ellos hay una relación de poder muy relevante, ya que son principales responsables de la operación aérea; es decir, *aerolíneas, aeropuertos y controladores aéreos*.

2.4.1 Aerolíneas

Las aerolíneas son entes dedicados al transporte de pasajeros y carga de forma regular y/o por horarios. Generalmente poseen un acuerdo comercial con un grupo de clientes para su traslado de forma puntual, o bien, algunas solo se dedican al traslado de carga.

Existen diferentes clasificaciones dentro de las aerolíneas, desde aquellas que tienen participación accionaria por parte del gobierno que son llamadas “aerolíneas bandera” o “abanderadas”; las *chárter* que trasladan pasajeros y las de *carga* como ya se mencionó. No obstante, en los años recientes han surgido diferentes modelos de negocio para las aerolíneas de acuerdo con los servicios que ofrece a diferentes costos y con diferentes condiciones, desde aquellas denominadas full service carrier (FSC) o low cost carrier (LCC por sus siglas en inglés).

Las aerolíneas de bajo costo o Low-Cost Carrier (LCC por sus siglas en inglés) revolucionaron la industria de la aviación, ya que proponen un modelo de negocio simplificado, generalmente con una sola clase de servicio, asientos de alta densidad, con alimentos y bebidas a bajo costo y sin servicios de conexión (Pels et al., 2009). A diferencia de las FSC o las aerolíneas bandera, que operan en aeropuertos secundarios para poder competir contra otras FSC. Esto ha propiciado el crecimiento de las LCC desde su fase inicial de implementación como modelo de negocio viable a gran escala (Jimenez et al., 2017), sin embargo, es tan agresivo su ingreso, que pone en desventaja a otros elementos del mercado aeronáutico (Takebayashi et al., 2013), como aquellas que ofrecen un servicio intermedio o un híbrido.

Las aerolíneas LCC utilizan aeropuertos alternos o poco utilizados. Esta estrategia trae consigo diversos beneficios como: tasas aeroportuarias más bajas que en aeropuertos principales, menos congestión del tránsito aéreo porque ayuda a reducir los tiempos de escala de las aeronaves y los retrasos (Pels et al., 2009; Canseco et al., 2015) y pueden

garantizar posiciones para su tránsito de bajo costo dentro de un sistema multi-aeropuerto (Jimenez et al., 2017). A pesar de esto, las aerolíneas prefieren concentrar su frecuencia en aeropuertos *hub* porque pueden obtener mayores beneficios y rendimientos (Martin et al., 2011). En la tabla 2.5 se muestran algunas de las características de las aerolíneas de bajo costo.

Tabla 2.5 Características del producto de las aerolíneas de bajo costo y servicio completo

Adaptado de O'Connell et al., 2005

Características del producto	Bajo costo (LCC)	Servicio completo (FSC)
Marca	Una marca: tarifa baja	Extensión de marca: tarifa + servicio
Tarifas	Simplificada: estructura de tarifa	Tarifa compleja: estructura + gestión del rendimiento
Distribución	En línea y reservación directa	En línea, directa y agente de viajes
Registro	Sin boleto	Sin boleto, contrato de boleto IATA
Aeropuertos	Secundarios (mayormente)	Primarios
Conexiones	Punto a punto	Interlínea, código compartido, alianzas globales
Segmentación de clase	Una clase (alta densidad)	Dos clases (dilución de capacidad de asientos)
En vuelo	Pagar por amenidades	Complementarios extras
Utilización de la aeronave	Muy alta	Media o alta: contrato sindical
Tiempo de respuesta	25 minutos	Baja: congestión / fuerza laboral
Productos	Un producto: tarifa baja	Integración de múltiples productos
Ingresos auxiliares	Publicidad, ventas a bordo	Enfocado en los productos primarios
Aeronaves	Un solo tipo: homogéneos	Varios tipos: complejidad de programación
Asientos	Pequeños, no asignados	Generosos, ofrece asignación de asiento
Servicio al cliente	Generalmente bajo rendimiento	Servicio completo, ofrece confiabilidad
Actividades operacionales	Centrado en el vuelo	Extensiones: ej. mantenimiento, cargo

Jimenez et al. (2017), analizan la dinámica de las aerolíneas LCC de Europa, donde señalan que la mayoría de las aerolíneas (16 de 20) proporcionan una gran cantidad de asientos LCC. Esto convierte al modelo de negocio en un jugador principal del sistema multi-aeropuerto tanto para aeropuertos principales como para los secundarios, ya que por lo general los aeropuertos más pequeños no tienen la capacidad para expandirse y originalmente los aeropuertos principales no fueron diseñados para atender LCC.

Por otro lado, las alianzas de aerolíneas surgen estratégicamente como acuerdos de cooperación altamente integradas entre aerolíneas que otorgan beneficios a todos sus participantes (*stakeholders*) y que en ausencia de las alianzas no serían posibles debido a las limitaciones de las leyes nacionales o los acuerdos bilaterales (Air Service Agreement Liberalisation and Airline Alliance, 2014). Las aerolíneas necesitan pertenecer a una

alianza para generar mayores beneficios para sus pasajeros y ofrecer mayores combinaciones de itinerarios. Los acuerdos bilaterales típicos incluirán consenso sobre cuestiones tales como las aerolíneas designadas, las rutas voladas, los tipos de derechos de tránsito otorgados para las líneas aéreas designadas, la frecuencia de vuelos y capacidades y tarifas (Agusdinata et al., 2002). La mayoría de las alianzas de aerolíneas se basan en ruta y también pueden presentar acuerdos con aspectos relacionados a la venta, marketing, compras, seguros, abastecimiento, asistencia en tierra y mantenimiento de aeronaves (Morrish et al., 2002).

La formación de las alianzas se logra porque las aerolíneas necesitan ofrecer servicios a una mayor gama de destinos alrededor del mundo (Oum et al., 1997), además de que pueden alimentar su tránsito y aumentar la oferta para el cliente aumentando su capacidad para trasladar pasajeros. Se logra un mayor beneficio económico al disminuir los costos de operación, mantenimiento, compras, aprovisionamiento de combustible, manejo de equipaje y desarrollo de software. Al realizar las acciones de forma conjunta se maneja una economía de escala que provee mayor rendimiento para los participantes (Oum et al., 1997), pues crece el itinerario de destinos para el pasajero y aumenta la calidad del servicio cuando hay mayor disponibilidad de vuelos; es decir, crece la densidad de trabajo y se abaratan los costos.

La ola de alianzas que se dieron a finales de 1990 y principios del 2000 fueron con el objetivo de lograr eficiencias y mayores sinergias en las colaboraciones (Li et al., 2010) y surgieron con el propósito de crear valor (Casanueva et al., 2014). Las alianzas ayudan a soportar el mercado, que, en conjunto con sus socios, son capaces de disminuir los impactos de las variaciones (Agusdinata et al., 2002). Una alianza no es una fusión (Li et al., 2010), pero una alianza si refuerza la estrategia comercial y solidifica el mercado de los socios pertenecientes, sin embargo, la competencia entre socios se mantiene.

Algunas de las ventajas de que las aerolíneas pertenezcan a una alianza, pueden ser:

- La simplificación de las operaciones, desde la transferencia de equipaje, emisión de boletos, procedimientos para la facturación, coordinación de horarios, etc. (Agusdinata et al., 2002).
- Las alianzas son más flexibles que las fusiones de aerolíneas (Agusdinata et al., 2002) y tienen mejor respuesta ante las turbulencias del mercado.
- Dispone de mayores recursos financieros para invertir en los proyectos bilaterales.
- Costos y economías de escala a través de la agrupación de recursos en áreas operativas o centros de costos, tal como son las ventas, mercadotecnia, compras, instalaciones en estaciones y en tierra (Morrish et al., 2002).

- Acceso a nuevos mercados haciendo uso de los derechos de ruta de otros socios.

El beneficio de las alianzas ha sido mayormente para los consumidores con la reducción de las tarifas y tiempos. Además, en las conexiones de viaje facilitan las operaciones de manejo de equipaje, así como la facturación, emisión de boletos, horarios, mayor número de destinos con tarifas más bajas (Air Service Agreement Liberalisation and Airline Alliance, 2014); es decir, los privilegios se pueden compartir, pero las estrategias deben estar alineadas.

En 2002 surgieron cuatro grupos llamados: Star Alliance, One World Alliance, Sky Team Alliance y Qualiflyer Group, (Morrish et al., 2002), y desde el año 2016, Qualiflyer Group ya no figura como alianza (Quirós, 2016). Las aerolíneas asociadas actuales se presentan en la tabla 2.6.

Tabla 2.6 Alianzas y aerolíneas pertenecientes

Fuente Páginas oficiales de las alianzas

Star Alliance (26)	Aegean, Air Canada, Air China, Air India, Air New Zealand, ANA, Asian Airlines, Austrian, Avianca, Brussels Airlines, Copa Airlines, Croatia Airlines, Egypt Air, Ethiopian, Eva Air, Polish Airlines, Lufthansa, SAS, Shenzen Airlines, Singapore Airlines, South African Airways, Swiss, Air Portugal, Thai, Turkish Airlines, United.
One World Alliance (15)	American Airlines, British Airways, Cathay Pacific, Finnair, Iberia, Japan Airlines, LATAM Airlines, Malaysia Airlines, Qantas, Qatar Airways, Royal Jordanian, S7 Airlines, SriLankan Airlines, Fiji Airways, Royal Air Maroc
Sky Team Alliance (19)	Aeroflot, Aerolíneas Argentinas, AeroMexico, AirEuropa, AirFrance, Alitalia, China Airlines, China Eastern, Czech Airlines, Delta, Garuda Indonesia, Kenya Airways, KLM, Korean Air, MEA, Saudia, TAROM, Vietnam Airlines, XiamenAir.
No alianza	El resto de las aerolíneas

En el año 2018, *StarAlliance* manejó el 21.9% del tránsito aéreo, lo siguió *SkyTeam* con 18.8% y en último lugar *OneWorld* con 15.4% (IATA, 2019). Estos datos están representados en la figura 2.6.

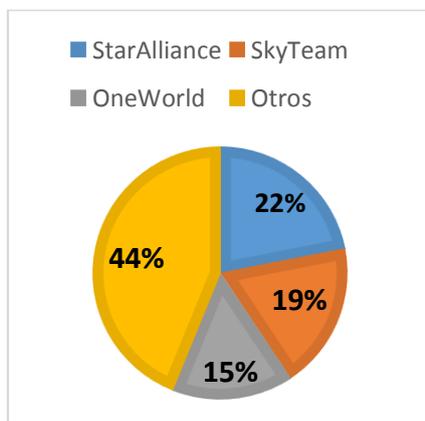


Figura 2.6 Tránsito aéreo mundial 2018 por alianza IATA 2019

La fuerza motriz de las alianzas es mantener y aumentar los beneficios para todos sus miembros. Bajo este concepto Casablanca et al. (2014) habla sobre la capacidad de movilización de las alianzas para un uso eficiente de los recursos obtenidos por la interrelación organizacional de los *stakeholders* o tomadores de decisiones (aerolíneas, controladores aéreos y aeropuertos) y que al final se ve condicionada por la habilidad de la empresa “know-how” para la movilización de los recursos de la red. La congestión aeroportuaria amenaza la estabilidad de cualquier grupo de alianzas, ya que los aeropuertos centrales congestionados junto con las alianzas provocan situaciones dominantes frente a los competidores. Esto pone en peligro la existencia equilibrada de la competencia (Agusdinata et al., 2002), por ello es importante controlar la demanda en los diversos aeropuertos.

2.4.2 Aeropuertos

De acuerdo con Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) un aeropuerto cuenta con las instalaciones y servicios adecuados para la recepción y despacho de aeronaves, pasajeros, carga y correo del servicio de transporte aéreo regular, del no regular, así como del transporte privado comercial y privado no comercial. Este espacio es el encargado de gestionar las operaciones en tierra y brindar la infraestructura para la aeronave y pasajeros.

Como agente principal de las operaciones aéreas, en él recaen las responsabilidades para mejorar las condiciones de recepción y envío de aviones, la logística del control aéreo y la coordinación de los esfuerzos para brindar el confort necesario para los pasajeros de acuerdo con las normas internacionales de seguridad en aviación.

2.4.3 Controlador aéreo

El controlador aéreo es quien administra los vuelos y garantiza la seguridad del tránsito aéreo y vigila los vuelos en ruta. Está bajo la dirección de Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM) que es el organismo gubernamental que controla el tránsito aéreo de todo el país. Tiene la función operativa de más alto nivel, al tener que gestionar los vuelos y garantizar la seguridad de los aviones durante el despegue, vuelo y aterrizaje. Trabajan de la mano con los aeropuertos y aerolíneas, propiciando el cumplimiento de la normativa de vuelo, logra un conjunto de fuerzas que tienen el mismo objetivo (ver la figura 2.7).



Figura 2.7 Diagrama de relación de stakeholders

Estas tres fuerzas interdependientes, conforman la parte estratégica en la toma de decisiones del desvío de tránsito aéreo, donde cada uno de los elementos vela por sus intereses, pero también puede lograr un convenio para adoptar beneficios propios o para el resto de los *stakeholders* y lograr un ganar-ganar.

2.4.4 Clasificación del pasajero

El pasajero es la entidad receptora del servicio que busca moverse de forma conveniente y rápidamente, con amplia seguridad en su viaje y a tarifas bajas (Schaar et al., 2010). La perspectiva del pasajero es una visión condicionada a sus necesidades, por esto se clasifican a los pasajeros de acuerdo con sus necesidades:

- **Local:** quienes viajan a casa o al lugar de residencia de su familia nuclear, porque viven en otro lugar y se trasladan eventualmente durante período vacacional.
- **De negocios:** tienen destinos frecuentes a sitios corporativos o centralizados.
- **Turismo:** aquel que viaja de forma esporádica, generalmente toma su decisión con base en el precio buscando la tarifa más baja a sitios turísticos comunes.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

El desarrollo de este tema de investigación se basó en metodologías de simulación porque permite el planteamiento hipotético de los escenarios posibles, además evalúa la eficacia y eficiencia del modelo propuesto previo a la implementación en el sistema real. Los 10 pasos seguidos para este proyecto se expresan en la figura 3.1.

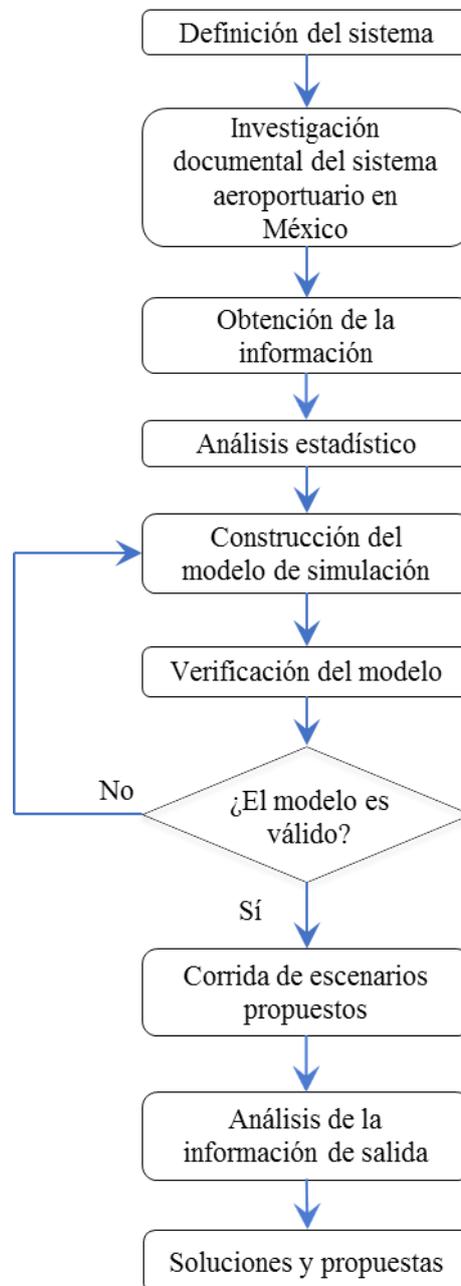


Figura 3.1 Diagrama de la metodología propuesta

Cada uno de los pasos seguidos se describe a continuación.

3.1 Definición del sistema

La definición del sistema considera la descripción del sistema, la justificación, los límites del sistema, el alcance y la proyección.

En este paso se define la composición del sistema multi-aeropuerto que cubra la demanda aérea actual y futura. Contiene en sí una lógica: tomar los aeropuertos más cercanos al aeropuerto central, tal como se muestra en la tabla 3.1.

*Tabla 3.1 Aeropuertos más cercanos al Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México
Fuente: flightradar, 2019*

Aeropuertos más cercanos al MEX	Distancia
Santa Lucía (NLU)	33 km
Toluca (TLC)	53 km
Cuernavaca (CVJ)	70 km
Puebla (PBC)	80 km
Querétaro (QRO)	175 km

De acuerdo con los datos anteriores, se tendrían que considerar al menos tres aeropuertos; no obstante, otros factores externos e iniciativas del gobierno federal condicionarán la elección de los aeropuertos secundarios.

3.2 Investigación documental

La investigación documental cubre las fuentes diversas para la obtención de datos y la organización de la información.

De acuerdo con el número de aeropuertos ya existentes alrededor de la Ciudad de México y la necesidad de liberar la saturación del aeropuerto de la Ciudad de México, se toma la propuesta 2.4 de Hamzawi (1992) *Reubicar ciertas operaciones de tránsito (citar el apartado 1.3)* para atomizar el tránsito aéreo que llega a la Ciudad de México. Con esta opción se podría reubicar parte de las operaciones aéreas hacia otros aeropuertos y, haciendo uso de un sistema multi-aeropuerto, seguir aumentando el número de operaciones hacia la Ciudad de México, sin requerir una inversión económica en infraestructura, pero si incentiva la utilización de otros aeropuertos alternos y el aprovechamiento al máximo de los recursos ya instalados.

De acuerdo con las estrategias que propone el autor Hamzawi (1992) de la figura 1.8 se analizan las ventajas y desventajas para las propuestas en el caso de la Ciudad de México (MEX).

1. Se pueden reubicar las operaciones comerciales (nacionales e internacionales) en los aeropuertos cercanos
 - a. **Ventajas:** aumenta el nivel de servicio para el pasajero y se separan las operaciones de aduana y control de seguridad
 - b. **Desventajas:** los pasajeros se verán obligados a aterrizar en aeropuertos no por elección propia, sino de acuerdo con la situación del pasajero local o comercial.
2. Las aerolíneas también pueden ser reubicadas (forzadas por políticas o incentivos) a otros aeropuertos menos saturados
 - a. **Ventajas:** se quedan en el aeropuerto principal las aerolíneas más competitivas
 - b. **Desventajas:** las aerolíneas más pequeñas se verán desplazadas a aeropuertos más lejanos y esto podría llevarlas a desaparecer.
3. Se pueden crear nuevos motivos al cliente (atracciones, plazas, precios) en el destino alternativo, para que lo elija por encima del resto
 - a. **Ventajas:** incentivo económico en otros destinos económicos
 - b. **Desventajas:** no asegura que los clientes prefieran otro destino, además es necesaria una fuerte inversión económica. Este tipo de operaciones representan menos del 5% del número total, por lo que tiene un bajo impacto.
4. Restringir la disponibilidad para las operaciones de aviación general (de particulares, empresas o aviación pequeña) o enviarlos a otro aeropuerto
 - a. **Ventajas:** mayor aprovechamiento de la capacidad aérea; es decir, recibir mayor número de operaciones
 - b. **Desventajas:** pérdida económica de las operaciones particulares y disminución del nivel de servicio al pasajero.

No obstante, las estrategias conllevan las necesidades e intereses de los *stakeholders*, que para este estudio no serán profundizadas. La intención de elegir este modelo de Hamzawi (1992), es porque promueve el uso de los recursos ya instalados en los aeropuertos alternos, esto sin aumentar la capacidad del aeropuerto y que permite la utilización óptima del espacio aéreo. Se utiliza el concepto de *atomización del tránsito aéreo* para denominar la descentralización de las operaciones en el aeropuerto de la Ciudad de México y desviar parte del tránsito a aeropuertos locales alternos, en este caso los que pertenecen al sistema multi-aeropuerto.

La información recopilada proviene de las diversas fuentes: páginas oficiales de los aeropuertos, revistas de aviación y de organismos internacionales que regulan la aviación en el mundo. En esta sección, se analizaron las características de los aeropuertos del sistema multi-aeropuerto, también ya se toma en consideración al NLU, siendo

actualmente parte del proyecto federal del período gubernamental (2018-2024). La figura 3.2 representa esquemáticamente la localización de los aeropuertos respecto al MEX y en concordancia con la OACI (2013) la dirección de sus pistas de aterrizaje.

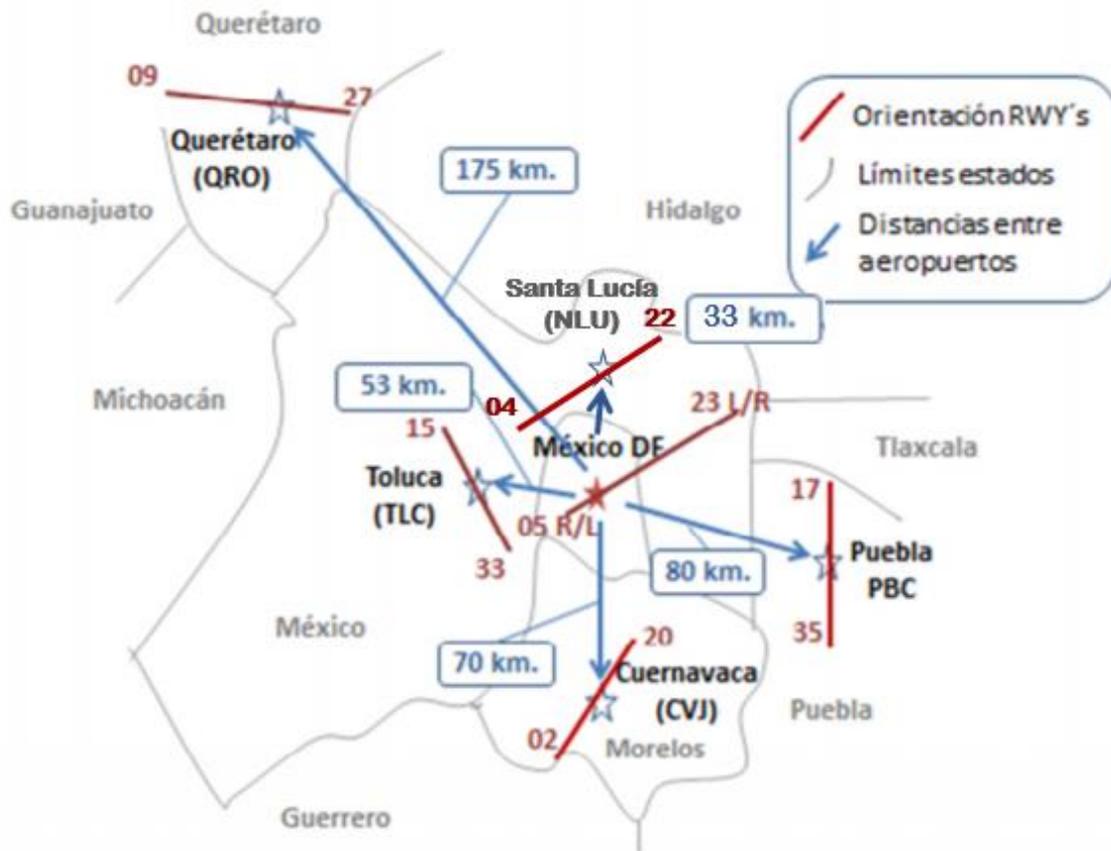


Figura 3.2 Ubicación de los aeropuertos del Valle de México, distancias y direcciones de pista.

Adaptado de OACI, 2013

Esta figura formó parte fundamental de la estrategia para la configuración de los escenarios propuestos en el modelo de simulación, porque señala la cercanía de los aeropuertos de acuerdo con su distribución geográfica.

La combinación actual de aeropuertos cercanos a la Ciudad de México muestra una serie de posibilidades para el desvío de ruta de acuerdo con el TMA mostrados en la figura 3.3, donde se señala las posibilidades de desvío según las características de las operaciones entre los aeropuertos, aeronaves y las alianzas.

La estrategia 4 de Hamzawi (1992) se aplicó en el AICM mediante el DECRETO presidencial “que establece el cierre del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México Benito Juárez a partir del 1° de junio de 1994, para las operaciones de aeronaves que se indican” se ordenó el cierre de las operaciones en el AICM a la aviación privada, la aviación de estado y las operaciones de taxi aéreo.

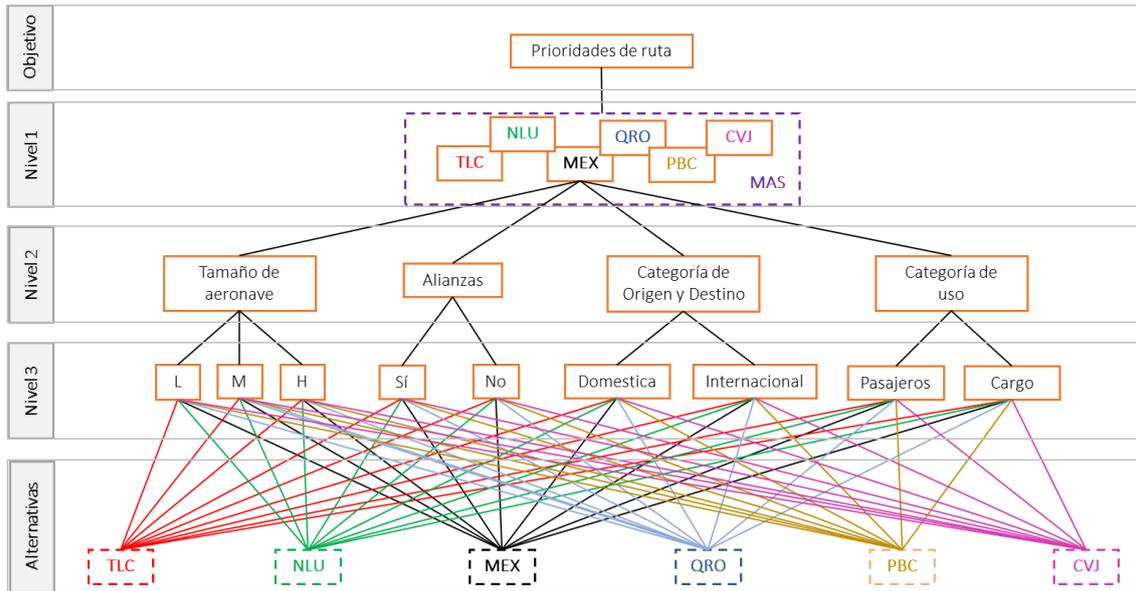


Figura 3.3 Esquema para el criterio de desvío de ruta en el TMA del sistema multi-aeropuerto propuesto.

Adaptado de Sidiropoulos et al., 2018

Este diagrama de relaciones representa las múltiples opciones con las que cuenta el sistema aeroportuario de México para el desvío de tránsito aéreo tomando en consideración cinco aeropuertos cercanos a la Ciudad de México y el mismo aeropuerto de la Ciudad de México. Estas consideraciones van desde el tamaño el avión, la relación de las aerolíneas y alianzas, la clasificación del vuelo como doméstico o internacional, hasta saber si lleva pasajeros o carga. Con base en las relaciones anteriores, se conocen las diversas combinaciones operacionales y la posibilidad de desvío se justifica en diversos niveles.

3.3 Obtención de la información

La obtención de la información comprende la organización y la presentación de los datos para su futuro análisis.

Una vez que se tiene la información sobre las características de los aeropuertos, se mencionan cada uno de los que se han propuesto para el sistema multi-aeropuerto y se obtiene la información técnica de sus operaciones, capacidad de la pista de aterrizaje, número de puertas para recepción de pasajeros, las características de su edificio terminal, cercanía con la Ciudad de México, así como aspectos técnicos para el control aéreo, estos mostrados en la tabla 3.3.

3.3.1 Sistema multi-aeropuerto de México

El Sistema de Aeropuertos Metropolitanos incluye los aeropuertos de la Ciudad de México, Toluca, Cuernavaca, Puebla y Querétaro, y recientemente se ha considerado la integración de Santa Lucía, por lo que se presenta también en la tabla 3.2. Esta tabla comparativa muestra las características operativas de los aeropuertos, desde su código IATA, la distancia al aeropuerto de la Ciudad de México, la configuración de la pista de aterrizaje, la capacidad de pasajeros, el número de puertas de embarque o posiciones para aviones y el avión crítico; es decir, el tamaño máximo de aeronaves que puede recibir en su pista de aterrizaje.

Tabla 3.2 Características de los aeropuertos del sistema multi-aeropuerto

	Cuernavaca	Puebla	Querétaro	Toluca	Santa Lucía*	AICM
Código IATA	CVJ	PBC	QRO	TLC	NLU	MEX
Código OACI	MMCB	MMPB	MMQT	MMTO	MMSM	MMMXX
Distancia a MEX (km)	110	103	213	68	-	0
Uso principal	Servicios generales	Comercial, industrial y servicios especiales	Comercial e industrial	Comercial	-	Comercial, industrial, carga y servicios especiales
Capacidad (pas/h)	240	450	400	1,850	-	-
Capacidad de la pista (ops/h)	14	20	45	36	-	61 (Herrera García, 2012)
Longitud de la pista (m)	2,800	3,600	3,500	4,200	P1: 5,100 P2: 4,600*	P1: 3,985 P2: 3,730
Ancho de la pista (m)	45	45	45	45	75	P1 y P2: 45
Material de la pista	Asfalto	Asfalto	Concreto	Asfalto	-	-
Dirección de la pista de aterrizaje	02/20	17/35	09/27	15/33	04/22	P1: 05R/23L P2: 05L/23R
No. de posiciones	3	6	24	15	-	95
Avión crítico	Boeing 737 o A320	Antonov An 124-100	-	-	-	A380 o 2 B373
No. de aerolíneas operando	-	7	8	2	-	35

*Primera fase de construcción

La tabla 3.2 proporciona las especificaciones de los aeropuertos incluidos en la simulación y es el punto de partida para conocer la capacidad de los aeropuertos y el flujo de cada uno de ellos en el modelo de simulación. Estos parámetros son importantes dentro del aeropuerto, porque así se sabría qué aeronaves son las que podría recibir y la capacidad máxima para pasajeros. A continuación, se analizan las características específicas de cada aeropuerto, como la localización geográfica, el tipo de aeropuerto y el número de operaciones aéreas (tabla 3.3).

Tabla 3.3 Características específicas de los aeropuertos

	AICM	NLU	QRO	TLC	PBC	CVJ
Localización	19°26'10"N 99°04'19"O	19°45'24"N 99°00'55"O	20°37'20"N 100°11'18"O	19°20'13"N 99°33'57"O	19°09'29"N 98°22'17"O	18°50'06"N 99°15'43"O
Altitud	2,230 msnm	2,245 msnm	1,969 msnm	2,580 msnm	2,241 msnm	1,304 msnm
Espacio de edificio terminal (m²)	T1: 548,000 T2: 242,000	-	5,241	28,300	6,800	1,200
Tipo de aeropuerto	Público/Militar	Militar	Público	Público	Público	Público
Núm. de operaciones 2019	460,245	-	54,698	84,723	19,723	25,188
Número de pasajeros 2019	50,304,011	-	1,175,000	689,001	761,575	3,889
Carga manejada (ton) 2019	556,142	-	50,813	35,779	842	-

La tabla 3.3 proporciona la estadística del número de pasajeros que ha manejado cada aeropuerto en el año 2019 (los datos del año 2020 no son adecuados para este estudio por ser un año atípico debido a la epidemia). A continuación, se mencionan las características recopiladas de la información avanzada de pasajeros (API, 2019).

3.3.2 AICM, CDMX

El *Aeropuerto Internacional Benito Juárez de la Ciudad de México (código IATA MEX)* o también conocido como *Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México*, es el aeropuerto más importante de toda América Latina.

En 1939 se inauguró el puerto Aéreo Central de la Ciudad de México para la aviación civil, en los siguientes 20 años se hicieron ampliaciones sustanciales a las instalaciones, desde torres de control, pista de aterrizaje, edificio terminal, etc., hasta oficialmente ser denominado en 1963 como "Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México". La última modificación fue en el año 2006, e incluye la ampliación para aumentar la capacidad a 32 millones de personas en 2 terminales (AICM, 2020).

La infraestructura del aeropuerto consta de:

- 2 terminales
- 33 posiciones de contacto en terminal 1
- 23 posiciones de contacto en terminal 2
- 32 posiciones remotas en terminales 1 y 2

Cuenta con dos pistas de aterrizaje paralelas separadas por 305 m, lo que impide que se puedan utilizar de forma simultánea. Las operaciones se realizan de forma diferida, generalmente aprovechando una pista para aterrizaje y otra para despegue con un minuto de espera entre operaciones.

El aeropuerto de la Ciudad de México es la piedra angular de la aviación en México, la capacidad máxima declarada es de 61 operaciones por hora (SCT, 2016), el aeropuerto presenta una saturación operativa y del espacio aéreo debido a que no puede crecer en el espacio físico. En él operan 27 aerolíneas de pasajeros y 13 de carga.

El aeropuerto cuenta con hoteles, restaurantes, transporte, servicios médicos y bancarios, además de oficinas de turismo y dependencias gubernamentales.

A continuación, se muestra el plano del aeródromo (figura 3.4).

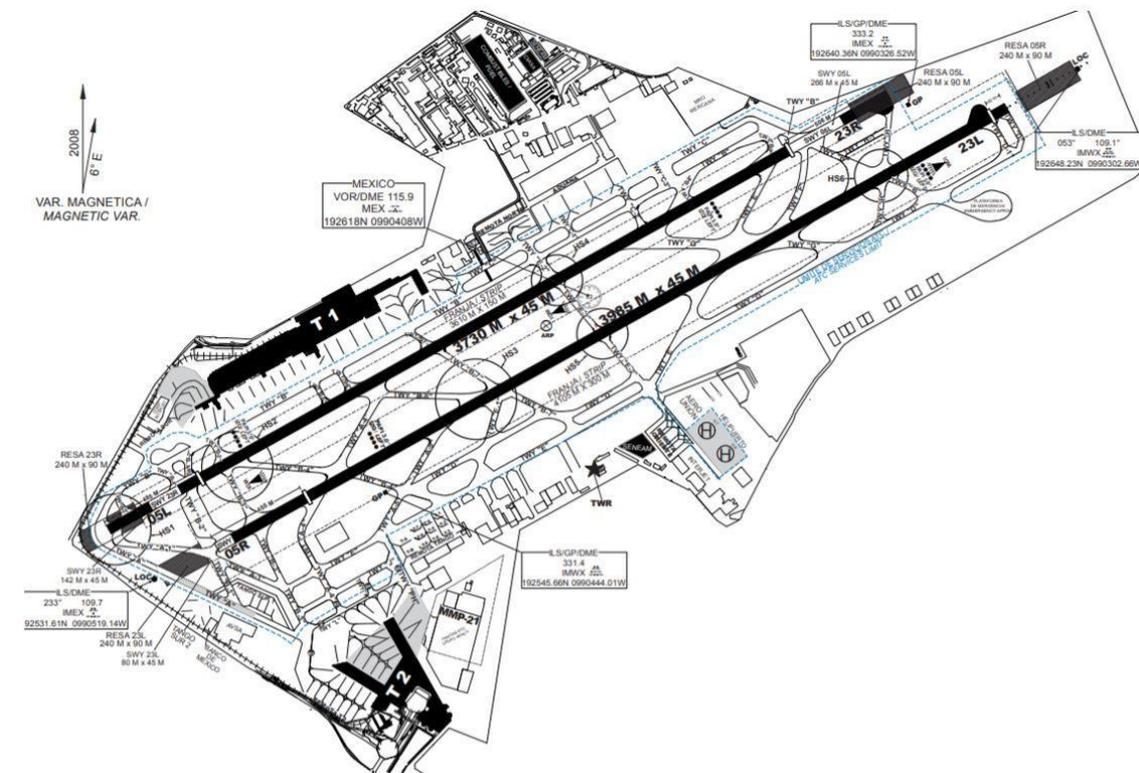


Figura 3.4 Plano de aeródromo MEX

3.3.3 Cuernavaca, Morelos

El *Aeropuerto Internacional de Cuernavaca Mariano Matamoros*, mejor conocido como el Aeropuerto de Cuernavaca, se encuentra a 16 km de la ciudad de Cuernavaca, Morelos.

El aeropuerto de Cuernavaca inició sus operaciones en 1988 auspiciado por el Gobierno del Estado y cuatro años más adelante pasó a ser de una concesionaria entre gobierno federal, estatal e iniciativa privada. Cuenta con una terminal aérea capaz de atender hasta 70 mil pasajeros anuales y apenas en el año 2015 tuvo una inversión millonaria para su modernización.

La altitud del aeropuerto (1,280 msnm) se encuentra debajo del promedio del centro del país, esto puede ser un área de oportunidad en la reducción de costos de operación para aeronaves de gran tonelaje, sobre todo si se considera que se localiza a poco más de una hora de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), además de tener mejores condiciones climáticas, sin embargo, el largo de la pista y la proximidad de un cerro limitan las operaciones de aviones de gran envergadura.

Los servicios de hoteles, restaurantes, servicios médicos y bancarios son remotos, todos se encuentran a mínimo 3 km de la ciudad más próxima y 16 km de la ciudad de Cuernavaca. Cuenta con servicio de taxis y autobuses en horarios comerciales para el traslado de los pasajeros. Se muestran algunos detalles de su pista de aterrizaje en la figura 3.5.

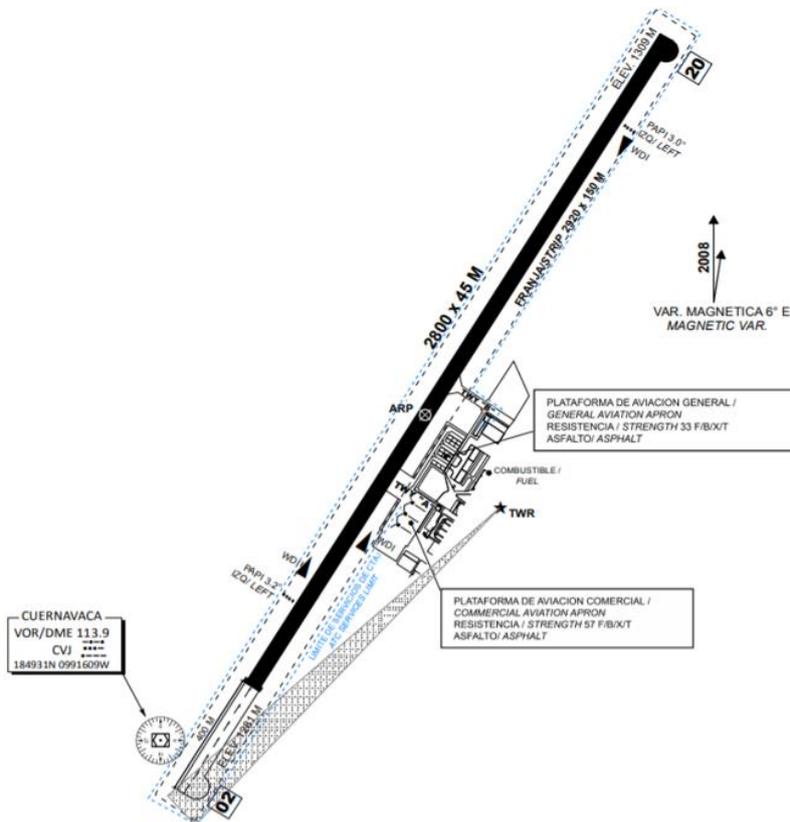


Figura 3.5 Plano de aeródromo CVJ

3.3.4 Puebla, Puebla

El *Aeropuerto Internacional Hermanos Serdán* o también conocido como Aeropuerto Internacional de Puebla, se encuentra ubicado a 25 km del centro de la ciudad de Puebla, en el municipio de Huejotzingo. Actualmente es operado por Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA).

Fue inaugurado el 18 de noviembre de 1985 y en el año 2011 tuvo una remodelación de su edificio terminal, incrementando la capacidad de pasajeros a 450 por hora y añadiendo tecnología a sus procesos.

La infraestructura del aeropuerto consiste en:

- 1 terminal
- 6 posiciones en plataforma categoría D

La cercanía del volcán Popocatepetl hace que sus operaciones puedan verse afectadas de forma temporal por la actividad que pueda presentar el mismo, ya que por seguridad no se puede volar cuando hay cenizas en el aire, no solo por visibilidad, sino por el riesgo de daño a las turbinas.

Los servicios de hoteles, restaurantes, bancarios y de turismo se encuentran en las ciudades próximas (Puebla, Cholula y Huejotzingo), sin embargo, cuenta con servicios médicos y servicio de taxis para el traslado de pasajeros. Se observa en la figura 3.6 la vista esquemática del aeropuerto.

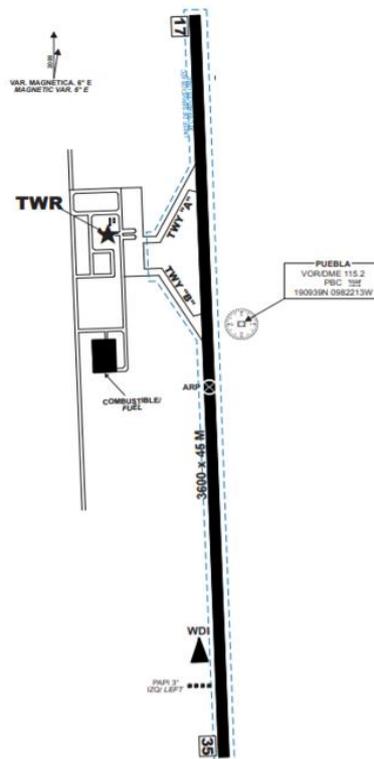


Figura 3.6 Plano de aeródromo PBC

3.3.5 Querétaro, Querétaro

El *Aeropuerto Intercontinental de Querétaro* está localizado a 25 km de la ciudad de Querétaro, entró en operaciones en el año 2004 y es capaz de recibir hasta 45 operaciones por hora o 390 pasajeros por hora. Las características de su pista le permiten recibir hasta aviones Boeing 747-400, siendo uno de los aviones más grandes en el mercado comercial.

El diseño del aeropuerto fue pensado mayormente como destino de cargo, por lo que cuenta con una zona de carga para manejar hasta 57 mil toneladas anuales.

La infraestructura del aeropuerto consiste en:

- 1 Terminal
- 18 posiciones de carga de aviación comercial y general

Actualmente en el aeropuerto operan siete aerolíneas con destinos nacionales e internacionales: TAR, Volaris, Aeromexico, American Airlines; y tres aerolíneas de cargo: FedEx Express, DHL Express y Lufthansa Cargo.

Los servicios de hoteles se localizan en la ciudad de Querétaro, no obstante, cuenta con restaurantes, renta de autos y taxis, atención de primeros auxilios, ATMs en el aeródromo, así como internet banda ancha en el edificio terminal. En la figura 3.7 se muestra el plano del aeropuerto.

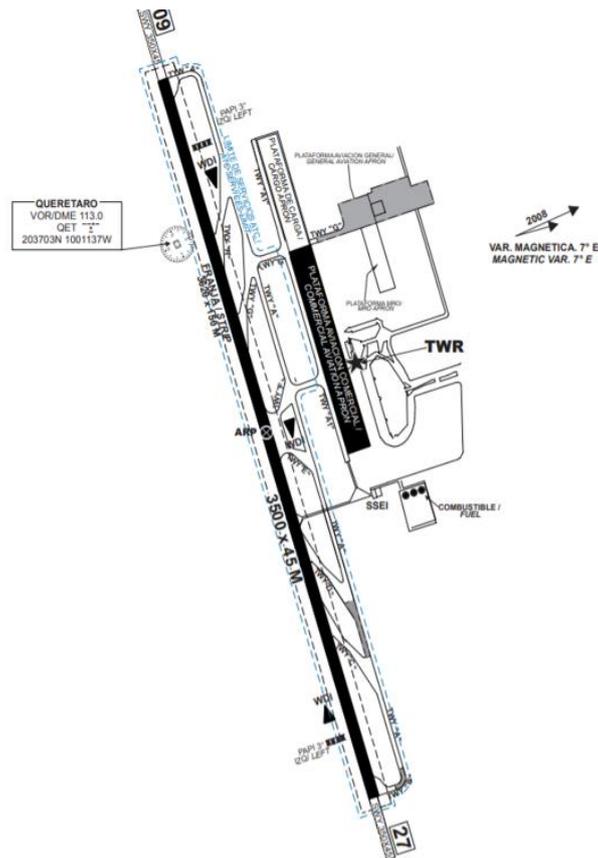


Figura 3.7 Plano de aeródromo QRO

3.3.6 Santa Lucía, Estado de México

El Nuevo Aeropuerto Internacional de Santa Lucía “Felipe Ángeles” es una re-estructuración de la actual base militar de Santa Lucía localizado en el municipio de Zumpango, a 45 km de distancia del aeropuerto actual. Este aeropuerto es la solución a los problemas de saturación del MEX.

El proyecto incluye una pista de 5.1 km y otra de 4.6 km, con una terminal de 33 posiciones de contacto, esto como arranque, sin embargo, es la primera parte de la obra la que tendrá la capacidad de recibir 20 millones de pasajeros y que pretende abarcar 62 hectáreas como proyecto final (López Obrador, 2019). En la figura 3.8 se puede observar la configuración del aeropuerto en el terreno disponible.

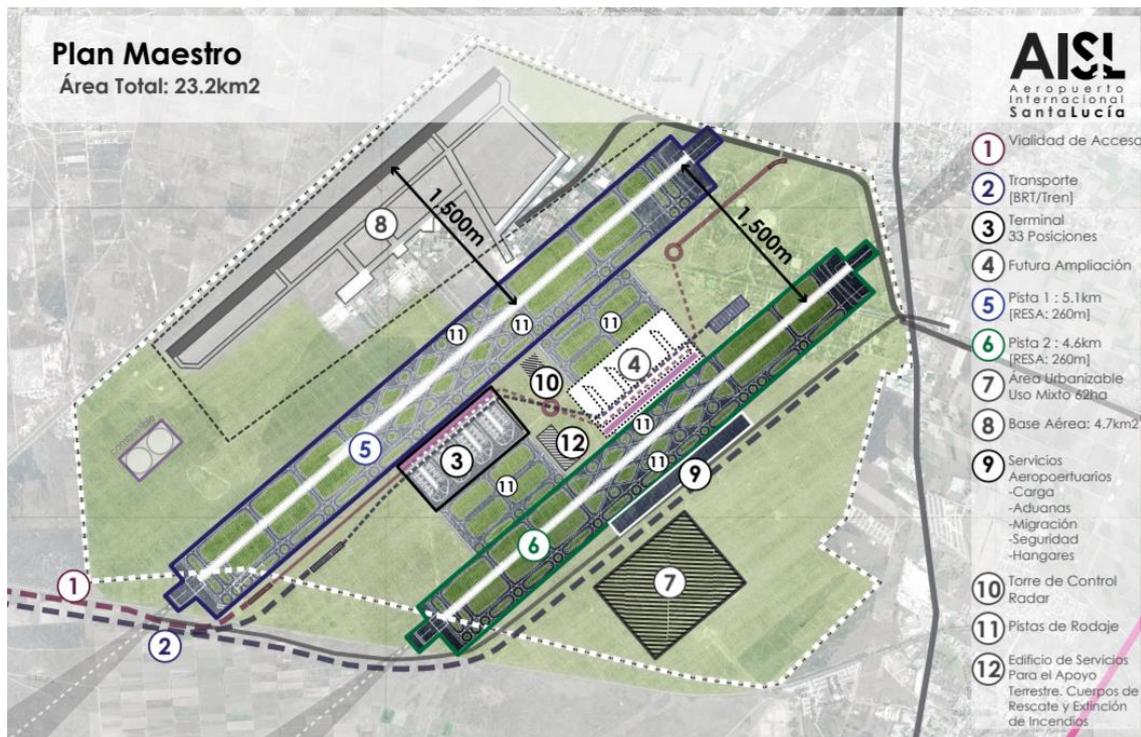


Figura 3.8 Plan maestro para el aeródromo NLU

3.3.7 Toluca, Estado de México

El Aeropuerto Internacional Lic. Adolfo López Mateos o también conocido como *Aeropuerto Internacional de Toluca*, es considerado el principal aeropuerto alternativo de la Ciudad de México, ubicado a 43 km del principal centro financiero de México localizado en Santa Fe al sur de la ciudad.

El aeropuerto de Toluca fue inaugurado en 1984 y fue concebido originalmente para pertenecer a la red aeroportuaria junto con el de la Ciudad de México. En 2007 se

terminaron las remodelaciones que le dieron la capacidad de servir hasta 8 millones de pasajeros en 2 terminales.

La infraestructura del aeropuerto consta de:

- 17 puertas de abordaje
- Cuenta con un sistema de aterrizaje Instrumental de categoría 3 (ILS-III), así como una pista de 4.2 km (AIP, 2019)

La altitud de la ubicación (2,580 msnm) causa que de octubre a diciembre haya neblina, además de que durante el verano hay mucha precipitación (Pazos, 2018). Ambas condiciones generan retrasos, demoras y conflictos en las operaciones aeroportuarias, además de las restricciones operativas asociadas a la gran elevación del aeropuerto sobre el nivel del mar, influye el comportamiento de la demanda que condiciona el éxito de las rutas, porque si las rutas no tienen éxito serán canceladas, sin embargo, bajo la gestión del gobierno federal (FORBES, 2019) podrían hacerse modificaciones para mejorar la captación de la demanda.

El aeropuerto de Toluca actualmente cuenta con una aerolínea que da servicio al aeropuerto: VivaAerobus. Esta es considerada de bajo costo (LCC). En la figura 3.9 se muestra el plano del aeródromo.

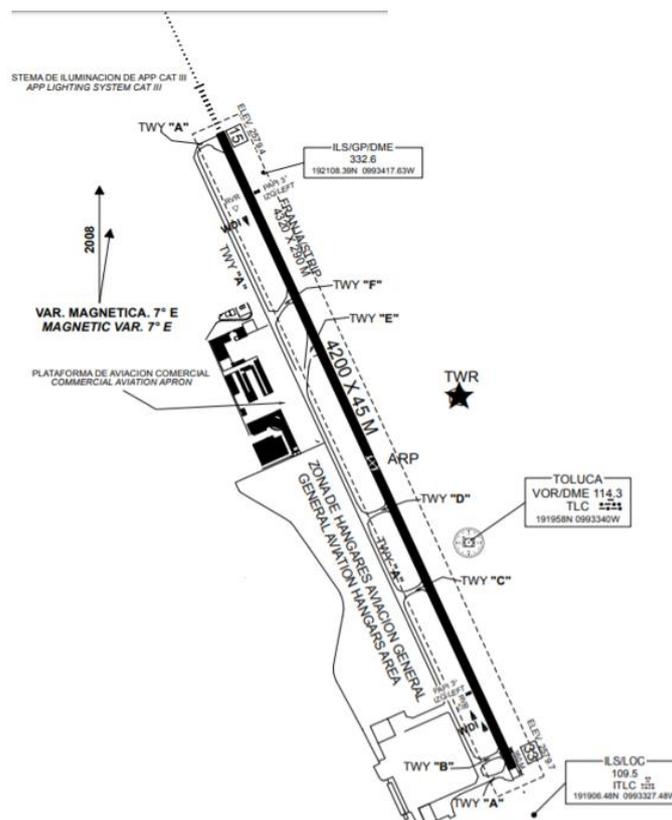


Figura 3.9 Plano de aeródromo TLC

3.4 Análisis estadístico

El análisis estadístico comprende los métodos y herramientas para analizar la información obtenida.

La información de los vuelos que aterrizan y despegan de la Ciudad de México, fue recopilada desde la página *flightradar24.com* por ser una página de acceso libre que mantiene el registro del tránsito aéreo alrededor del mundo y algunas características técnicas de los vuelos: posición del avión, altitud, aerolínea, destino, tiempo de vuelo, velocidad, etc.; no obstante, no son los datos oficiales de los vuelos. La descarga de los datos se hace de forma manual mediante un código en R, se conecta con la aplicación de *flightradar* cada semana para hacer la descarga de los vuelos de las aerolíneas que son responsables de al menos el 90% de los vuelos en el MEX (11 aerolíneas); se incluyen en la base de datos todos los destinos de estas aerolíneas.

El cargo representa menos del 10% de las operaciones aéreas, así que desviar las operaciones de cargo no representa una verdadera solución al problema de la liberación de la saturación aérea, por lo tanto, este estudio se enfoca en las operaciones y las aerolíneas comerciales. Una vez recopilados todos los datos, se filtran los datos de los vuelos que llegan al aeropuerto de la Ciudad de México, Toluca, Cuernavaca y Puebla.

No se incluyó al aeropuerto de Querétaro por ser principalmente un aeropuerto de carga a tres horas de distancia de la Ciudad de México, por lo que no se considera un destino intercambiable con MEX.

Se obtuvieron 31107 registros desde el 13/01/2018 hasta el 03/04/2018. La figura 3.11 muestra un extracto de la base de datos, donde se puede ver que cada vuelo tiene identificador, origen, destino, aerolínea, avión, tiempo de despegue y llegada.

Mediante un análisis y gráficas se caracterizan los vuelos que vienen de cualquier parte del mundo con destino a MEX y a los aeropuertos antes mencionados. Las llegadas al aeropuerto se acumulan por hora y se muestra en la figura 3.10.

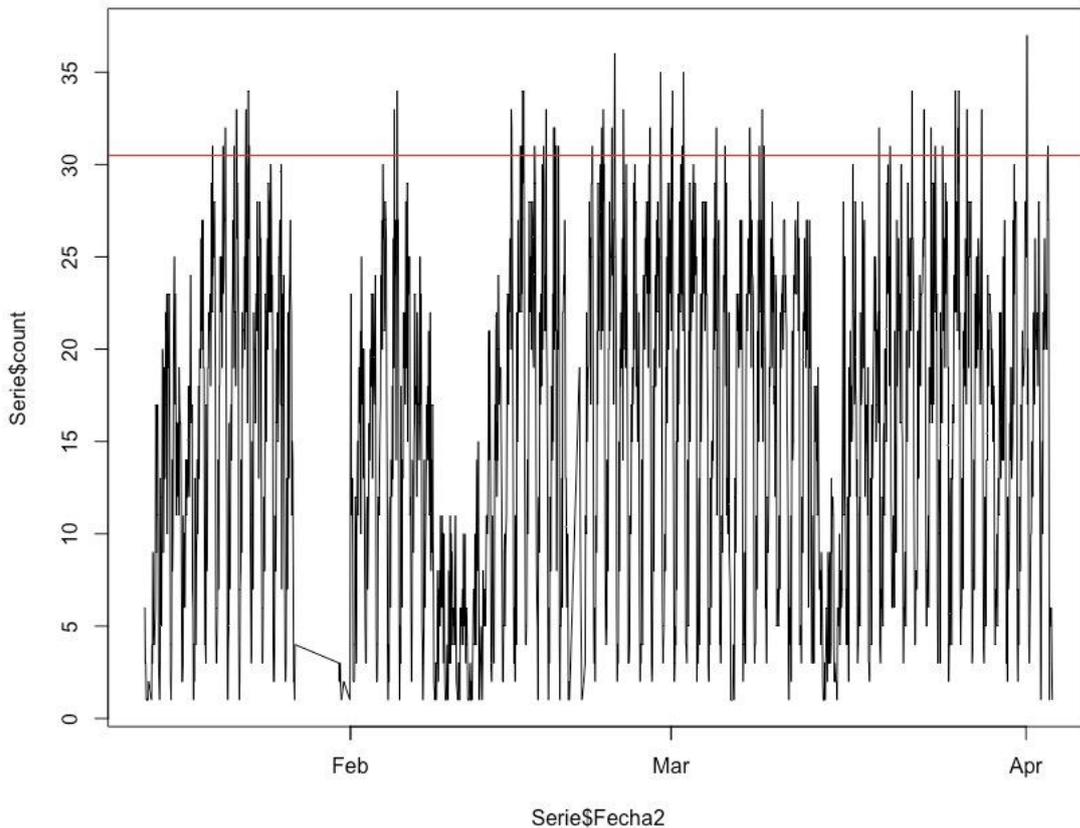


Figura 3.10 Gráfica de número de llegadas por hora

Se observa en la figura 3.10 que se tiene un pico de 37 operaciones de llegada por hora el 2018-04-01 02:00:00 para el MEX. En la gráfica mediante la línea roja se señala la capacidad de operaciones por hora de la Ciudad de México (61 operaciones/horas). A pesar de que hay un período en la gráfica donde no se tienen datos, lo que más importa de esta gráfica son los máximos o picos de datos.

De los datos de estos 80 días, se obtienen las aerolíneas con más afluencia de operaciones para estos aeropuertos. Con este análisis preliminar se obtienen las aerolíneas con más operaciones en el MEX y los datos se muestran en forma descendente en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Número de llegadas por aerolínea

Aerolínea	Número de operaciones	Porcentaje de participación
Interjet	6275	23.9%
Aeromexico	6113	23.3%
Aeromexico Connect	5851	22.3%
Volaris	3121	11.9%
Viva Aerobus	1899	7.2%
Aeromar	1176	4.4%
United Airlines	834	3.1%
Delta Air Lines	510	1.9%
Aerovías del Continente Americano	302	1.1%
Iberia Airlines	114	0.4%

Se caracterizan los vuelos que llegan a la Ciudad de México y con esto se sabe que:

- Más del 47% de los vuelos corresponden a aerolíneas de bajo costo: Interjet, Viva Aerobus, Volaris.
- Los vuelos que corresponden a la alianza Sky Team representan más del 47% de vuelos
- Los días con más demandas de vuelos son: viernes y lunes
- Los vuelos se concentran mayormente entre 8:00 a.m. y 12:00 a.m.

Estos resultados son clave para validar el modelo de simulación y serán clave para denotar la viabilidad o no del sistema aeroportuario.

3.5 Construcción del modelo de simulación

La construcción del modelo debe representar la realidad lo más cerca posible, las herramientas serán definidas según las necesidades del modelo.

Las operaciones aéreas son eventos discretos que pueden ser simulados en cualquier software de simulación, sin embargo, por fines prácticos de visualización, se elige uno con programación orientada a objetos llamado SIMIO®. Este software posee todas esas características, usado comúnmente en la industria y empleado en varios proyectos de investigación aeronáuticos. Es un software adecuado para montar el modelo de simulación, además de que está disponible para el departamento de Sistemas, en donde se desarrolló esta tesis.

Para la implementación en el modelo de simulación se consideran cuáles son los *recursos* *entradas* y las rutas. En la tabla 3.5 se muestran cuáles son los elementos de la base de datos que corresponden a los recursos, nodos y rutas.

Tabla 3.5 Valores de entrada del modelo de simulación

RECURSOS	
a.	Origen y destino
b.	Tipo de aeronave (tamaño de estela)
c.	Tipo de vuelo (carga o de pasajeros)
d.	Aerolínea
e.	Horario (despegue y aterrizaje)
NODO	
f.	Capacidad del aeropuerto
RUTA	
g.	Conexiones entre VOR y aeropuertos

Habiendo recopilado la información y definidas las entradas, se integra al simulador SIMIO®, junto con la lógica del flujo de la información. La base de datos integrada a SIMIO®, tendrá el aspecto que se presenta en la figura 3.11. En esa figura se observa el número de identificación, origen, destino, operador, tipo de aeronave y hora de salida y aterrizaje.

Views	Flights	Operators	Aircraft				
	Identifier	Origin	Destiny	Operator	Aircraft	Dept Time	Arr Time
1	972395	MAD	MEX	Aeromexico	NA	13/01/2018...	14/01/2018...
2	990139	PTY	MEX	Aeromexico	Boeing 737-...	13/01/2018...	14/01/2018...
3	898855	JFK	MEX	Aeromexico	Boeing 787-...	13/01/2018...	14/01/2018...
4	677757	BOG	MEX	Aeromexico	Boeing 737-...	13/01/2018...	14/01/2018...
5	997398	LAS	MEX	Aeromexico	Boeing 737-...	13/01/2018...	14/01/2018...
6	717053	LAX	MEX	Aeromexico	Boeing 737-...	13/01/2018...	14/01/2018...
7	699224	DEN	MEX	Aeromexico	Boeing 737-...	13/01/2018...	14/01/2018...
8	977848	ORD	MEX	Aeromexico	Boeing 737-...	13/01/2018...	14/01/2018...
9	998169	DTW	MEX	Aeromexico	Boeing 737-...	13/01/2018...	14/01/2018...
10	898854	AMS	MEX	Aeromexico	Boeing 787-...	13/01/2018...	14/01/2018...
11	972335	CDG	MEX	Aeromexico	NA	13/01/2018...	14/01/2018...
12	736946	LIM	MEX	Aeromexico	Boeing 737-...	13/01/2018...	14/01/2018...
13	891081	HMO	MEX	Aeromexico	Boeing 737-...	13/01/2018...	14/01/2018...
14	980176	SFO	MEX	Aeromexico	Boeing 737-...	13/01/2018...	14/01/2018...
15	972374	MAD	MEX	Aeromexico	NA	13/01/2018...	14/01/2018...
16	1006589	MIA	MEX	Aeromexico	Boeing 737-...	13/01/2018...	14/01/2018...
17	972682	CUN	MEX	Aeromexico	Boeing 737-...	13/01/2018...	14/01/2018...

Figura 3.11 Vista del modelo de simulación con VORs y los aeropuertos del sistema multi-aeropuerto con rutas internas

Una vez integrada la información de llegada de los vuelos al software como base de datos, el siguiente paso es construir la lógica del modelo y conectarla cada uno de los elementos de la simulación mediante variables de estado con la base de datos.

Para la implantación del sistema real en el modelo de simulación, es necesario conceptualizar y hacer simplificaciones del sistema real. En la figura 3.12 se representa un esquema con los pasos seguidos para la construcción del modelo. Los cuadros en color azul son las fases de conceptualización del modelo y los cuadros blancos representan las corridas en el software y la validación del modelo.

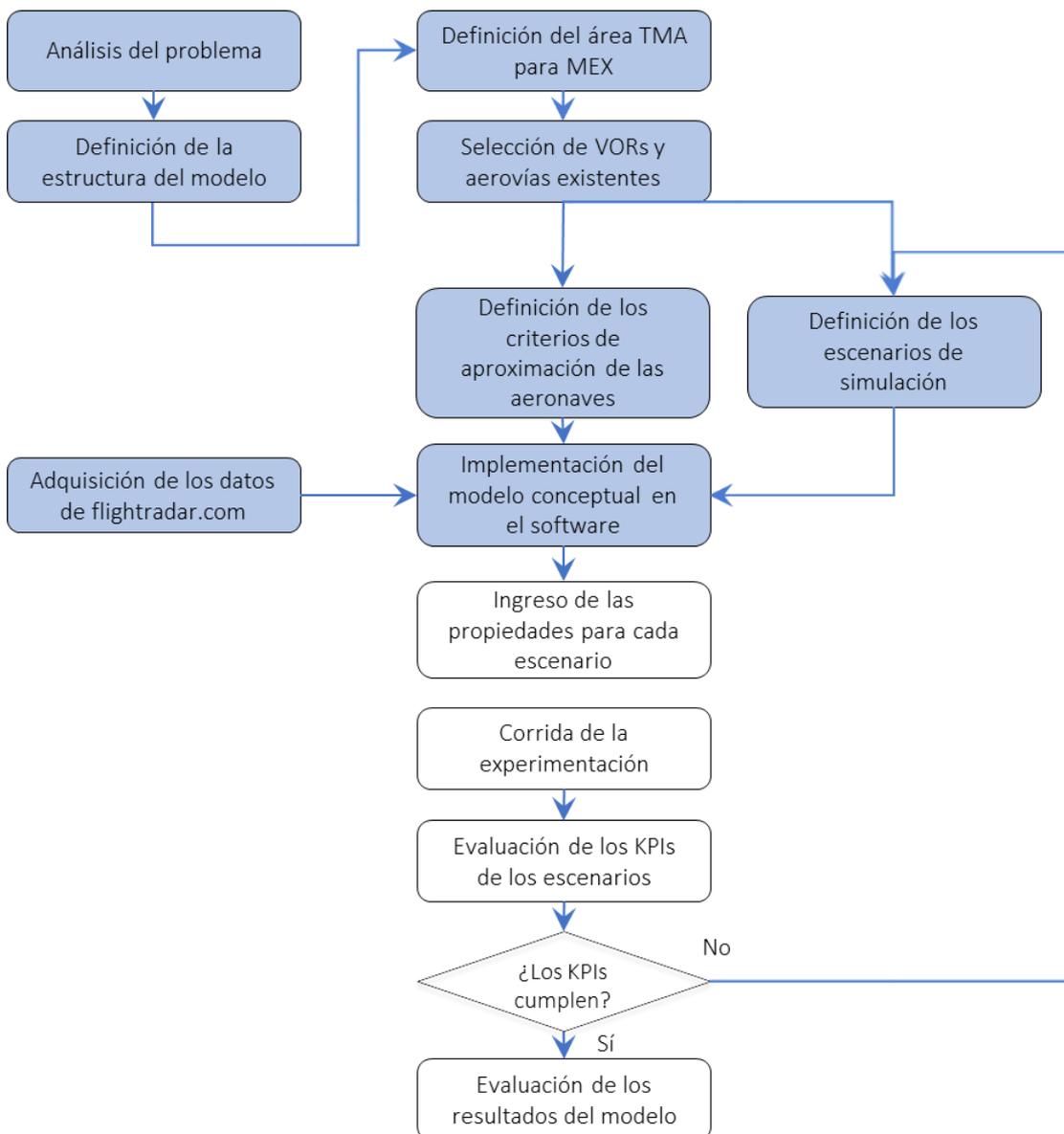


Figura 3.12 Diagrama de la construcción del modelo de simulación

Después de estructurar el modelo, se definió el área de maniobra terminal para el aeropuerto de la CDMX, con lo cual ya se pueden definir las aerovías y controles aéreos que existen en la zona. El modelo considera criterios lógicos de aproximación de aviones. La información anterior se programa en el software SIMIO, definiendo al mismo tiempo los escenarios de interés. Los datos que se ingresan corresponden a la información obtenida de *flightradar* y los indicadores de rendimientos con la capacidad del aeropuerto para recibir aviones y personas.

Con este orden de pasos se construye el modelo de simulación y se establecen las variables del sistema. Estas variables se representan como propiedades de la simulación que permitirán experimentar formulando diferentes escenarios. Se prueba la posibilidad de éxito al desviar tránsito de un aeropuerto destino a otro diferente cambiando las propiedades para cada uno de los escenarios y evaluando los de picos máximos de operaciones. Este modelo permitirá al usuario del simulador crear infinitas posibilidades de escenarios y evaluar la viabilidad de los escenarios con base en los resultados de la experimentación.

Obtener corridas de simulación exitosas depende totalmente de un correcto modelado conceptual. A continuación, se explica la simplificación del sistema real y su implementación como modelado conceptual.

3.5.1 Modelado conceptual

El modelo de simulación se basa en el modelo presentado por Wellens et al. (2017) que involucra a las aeronaves y su movimiento entre aeropuertos dentro de una red de nodos conectados en línea recta entre origen-destino de cada vuelo. Los *path* representan las vías aéreas del TMA actuales para la Ciudad de México y las posibles rutas que los vuelos pueden seguir. Se agregaron otros factores que condicionan la capacidad del sistema, como son la capacidad de los aeropuertos del sistema multi-aeropuerto, el número de operaciones entendidas como seguras en el TMA, los puntos de control y ruta (VOR) que funcionan como referencia durante el vuelo y cambio de ruta utilizando las vías aéreas. Para el modelo de simulación, el control del tránsito aéreo (ATC) es clave, ya que limita el número de aeronaves que pueden circular en el espacio aéreo visual (VFR).

Para este análisis, no se considera el detalle de las cartas de aproximación de salida o llegada, solo se consideraron las rutas entre los VOR/DME que componen el sistema del TMA y la red de conexión con los aeropuertos del sistema multi-aeropuerto.

Los eventos en el modelo de simulación son activados por la información de vuelos obtenida de *flightradar* (2019) a través de la base de datos; es decir, el aeropuerto de origen, el operador de vuelo, el tipo de aeronave, la hora de salida y de llegada. Cada vuelo llega al VOR correspondiente y, a partir de ahí con la lógica del modelo de

simulación decide enviar la aeronave a un aeropuerto de llegada específico, según el escenario seleccionado.

El aeropuerto de Santa Lucía, NLU, está incluido y se considera su capacidad proyectada en su primera fase de construcción de 20 millones de pasajeros anuales. A continuación, en la figura 3.13 se muestra un extracto de las cartas aeronáuticas del MEX que incluye a todos los aeropuertos del sistema multi-aeropuerto propuesto.

Con base en las figuras 2.1 y 2.2 se tomó en consideración la posición de los VOR y las aerovías para la configuración de las rutas aéreas que llevan al aeropuerto de la Ciudad de México y los aeropuertos cercanos y armar el espacio aéreo de análisis del flujo operativo del espacio aéreo.

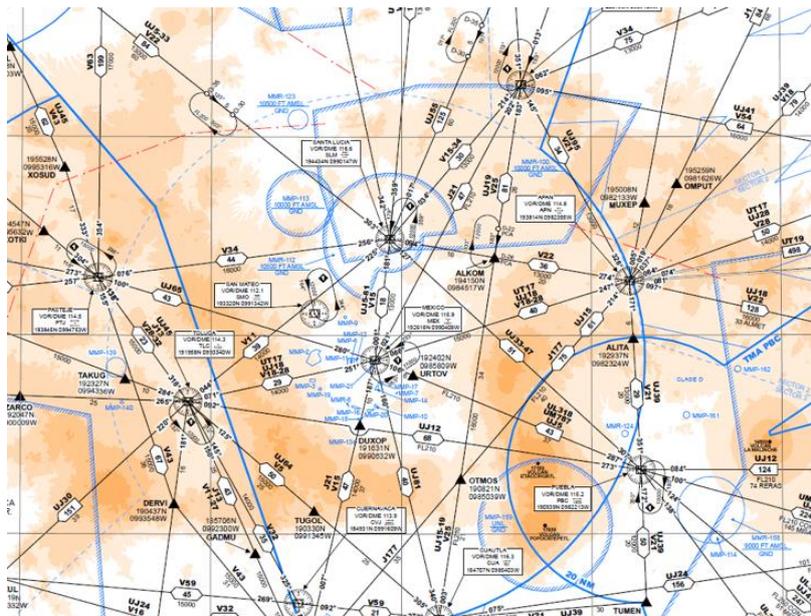


Figura 3.13 Carta aeronáutica del TMA del MEX.

Fuente: AIP, 2019

La figura 3.13 muestra las rutas en el espacio inferior aéreo, por lo que se pueden ver las rutas, el nombre de las rutas, los VOR de conexión y los TMA para cada uno de los aeropuertos del sistema multi-aeropuerto.

De acuerdo con la teoría encontrada en las diversas fuentes De Neufville (1995, 2013), se considera un TMA con un radio de 50 nm (millas náuticas) o 92 km de radio con centro aproximado en el MEX, como se observa en la figura 3.14. Bajo esta consideración quedaron cinco aeropuertos incluidos en el área delimitada del TMA: TLC, NLU, PBC, CVJ y MEX; a partir de este momento cuando se haga mención del TMA, se considera la figura 3.14.

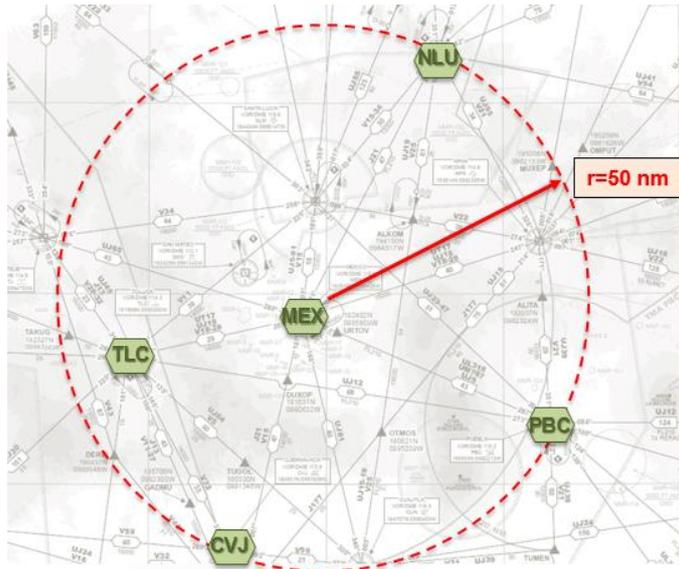


Figura 3.14 TMA de MEX indicando el sistema multi-aeropuerto

En esta misma área se seleccionan los cuatro VORs más próximos al perímetro, ya que estos serán los puntos de entrada y salida para los vuelos que se dirigen a los aeropuertos del sistema multi-aeropuerto. Para seleccionarlos se toman estratégicamente, procurando que estén separados entre sí y ubicados hacia los cuatro puntos cardinales. Cabe resaltar que son VOR ya ubicados en el espacio aéreo, no se proponen, solo se están seleccionando los ya existentes y se integraron al modelado conceptual.

En la figura 3.15 se muestra la posición de los VOR seleccionados en la carta de navegación: PACHUCA, PASTEJE, CUERNAVACA y APAN.

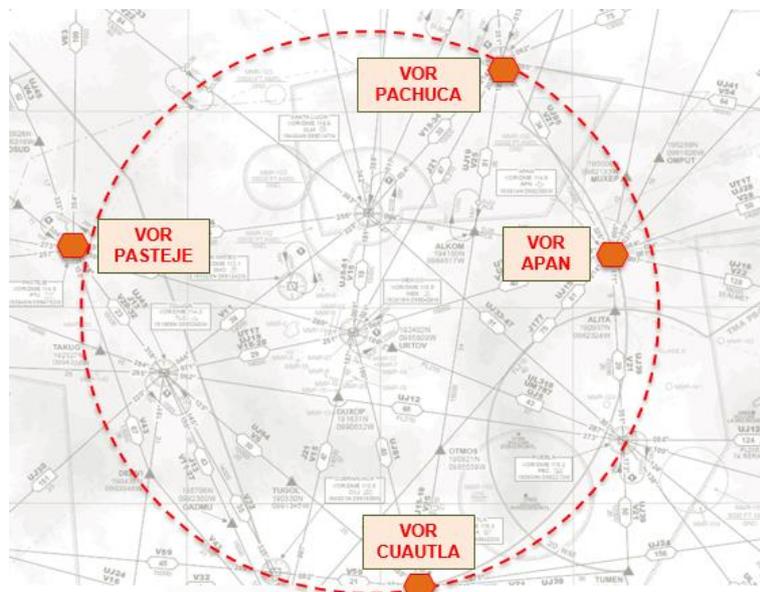


Figura 3.15 TMA de MEX indicando los VORs incluidos

Con base en las consideraciones anteriores, el TMA se dividió en cuatro sectores (A, B, C y D) para proponer un flujo de entrada y salida de aeronaves en el sistema simulado y la conexión de acuerdo con la ubicación de los aeropuertos con destino en algunos de los aeropuertos del sistema multi-aeropuerto. Se propone una cuadrícula para sectorizar el espacio aéreo en cuatro partes: los que vengan del occidente (sector A), los que vengan del norte de América (sector B), los que vengan de Europa (sector C) y los que provengan del sur de México y Sudamérica (sector D).

En el entorno de modelado simplificado, se supone que cada VOR sirve a un sector específico: PASTEJE sirve al sector A, PACHUCA sector B, APAN sector C y CUAUTLA sector D. La figura 3.16 muestra la sectorización propuesta y la ubicación de los aeropuertos de origen en el software de simulación SIMIO®.

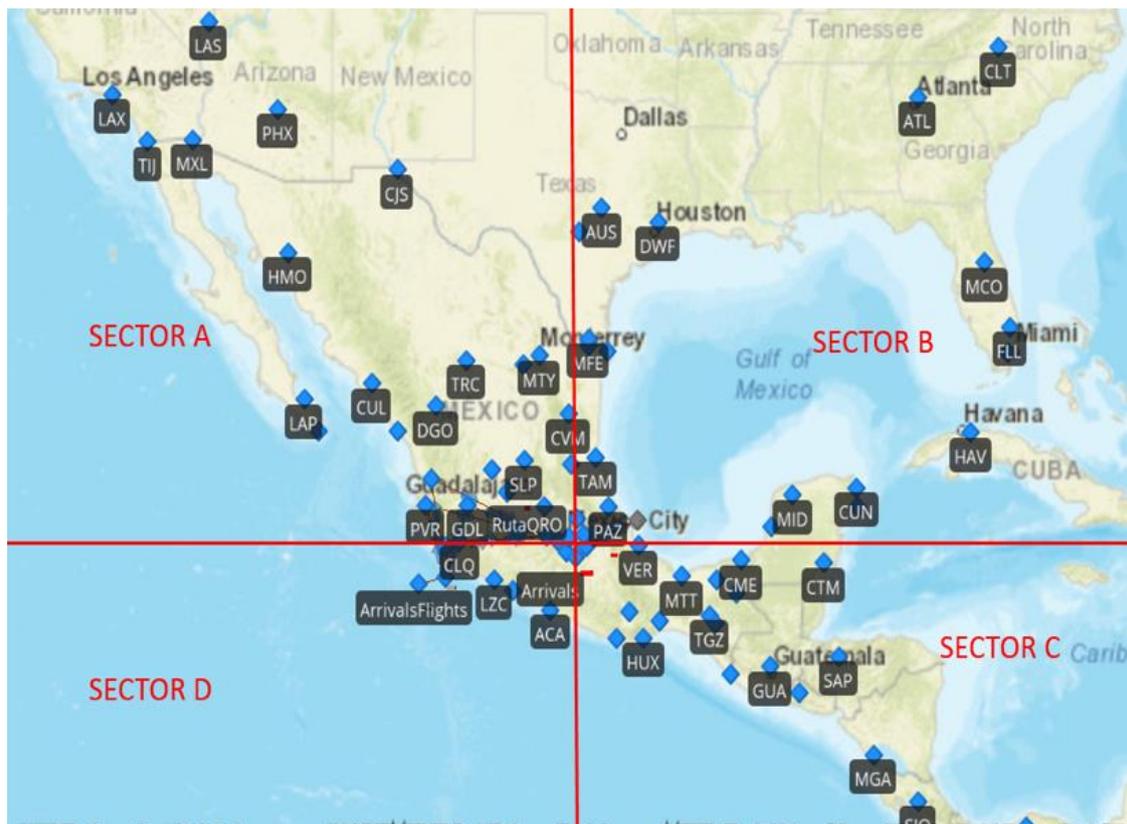


Figura 3.16 Sectorización del espacio aéreo de MEX

Cada aeropuerto y VOR está representado por un *nodo*, para la entrada y salida de vuelos, según sea el caso. Los vuelos que se dirigen a la Ciudad de México se consideran entrantes al TMA y se conectan a través del VOR asignado al sector en el que se encuentra ubicado el aeropuerto de origen.

Para realizar las conexiones a los nodos se utilizan *rutas*, con los cuales se simula el camino por el que debe transitar cada vuelo antes de llegar al aeropuerto de destino. A continuación, se sectorizan todos los aeropuertos del sistema, sin importar si son nacionales o internacionales (denominados con el código IATA) con destino a MEX y se

asocian con el VOR de entrada al TMA. Esta clasificación se muestra en la tabla 3.6, de los cuales se cuentan 116 aeropuertos con destino en MEX, TLC y PBC, ya que no se encontraron vuelos registrados en *flightradar* con destino al CVJ, por no tener vuelos comerciales actualmente.

Tabla 3.6 Sectorización de los aeropuertos con ruta desde/hacia MEX para la conexión con los VOR

SECTOR A (VOR PACHUCA)	SECTOR B (VOR APAN)	SECTOR C (VOR CUAUTLA)	SECTOR D (VOR PASTEJE)
○ DEN	○ CVM	○ SDQ	○ LZC
○ YVR	○ TSL	○ VER	○ ZIH
○ SEA	○ TAM	○ MTT	○ ACA
○ SLC	○ MFE	○ OAX	○ ZLO
○ OAK	○ MTM	○ PXM	○ CLQ
○ LAX	○ PAZ	○ HUX	○ MLM
○ PHX	○ CPE	○ IZT	
○ SFO	○ MID	○ ILS	
○ MTY	○ CZM	○ TGZ	
○ TIJ	○ CUN	○ VSA	
○ MXL	○ HAV	○ PQM	
○ HMO	○ FLL	○ CME	
○ CJS	○ MCO	○ CTM	
○ LAP	○ DWF	○ TAP	
○ SJD	○ AUS	○ GUA	
○ CUL	○ SAT	○ SAP	
○ TRC	○ ATL	○ SAL	
○ SLW	○ CLT	○ MGA	
○ DGO	○ IAD	○ SJO	
○ MZT	○ CVG	○ PTY	
○ SLP	○ MSP	○ MDE	
○ AGU	○ ORD	○ BOG	
○ BJX	○ DTW	○ UIO	
○ TPQ	○ SDF	○ GYE	
○ PVR	○ IAD	○ LIM	
○ GDL	○ EWR	○ GRU	
○ ICN	○ BOS	○ SCL	
○ NRT	○ YUL	○ EZE	
○ QRO	○ JFK	○ LMM	
○ LAS	○ YYZ		
○ YYC	○ MSP		
○ CUU	○ MAD		
○ CEN	○ BCN		
○ PDX	○ FCO		
○ SMF	○ FRA		
○ PDS	○ CDG		
○ LOV	○ LHR		
○ BFI	○ AMS		
○ HSH	○ LUX		
○ BTF	○ MUC		
	○ MIA		
	○ PVG		
	○ SFB		
	○ MAM		
	○ IAH		
	○ REX		
	○ NLD		
	○ RBD		
	○ MSY		
	○ MDW		
	○ PBI		
	○ BGR		
	○ TPA		
	○ TMB		

Con la clasificación de la tabla 3.6, se conectan cada uno de los nodos con el VOR del sector correspondiente. Las vías aéreas están representadas por caminos en el modelo y conectan cada uno de los aeropuertos del sistema por una línea recta con fines de simplificar la simulación del sistema.

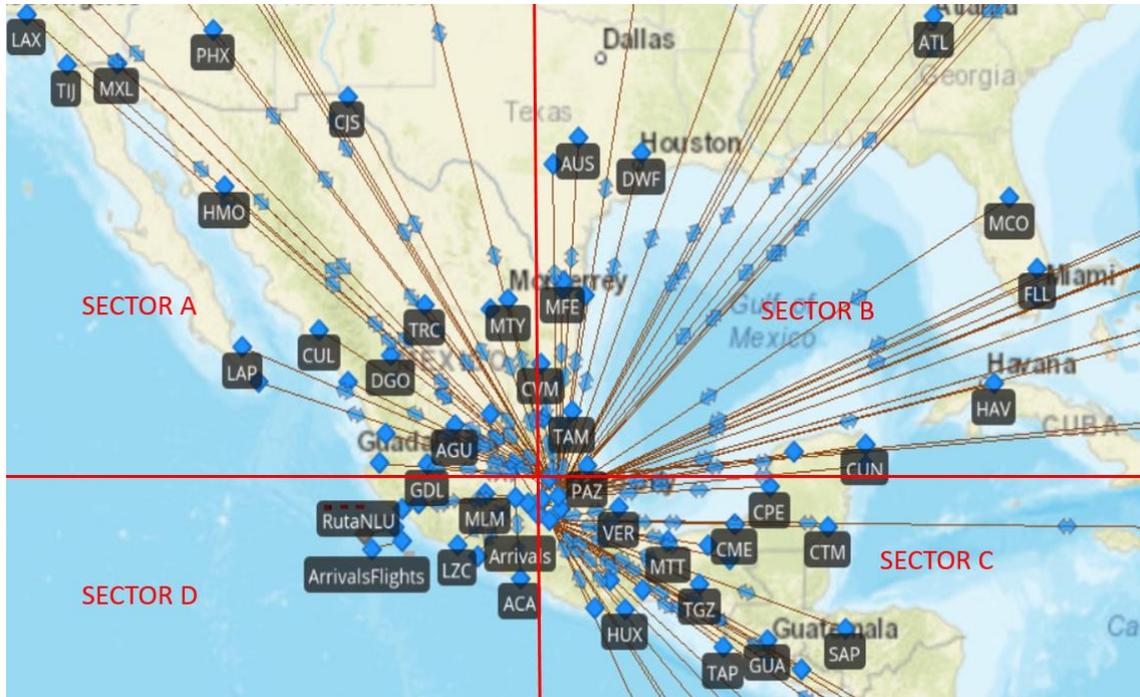


Figura 3.17. Aeropuertos conectados a los VOR por sector

Mediante la sectorización de la figura 3.17 se logra la simplificación de las rutas exteriores al TMA de la Ciudad de México. El siguiente paso es configurar la red interna que conectará con los aeropuertos del sistema.

3.5.2 Configuración de la red interna

Para el armado de la red multi-aeropuerto, se analizó el flujo de operaciones dentro del TMA y se simplificaron las rutas, las posibles combinaciones para el desvío interno y la posición de los VOR para hacer el intercambio de ruta en aire.

Teniendo en cuenta la complejidad del espacio aéreo, es necesario modelar conceptualmente las rutas que se podrían emplear, la conexión en el sistema del TMA y los límites del sistema, por lo cual se realiza un trazo sobre la carta aeronáutica (figura 3.16) señalando con diversos colores cada uno de los elementos:

- **Azul:** representa los VOR de entrada al TMA
- **Rojo:** las aerovías con su identificador y la dirección de ruta

- **Negro:** son los aeropuertos con su código IATA
- **Verde:** el radio propuesto para el TMA y su sectorización
- **Violeta:** los VOR/DME (equipos o instrumentos de medición de distancia) que ayudan a determinar la geolocalización de la aeronave durante el vuelo, se indican como triángulos.

Las vías aéreas, los aeropuertos, VOR y TMA fueron conectados en el modelo de simulación como se muestra en la figura 3.18.

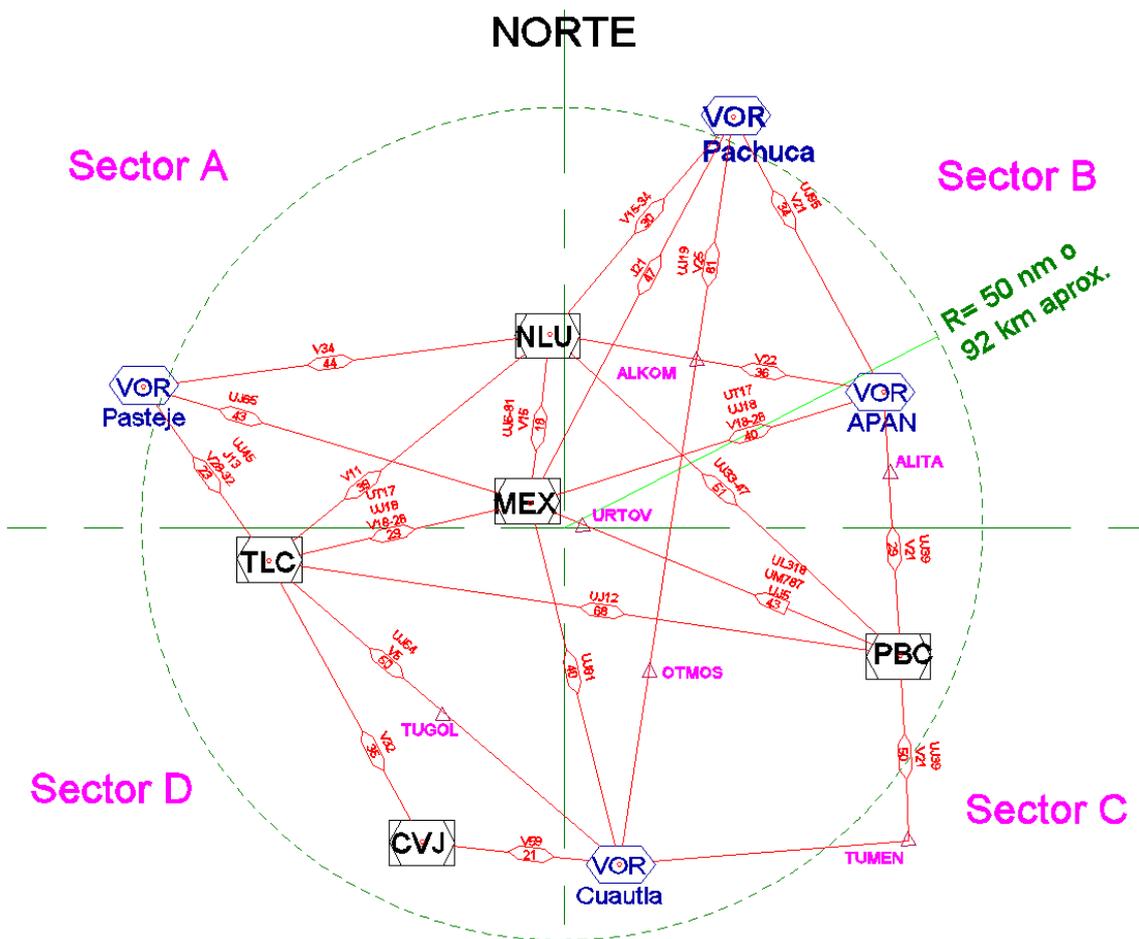


Figura 3.18 Simplificación del TMA del MEX considerando VORs, aeropuertos y aerovías

Esta configuración se programa en el modelo de simulación para hacer la relación entre los elementos; estos son fijos, aunque diferentes escenarios involucrarán diferentes combinaciones de nodos y rutas dependiendo del origen del vuelo, el tipo de vuelo (carga o pasajeros), el tipo de aerolínea (aerolínea de servicio completo o aerolínea de bajo costo), etc.

La figura 3.19 corresponde a la implementación de la simplificación anterior en el software de simulación.



Figura 3.19 Vista del modelo de simulación con VORs y los aeropuertos del sistema multi-aeropuerto con rutas internas

Por la naturaleza del *path*, las aerovías solo pueden tener un sentido (corresponde con la vida real); es decir, para esta implementación se consideran la ruta de llegada y se sobreentiende que los vuelos que entran al sistema salen por una ruta en sentido opuesto y en paralelo.

El sistema del TMA se puede considerar estrictamente como un sistema cerrado, donde todo lo que entra debe salir, de tal manera que el número de operaciones de llegada será el mismo número de operaciones de salida; considerando, sin embargo, que parte de los aviones no salen dentro de la misma hora, sino en un horario posterior (ya sea porque se quedan un tiempo en operaciones en tierra, o porque llega muy al final de la hora simulado). De esta manera, el número de operaciones máximas del modelo será el número de llegadas por 1.85, considerando que el 15% de los aviones necesitan más de una hora en tierra. Para fines prácticos, el modelo destruirá la entidad que llega a su destino.

Se proponen principalmente cuatro escenarios para analizar este caso estudio, los cuales se rigen por el desvío de operaciones de acuerdo con la aerolínea y el aeropuerto destino.

Si bien se analizan los cuatro escenarios que podrían ser factibles para el sistema de aeropuertos, se incluyen en el modelo ciertos parámetros que permiten definir escenarios generalizados a criterio del usuario. Mediante una tabla pivote, se pueden cambiar estos parámetros para generar una cantidad teóricamente infinitas de escenarios.

3.5.3 Generador de escenarios

La interfaz del modelo de simulación permite ingresar datos de formar manual a las variables del proceso para correr la experimentación. Esto se logra con una lista de las propiedades y la asignación de valores para cada uno de los escenarios. Los valores en este modelo corresponden a la probabilidad de desvío de vuelos en esa ruta hacia un destino diferente también asignado como propiedad.

La tabla de datos es la base del diseño de la experimentación del modelo, para este caso estudio, se asignaron propiedades y variables para que el usuario del modelo de simulación pueda interactuar ingresando probabilidades y destinos con base en el criterio lógico de desvío de tránsito aéreo entre los aeropuertos del sistema metropolitano.

Scenario			Replications		Controls							
<input type="checkbox"/>	Name	Status	Required	Completed	DesvíoMEX	DesvíoPBC	DesvíoTLC	DesvíoNLU	DestAlt_MEX	DestAlt_TLC	DestAlt_PBC	DestAlt_NLU
<input type="checkbox"/>	Scenario1	Idle	10	0 of 10	0.2	1	1	1	TLC	TLC	PBC	NLU
<input type="checkbox"/>	Scenario2	Idle	10	0 of 10	0.3	1	1	1	TLC	TLC	PBC	NLU
<input type="checkbox"/>	Scenario3	Idle	10	0 of 10	0.4	1	1	1	TLC	TLC	PBC	NLU
<input type="checkbox"/>	Scenario4	Idle	10	0 of 10	0.5	1	1	1	TLC	TLC	PBC	NLU
<input type="checkbox"/>	Scenario5	Idle	10	0 of 10	0.2	1	1	1	NLU	TLC	PBC	NLU
<input type="checkbox"/>	Scenario6	Idle	10	0 of 10	0.3	1	1	1	NLU	TLC	PBC	NLU
<input type="checkbox"/>	Scenario7	Idle	10	0 of 10	0.4	1	1	1	NLU	TLC	PBC	NLU
<input type="checkbox"/>	Scenario8	Idle	10	0 of 10	0.5	1	1	1	NLU	TLC	PBC	NLU
<input type="checkbox"/>	Scenario9	Idle	10	0 of 10	0.6	1	1	1	NLU	TLC	PBC	NLU

Figura 3.20 Tabla pivote para la generación de escenarios

La figura 3.20 muestra esa tabla de ingreso de datos para la experimentación, que para fines prácticos será llamada “tabla pivote”. Los escenarios que se generen dependerán del usuario y los resultados que necesite evaluar en la simulación.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

En este capítulo se recopila la verificación del modelo y los resultados obtenidos de las corridas del modelo de simulación.

4.1 Verificación del modelo

El modelo tendrá que cumplir con los criterios mínimos necesarios para considerarse apto para su implementación en el análisis.

El modelo de simulación contiene las características que se mencionaron en el capítulo 3 y que se aproximan al comportamiento del sistema. En este caso las características del simulador se pueden observar en tiempo real con el desplazamiento de los elementos (aviones) por los *path* propuestos o aerovías, conectados a cada uno de los destinos dentro del TMA. Con esto se verifica que el modelo respete la relación lógica propuesta en el modelado. Los aviones van desde su origen hasta su destino con las reglas de asignación y de ingreso al TMA mediante el *path* que corresponde al camino recto más corto entre el origen y el destino, además de la destrucción de la entidad para simplificar el modelo.

La figura 4.1 ilustra la vista de la pantalla del simulador en un instante de la simulación.

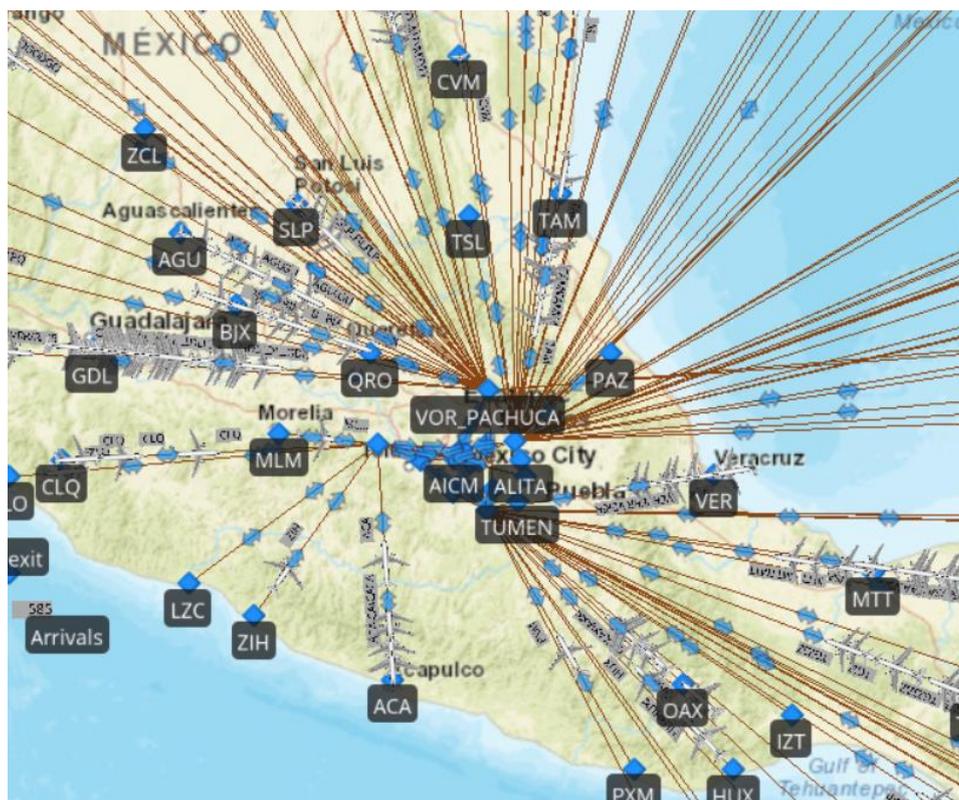


Figura 4.1 Pantalla de la corrida de la simulación

En la figura 4.1 se puede observar cómo avanza el flujo de operaciones en el modelo de simulación en línea recta hacia el VOR. Una vez que ingresa al TMA, y dentro del TMA, se programa la ruta a tomar desde el VOR seleccionado para que llegue al aeropuerto destino.

4.2 Validación del modelo

La validación del modelo considera la información obtenida durante el proceso de simulación y los resultados del funcionamiento basado en el sistema real.

Los resultados obtenidos de la corrida del escenario 1 del modelo de simulación se comparan con los datos estadísticos presentados en el punto 3.4 (análisis estadístico), sin embargo, a partir de este momento se consideran otros *outputs* con los que se miden algunos KPIs del modelo. Se obtienen los principales *outputs* del modelo de simulación que responden a los KPIs que miden la saturación de los aeropuertos. Los nombres de los *outputs* son mostrados en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 *Outputs del modelo de simulación*

OUTPUTS DEL MODELO	
a.	Aeropuerto destino
b.	Flujo de operaciones en el espacio aéreo
c.	Niveles de saturación del sistema
d.	Viabilidad de los escenarios examinados

Para una mejor representación visual de los niveles de saturación de cada uno de los aeropuertos con base en los KPIs, se propuso un semáforo de los niveles de saturación para los resultados obtenidos de la simulación. La tabla 4.2 indica cómo se clasificó.

Tabla 4.2 *Semáforo de saturación*

Saturación	KPI
Menos del 80 %	A = Operable
Entre 80 y 95%	B = Saturado
Más del 95%	C = Sobresaturado

La clasificación tipo A denota que, a pesar de los picos operativos, el aeropuerto tiene la capacidad para operar de forma segura con niveles de servicio altos. La clasificación tipo B subraya la necesidad de mejorar las condiciones operativas del aeropuerto, pero pese a esto sigue siendo viable operativamente incluso habiendo algunos picos de

operaciones. La clasificación C es el punto crítico operativo, donde la seguridad y la calidad del servicio se ven comprometidas, las operaciones tienen mayor riesgo y se enfrenta a problema de congestión que atenta la seguridad, además de ser inviable y quedarse sin capacidad para atender los vuelos.

Este es un problema muy grave, porque a diferencia de los otros medios de transporte en tierra o en agua, los vuelos no pueden detenerse en el aire, por ello la delicadeza de manejar correctamente la capacidad, de forma coordinada la recepción en tierra y con niveles operativos adecuados para brindar la seguridad del medio de transporte.

Las corridas del modelo de simulación muestran mediante gráficas dinámicas el número de llegadas por horas para cada uno de los aeropuertos, estos datos han sido validados con los datos del análisis estadístico, de tal manera que sean congruentes y reflejen los mismos resultados.

En la figura 4.2 se puede observar que para la fecha del 6 de febrero de 2018 el simulador tiene 31 llegadas por hora, y cuando se revisa la base de datos del MEX, se confirma este valor.

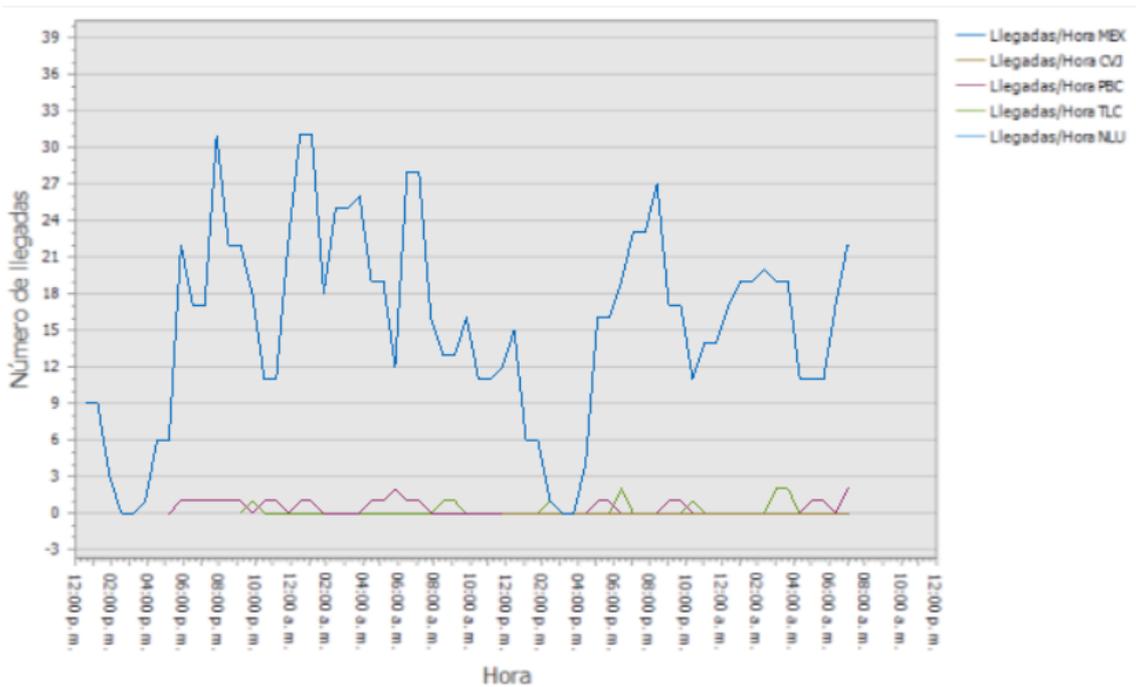


Figura 4.2 Gráfica del número de operaciones por hora

Con base en la información obtenida de las corridas de los cuatro escenarios de la simulación, se evalúa el nivel de saturación de cada uno de los aeropuertos del sistema, los resultados se muestran en la tabla 4.3 y se pinta con el semáforo de saturación (tabla 4.2).

4.3 Escenarios propuestos

Los escenarios propuestos, así como en qué elementos del modelo inciden, se definen con base en el objetivo de este trabajo, es decir, poder definir si es factible desviar parte del tránsito aéreo de la Ciudad de México hacia aeropuertos cercanos.

Como se mencionó en la construcción del modelo de simulación, las variables a considerar para armar los escenarios propuestos se basan en la capacidad de los aeropuertos y de su pista de aterrizaje para la recepción de los aviones según su tamaño y peso, y la capacidad del edificio terminal para atender con un nivel alto de confort a los pasajeros a su llegada y/o salida.

En la figura 4.3 se simplifica cómo se consideraron los datos de entrada en el modelo para el tamaño y capacidad de pasajeros del avión y la capacidad de recepción de vuelos y pasajeros de los aeropuertos. Hay varios factores importantes a considerar antes de decidir si los aviones se pueden desviar o no. Un factor es que el avión que se decida desviar pueda aterrizar y despejar en el aeropuerto alterno por su capacidad de pista, otro factor es que el aeropuerto tenga la capacidad para atender al número de aviones desviados (número de operaciones por hora) y el número de pasajeros en su edificio terminal (número de pasajeros por hora). Habiéndose considerado estos factores, se procede a armar el escenario con las condiciones de desvío; es decir, programando en el modelo de simulación el aeropuerto destino y el número pico de operaciones. Si estos indicadores se miden favorablemente, se puede considerar como un escenario viable de acuerdo con los KPIs considerados en este estudio.

La creación de escenario deberá responder algunos datos en el orden que se propone a continuación:

1. Tipo de avión (tamaño y número de pasajeros)
2. Capacidad de pasajeros en el avión
3. Longitud y peso del avión
4. Capacidad del edificio terminal del aeropuerto
5. Tipo de aerolínea o alianza a la que pertenece
6. Capacidad de la pista para el aterrizaje del avión
7. Número de posiciones de contacto y remotas en el aeropuerto

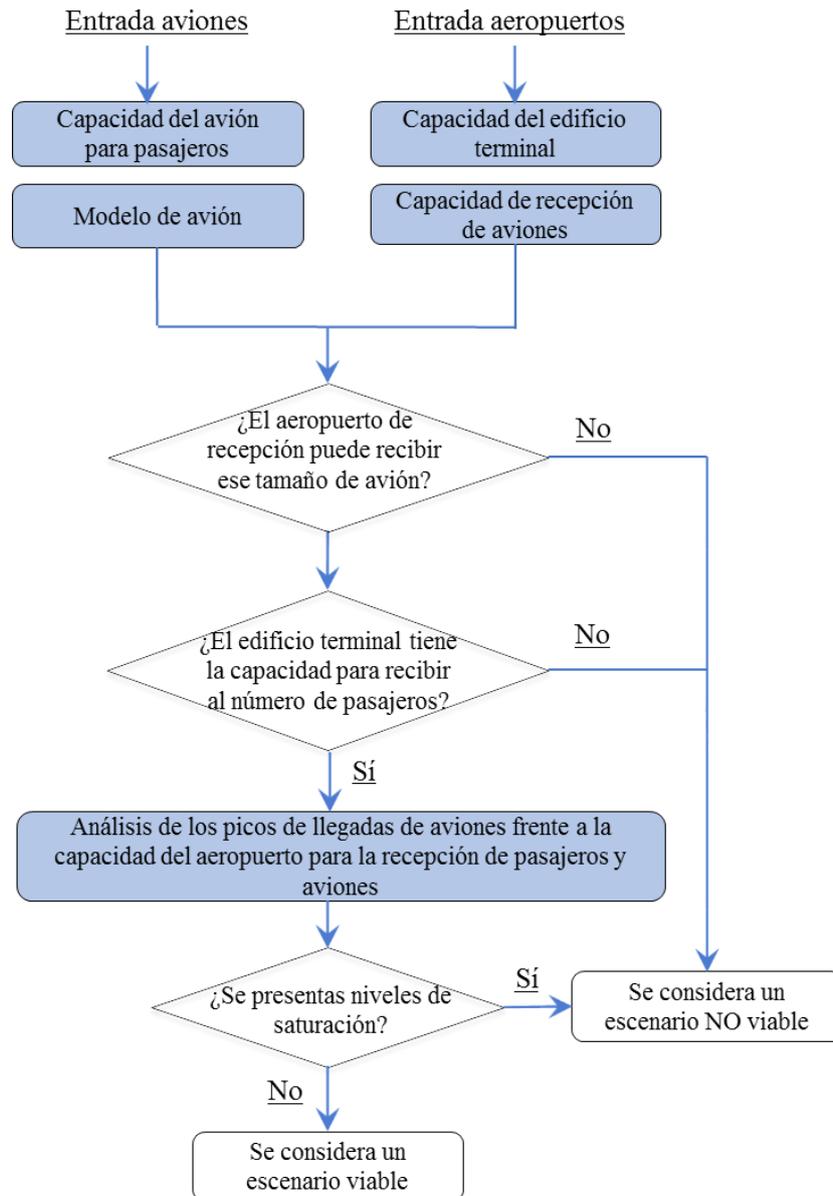


Figura 4.3 Criterios para armado de escenarios para simular

La figura 3.4 señala las variables de ingreso al modelo para los aviones y los aeropuertos, así como la capacidad del aeropuerto y el edificio terminal para la recepción del avión y del número de pasajeros. Una vez corrido el modelo de simulación, se analizan los picos de llegadas de aviones y se evalúa si está dentro de la capacidad operativa. Cuando se cumplen todos estos factores se considera un escenario viable.

Con este árbol de decisión y la combinación de estos factores se pueden proponer diferentes escenarios, con el objetivo de descentralizar las operaciones de MEX y distribuir de forma estratégica en el resto de los aeropuertos del sistema multi-aeropuerto. Se redistribuyeron los vuelos comerciales del aeropuerto de la Ciudad de México, principalmente entre el Aeropuerto de Toluca y el Aeropuerto de Santa Lucía, que son los que están considerados actualmente para conformar la red aeroportuaria

durante el mandato de este gobierno federal (2018-2024). Por el momento no se estarán desviando operaciones a CVJ el poco interés de las aerolíneas y personas como destino, su cercanía a un cerro y una pista de aterrizaje y despegue corta que no permite maniobrar de aviones de gran envergadura. En el caso de Puebla se corre un riesgo al desviar por su probabilidad de ceniza en el aire emanada por el volcán Popocatepetl. Ambos aeropuertos quedarán como aeropuertos secundarios del sistema para dar soporte en tiempo futuro.

Las operaciones aéreas serán clasificadas como se señalan a continuación:

- **Aerolínea bandera y alianzas:** *Aeroméxico* y alianza *Sky Team*
- **LCC:** aerolíneas de bajo costo como *Viva Aerobus*, *Interjet*¹ y *Volaris*
- **Resto de las aerolíneas:** las que no quepan en las clasificaciones anteriores.

Bajo las premisas anteriores, se proponen cuatro escenarios para realizar el análisis del flujo de operaciones.

4.3.1 Escenario 1

El escenario 1 será la reproducción del modelo con las condiciones actuales; es decir, la representación del sistema real corriendo en el modelo de simulación. Este modelo será la base para analizar los escenarios propuestos y validar la correcta configuración del modelo para los siguientes escenarios.

En la figura 4.3 se muestra la distribución aproximada de acuerdo con cada tipo de vuelos y la capacidad anual para cada uno de los aeropuertos.

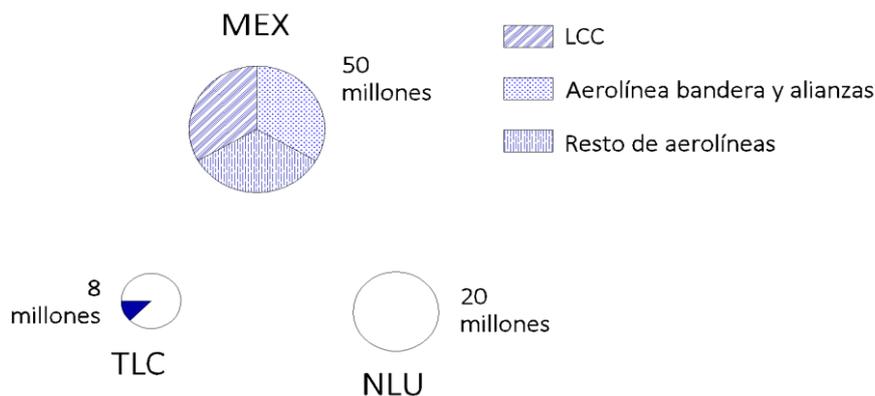


Figura 4.4 Modelo esquemático del escenario 1

Este flujo representa el número real de las operaciones que recibe el aeropuerto de la Ciudad de México y los picos de llegadas. Los resultados de la corrida del escenario 1 se pueden ver en la tabla 4.3.

¹ Datos que corresponden al año 2018, antes de que Interjet dejara de operar por quiebre de su modelo de negocio.

Tabla 4.3 Resultados del escenario 1

Escenario 1	CVJ	Promedio	0
		Máximo	0
		Observaciones	2904
	MEX	Promedio	9
		Máximo	39
		Observaciones	2904
	NLU	Promedio	0
		Máximo	0
		Observaciones	2904
	PBC	Promedio	0.1
		Máximo	4
		Observaciones	2904
	TLC	Promedio	0.1
		Máximo	2
		Observaciones	2904

El número de observaciones corresponde al número de vuelos que transitaron en todo el sistema. Este análisis se enfoca en el número máximo de llegadas para cada aeropuerto, este dato fue considerado como el pico máximo de operaciones.

Para el escenario 1 no hay desvío a NLU ni a CVJ, ya que también se encuentra en cero, no se encontraron registros en los datos descargados de vuelos que lleguen a CVJ.

4.3.2 Escenario 2

Para el escenario 2, se considera la concentración de los vuelos de la aerolínea bandera nacional en el NLU junto con las aerolíneas de la alianza *Sky Team Alliance*, a la que pertenece Aeroméxico. El resto de las aerolíneas se quedarán operando en MEX y el resto de los aeropuertos del sistema multi-aeropuerto operan con el mismo número de operaciones. La figura 4.4 representa esquemáticamente la atomización aérea del escenario 2.

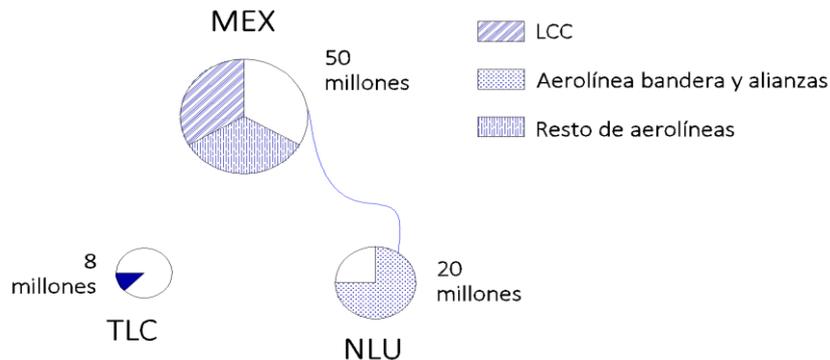


Figura 4.5 Modelo esquemático del escenario 2

Este flujo representa el número real de las operaciones que recibe el aeropuerto de la Ciudad de México y los picos de llegadas. Los resultados de la corrida del escenario 2 se muestran en la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Resultados del escenario 2

Escenario 2	CVJ	Promedio	0
		Máximo	0
		Observaciones	2904
	MEX	Promedio	6.9
		Máximo	34
		Observaciones	2904
	NLU	Promedio	2.1
		Máximo	14
		Observaciones	2904
	PBC	Promedio	0.1
		Máximo	4
		Observaciones	2904
	TLC	Promedio	0.1
		Máximo	2
		Observaciones	2904

Con la propuesta de este escenario se tiene un flujo de operaciones hacia el NLU con un pico máximo de 14 operaciones. El pico de operaciones del MEX disminuye a 34 operaciones en comparación con los 39 del escenario 1.

4.3.3 Escenario 3

Para el escenario 3 se considera lo opuesto al escenario 2, la concentración de los vuelos de la aerolínea bandera nacional en el MEX junto con las aerolíneas de la alianza *Sky Team*, a la que pertenece Aeroméxico. El resto de las aerolíneas se quedarán operando en el NLU y el resto de los aeropuertos del sistema multi-aeropuerto operan con el mismo número de operaciones. La figura 4.5 representa esquemáticamente la atomización aérea del escenario 3.

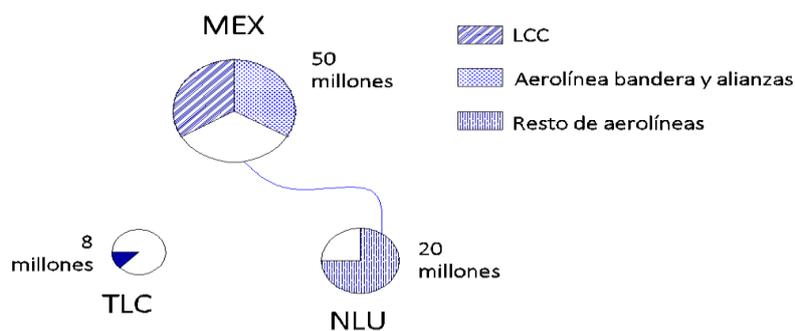


Figura 4.6 Modelo esquemático del escenario 3

Este flujo representa el número real de las operaciones que recibe el aeropuerto de la Ciudad de México y los picos de llegadas. Los resultados de la corrida del escenario 3 se muestran en la tabla 4.5.

Tabla 4.5 Resultados del escenario 3

Escenario 3	CVJ	Promedio	0
		Máximo	0
		Observaciones	2904
	MEX	Promedio	8.1
		Máximo	35
		Observaciones	2904
	NLU	Promedio	1
		Máximo	8
		Observaciones	2904
	PBC	Promedio	0
		Máximo	2
		Observaciones	2904
	TLC	Promedio	0.1
		Máximo	2
		Observaciones	2904

Para este escenario se desvían las operaciones al NLU, con un pico de llegadas de 8 vuelos y en este caso el MEX tiene hasta 35 vuelos de llegada. Las operaciones del PBC bajan a pico de 2 operaciones y el TLC queda con el mismo flujo de operaciones.

4.3.4 Escenario 4

Para el escenario 4, se considera el envío de todos los vuelos LCC al TLC. El resto de los vuelos se quedarán operando en los aeropuertos correspondientes, además se envió un porcentaje de vuelos al NLU, como destino opcional al MEX. La figura 4.6 representa esquemáticamente la atomización aérea del escenario 4.

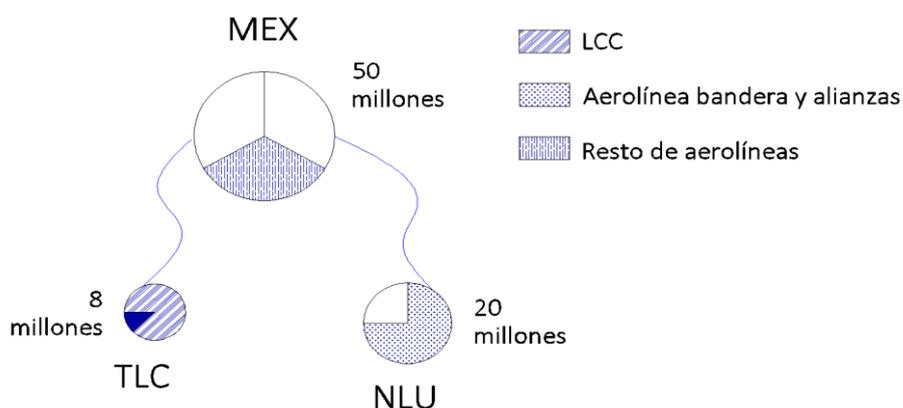


Figura 4.7 Modelo esquemático del escenario 4

Este flujo representa el número de las operaciones que recibe el aeropuerto de la Ciudad de México y los picos de llegadas. Los resultados de la corrida del escenario 4 se pueden ver en la tabla 4.6.

Tabla 4.6 Resultados del escenario 4

Escenario	CVJ	Promedio	0
		Máximo	0
		Observaciones	2904
	MEX	Promedio	3.2
		Máximo	19
		Observaciones	2904
	NLU	Promedio	2.1
		Máximo	13
		Observaciones	2904
	PBC	Promedio	0
		Máximo	2
		Observaciones	2904
	TLC	Promedio	3.8
		Máximo	18
		Observaciones	2904

Se observa que para la propuesta de desvío del escenario 4 que el pico de operaciones del MEX disminuyó a 19 operaciones, el NLU con hasta 13 operaciones y el TLC incrementan a 18 operaciones en su pico máximo.

Para este análisis fueron tomados cuatro escenarios, no obstante, se puede emplear la misma metodología para generar diversos escenarios de acuerdo con lo que se quiera analizar.

4.4 Análisis de la información

La información que se obtenga de las variables de las corridas de los escenarios será analizada para generar las soluciones de mejora para el sistema definido.

La información que se obtuvo de las corridas es:

ESCENARIO 1:

Las operaciones del aeropuerto de la Ciudad de México presentan picos de hasta 39 operaciones por hora, lo que excede la capacidad operativa del sistema (61 op/h) y pone en peligro la seguridad aérea y el confort del pasajero en el aeropuerto.

ESCENARIO 2:

El aeropuerto de Santa Lucía podría captar las operaciones de Aeroméxico y todas las aerolíneas que correspondan a la alianza de SKY TEAM (a excepción de Air France y Delta que ya se pronunciaron en contra de aterrizar en Santa Lucía), con hasta 14 operaciones/hora. El aeropuerto contaría con la capacidad de manejar esta demanda, además de liberar la saturación del aeropuerto de México hasta en un 15%.

ESCENARIO 3:

El aeropuerto de Santa Lucía puede captar todas las operaciones aéreas (incluyendo las privadas y militares), con hasta 8 operaciones/hora. El aeropuerto contaría con la capacidad de manejar estos números, además de liberar la saturación del aeropuerto de México en hasta un 15%.

ESCENARIO 4:

El aeropuerto de Toluca puede captar todas las operaciones LCC con hasta un pico de 18 op/h y con esto captaría el casi el 50% de operaciones y sus niveles de ocupación estarían a más del 100% en horas pico. El aeropuerto de Santa Lucía capta a Aeroméxico y las aerolíneas de la alianza SKY TEAM con picos de hasta 13 operaciones/hora. Finalmente, la Ciudad de México se quedaría con el resto de las operaciones aéreas, teniendo un factor de ocupación de más del 50% y una terminal 2 vacía.

Si bien se analizaron solo cuatro escenarios, por ser de mayor interés para este estudio, el generador de escenarios permite interactuar con el modelo y generar infinitos número de escenarios variando el porcentaje de desvío a diferentes aeropuertos del sistema metropolitano de aeropuertos. Cabe mencionar que por ser muy general no todos los escenarios en este ejemplo son viables, como es el caso de CVJ y PBC que ya se explicaron anteriormente.

4.5 Soluciones y propuestas

La solución o soluciones seleccionadas serán presentadas como propuestas para la implementación en el sistema real.

La opción operativa y de niveles de ocupación más viable para el sistema es el escenario 4, por manejar niveles de saturación equilibrados entre los tres aeropuertos involucrados en el sistema.

Al manejar más del 20% de operaciones el MEX, NJU y TLC, los tres se pueden considerar aeropuertos principales y se puede conservar al PBC y al CVJ como aeropuertos secundarios. Además, estos últimos podrían ser considerados a corto plazo como un área de oportunidad para crecimiento inmediato, por ser aeropuertos que ya cuentan con la infraestructura instalada.

La distribución de operaciones aéreas se puede llevar a cabo de forma congruente, ya que se están considerando a los tres principales *stakeholders*:

- **Controladores aéreos:** esta propuesta beneficia a los controladores aéreos, porque no está cambiando el espacio aéreo, pero sí faltaría que se distribuyeran correctamente las cargas en los nodos de entrada, para evitar riesgos en la operación aérea.
- **Aerolíneas:** las aerolíneas se beneficiarían al brindarle mayores espacios y áreas de oportunidad en cada aeropuerto, además de tener más holgura para incrementar el número de operaciones y ofertas de vuelo. Con todo esto se disminuye el riesgo de congestión operativa y con esto los retrasos en los vuelos.
- **Aeropuertos:** los aeropuertos brindarían más seguridad y confort al disminuir los picos de llegadas de la Ciudad de México y distribuyendo en el resto de los aeropuertos. Con esto se garantiza el uso de otros aeropuertos y se potencializan los niveles de confort de servicio al pasajero al ofrecer mejores espacios y menos riesgo de saturación y o retraso operacional.

De antemano se sabe que la base de datos representa el 90% de las operaciones aéreas que llegan a la Ciudad de México y los aeropuertos cercanos, y por una investigación poco profunda de las aerolíneas que no aparecen en la base de datos, varias de ellas corresponden a aerolíneas de carga, que en su mayoría operan durante la noche, por la naturaleza del negocio. En el caso de las operaciones de Air France, Nippon Airlines, etc., estas operaciones despegan y aterrizan en horarios pocos concurridos, mayormente después de las 12:00 am hasta antes de las 6:00 am. Por esta razón este segmento de operaciones no es necesario integrarlo al modelo de simulación, ya que sus llegadas o despegues no representan carga en los picos de operaciones ni su cambio de destino representa una verdadera descongestión para el aeropuerto de la Ciudad de México que ha sido el tema principal para evaluar en este proyecto.

La información de los picos de llegadas en los cuatro escenarios se condensa en una tabla para realizar un mejor análisis. El número que se muestra como *resultado*, se obtiene tomando en cuenta tanto llegadas como salidas, considerando que aproximadamente el 85% de los vuelos que llegan en cierta hora, también salen en el mismo intervalo de tiempo (o que se compensa con vuelos salientes que llegaron una hora antes). Del restante 15%, se considera que pueden salir en una hora posterior, por tiempos en tierra prolongados que no permiten cuantificarlos en el intervalo de la misma hora. Los

resultados se muestran en la tabla 4.7, en donde se pinta con el semáforo de saturación mostrado en el capítulo 3.

Tabla 4.7 Picos de llegadas por escenario

Aeropuerto	Capacidad		Llegadas/Hora							
	Real	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 4		
		Resultado	Ajustado	Resultado	Ajustado	Resultado	Ajustado	Resultado	Ajustado	
Ciudad de México (MEX)	61 op/h	39	72	34	63	35	65	19	36	
Cuernavaca (CVJ)	No especificado	0	0	0	0	0	0	0	0	
Puebla (PBC)	12 op/h	4	8	4	8	2	4	2	4	
Toluca (TLC)	34 op/h	3	6	2	4	2	4	18	34	
Santa Lucía (NLU)	66 op/h	0	0	14	26	8	16	16	30	

Con base en las corridas del modelo de simulación se sabe que la saturación del Aeropuerto de la Ciudad de México es un grave problema en 3 de los 4 escenarios propuestos al exceder el número de operaciones a su capacidad instalada. Una vez que se conocen los impactos de las operaciones, el incremento de los riesgos y las complicaciones económicas, la saturación del 120% representa mucho peligro y repercusiones para todos los *stakeholders*, sobre todo al entender que para que un aeropuerto pueda operar eficientemente es importante que opere la mayor parte del tiempo en semáforo verde.

Estos resultados apuntan a que operativamente es viable la dispersión aérea de algunas operaciones, sin embargo, no quiere decir que los *stakeholders* lo vean como una ventaja operacional.

En el caso del aeropuerto de CVJ la mayor parte del tiempo está libre, sin embargo, la posibilidad de enviar vuelos a ese aeropuerto ha sido explorada anteriormente por Volaris y Aerolíneas Internacionales (así se llamaba la aerolínea), no obstante, fue poco rentable por lo que no es una opción estratégicamente viable. En el caso del aeropuerto de PBC, seguiría operando al 30% de su capacidad; no obstante, se sabe que la seguridad operacional que ofrece sigue estando en riesgo a causa de su cercanía al volcán, aunque no es un factor dependiente para el desvío de operaciones aéreas.

En el caso del TLC, al menos en el escenario 4 se encontraría al límite de operaciones, lo que solo trasladaría el problema del aeropuerto de la Ciudad de México hacia a TLC, logrando objetivamente la descongestión del MEX, pero no es la opción más viable para mantener un sistema simbiótico y congruente. Se tienen que seguir buscando opciones de envío de aeronaves pequeñas, pero en menor número o al menos compartir operaciones con otros aeropuertos del sistema multi-aeropuerto cuando pueda enfrentar esos picos de saturación según sea el tipo de avión y la restricción de peso que aplique para su despegue.

En cuanto a la ocupación proyectada para el aeropuerto de Santa Lucía se está aprovechando al menos 50% de su capacidad instalada, lo que denota un área de oportunidad importante, teniendo en cuenta que el aeropuerto tendrá en pocos años

incluso mayor capacidad. El futuro operacional de este aeropuerto depende en gran medida de las políticas y la decisión de quien de los dos, el de Santa Lucía o el de la Ciudad de México será el aeropuerto principal de México.

Finalmente, en tan solo uno de los cuatro escenarios se logró el objetivo de liberar la saturación aérea de la Ciudad de México; por lo que el escenario 4 será la mejor configuración del TMA y de atomización aérea del sistema multi-aeropuerto de la Ciudad de México.

A pesar de que para este caso estudio solo se analizaron cuatro de los bastos escenarios que se podrían correr en el modelo de simulación, se decide que desviar operaciones a TLC y a NLU en distintos porcentajes, libera la saturación de MEX, optimiza el uso de las instalaciones de esos aeropuertos y se construye el concepto de *sistema multi-aeropuerto* para atender la demanda de vuelos en la Ciudad de México.

Además, esta herramienta es útil para analizar los niveles de saturación al desviar porcentaje de operaciones aéreas en el sistema multi-aeropuerto. Se podrían emular problemas en algún aeropuerto y que no pueda operar a su máxima capacidad o bien, para analizar cómo se comportarían los niveles de saturación en caso de que un aeropuerto no sea capaz de operar en algún instante y se tengan que distribuir las operaciones a distintos aeropuertos cercanos.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

En aeropuertos saturados, como es el caso del aeropuerto de la Ciudad de México, una opción que vale la pena analizar es desviar parte de las operaciones aéreas a aeropuertos cercanos. La motivación de este trabajo es analizar la viabilidad del posible desvío de operaciones aéreas de MEX a aeropuertos del sistema metropolitano de aeropuertos, de acuerdo con las estrategias logísticas internacionales que han mostrado en la práctica resolver problemas de saturación y que México puede tomar de ejemplo en el desarrollo integral de sus proyectos de aviación y rutas comerciales. Este estudio de viabilidad se llevó a cabo mediante un modelo de simulación de eventos discretos en Simio.

El análisis de la desviación del tránsito aéreo para resolver problemas de saturación exige la negociación con todos los *stakeholders*, así como mostrar los beneficios operativos y el aumento en la calidad del servicio dentro de los aeropuertos para los pasajeros. En todo caso, es necesario realizar un macro estudio sobre las preferencias de los pasajeros para asegurar el éxito antes de desviar las operaciones aéreas. Evidentemente, son los intereses políticos, así como los intereses económicos de los viajeros, los que concentran las operaciones en el aeropuerto de la Ciudad de México.

El control aéreo y la gestión de cada aeropuerto, las vías de comunicación con los principales destinos de negocios y turísticos, además del marketing y la competitividad de las aerolíneas, son aspectos que necesitan ser tomados en consideración para determinar la viabilidad de escenarios alternativos operativamente; no obstante, los resultados de este estudio de simulación reflejan una directriz estratégica y probablemente política para encaminar los esfuerzos a favor de equilibrar las operaciones de vuelos en México y el resto del país.

Durante el desarrollo de este proyecto, tema de gran auge actualmente, se llegó a conocer la fecha de apertura planeada del aeropuerto de Santa Lucía, así como la concretización de la inclusión de los aeropuertos de MEX, NLU y TLC dentro de un sistema de aeropuertos en el centro del país. Lo anterior confirma las hipótesis hechas desde el inicio de este proyecto y la posibilidad de crear un sistema multi-aeropuerto que pueda interactuar en tiempo real con las necesidades de vuelos; por supuesto, teniendo en cuenta los principales factores técnicos y de factibilidad económica en el resto de los aeropuertos del sistema y la constante inyección de capital al aeropuerto de Santa Lucía. En cuanto a qué aeropuertos deberían de hacer sinergia y conformar un sistema multi-aeropuerto, por ahora se podría comenzar solidificando la relación entre MEX, NLU y TLC, operando los tres como aeropuertos primarios.

Un correcto modelado conceptual es el primer paso hacia una mejor interpretación de la realidad en modelos de simulación. El modelado conceptual del sistema multi-aeroportuario de la Ciudad de México es el primer acercamiento para simular el comportamiento actual de los vuelos y es el arranque para la corrida del resto de los

escenarios. Una simplificación adecuada es la clave para integrar los elementos indispensables en el modelo, sin sacrificar la precisión requerida para presentar la situación real. Las herramientas de simulación permiten analizar un sistema complejo, previo a la implementación de determinadas medidas de control en la vida real, convirtiéndolo en un método viable y seguro para analizar propuestas de optimización en el uso de los recursos aeroportuarios y del espacio aéreo. Especialmente en el sector de la aviación cada vez más congestionado, las malas decisiones pueden ser muy costosas y los posibles cambios en la administración del espacio aéreo deben abordarse con mucha precisión, por lo que definir escenarios de interés, y obtener el más viable de ellos, es el primer paso para desarrollar un plan maestro de respuesta.

El modelo de simulación usado en este estudio fue implementado en SIMIO®. Se integró en el modelo la caracterización de los datos de vuelo de un período de alrededor de 3 meses a inicios de 2018. Los escenarios seleccionados analizan la opción de atomización que, a corto plazo, muestre los niveles de saturación más bajos en cada aeropuerto del sistema, poniendo un especial énfasis en la disminución de la saturación en el aeropuerto de la Ciudad de México. Además de los 4 escenarios generales planteados, el usuario puede usar el generador de escenarios para detallar el porcentaje de vuelos desviados a cada aeropuerto, si lo considera pertinente.

El modelo de simulación da algunas opciones de desvío (todas ellas sustentadas en la teoría), de tal manera que se logre un sistema equilibrado entre la seguridad operativa y el manejo adecuado en tierra; sin embargo, al ser una simulación se simplifica la realidad y no es posible integrar todas las variables, por lo cual se eligen estratégicamente aquellas variables que aporten al objetivo principal de la simulación.

Para evaluar la viabilidad de los resultados, se implantó un semáforo de saturación, en donde el color rojo indica un aeropuerto sobresaturado, el color amarillo indica un aeropuerto saturado, y el color verde corresponde a un aeropuerto operable (cantidad de operaciones de respectivamente $< 80\%$, entre 80 y 95% , y $> 95\%$). El color del semáforo será el criterio de viabilidad de los escenarios y los niveles de ocupación para cada uno de los aeropuertos, mediante los KPIs evaluados en el modelo: vuelos de llegada a cada aeropuerto, número de vuelos en cada ruta, niveles de saturación de cada aeropuerto y capacidad de recepción de vuelos en los aeropuertos. Estos indicadores son la clave del modelo para proponer la distribución del tránsito aéreo en el sistema metropolitano de aeropuertos de la Ciudad de México antes de su puesta en marcha en la vida real.

Este proyecto es la antesala para que cualquier base de datos, con las características que se mencionan aquí, pueda ser cargada en el modelo, y, a partir de ello, se pueda simular otras opciones de atomización aérea en el TMA propuesto.

Trabajos futuros

Las actividades por realizar en un futuro son proponer escenarios más precisos que puedan dejar en semáforo verde a todos los aeropuertos que integran el sistema. Además, se podrían integrar los tiempos en tierra de cada uno de los aviones (turn around time), tiempos de vuelo, tiempo variable para despegue o aterrizaje, para saber con precisión en qué momento salen y el factor de ocupación de las pistas de aterrizaje y despegue, así como el uso de las puertas de embarque de cada aeropuerto. Además de agregar variables para el tamaño del avión, la velocidad de vuelo y algunos factores climáticos que podrían afectar en la vida real.

El siguiente paso para la mejora de la simulación, es crear el ambiente para que su base de datos se actualice de forma automática a las páginas oficiales de aviación para evitar de esta manera la descarga y el tratamiento de los datos previo a su integración a SIMIO®. De esta manera el modelo simulado podría tomar decisiones en tiempo real y considerar la posibilidad de desvío de las operaciones aéreas.

Adicionalmente, se pueden analizar otros KPIs para medir los niveles de saturación no solo de los aeropuertos, también en el ingreso de cada uno de los VOR, y el congestionamiento aéreo y niveles de seguridad con base en la distancia entre las aeronaves en ruta de acuerdo con el tamaño del avión y la velocidad a la que viaja. Estas son las principales áreas de oportunidad identificadas para la mejora del modelo de simulación.

Referencias

- Aerolíneas mexicanas (2020). *Historia de Mexicana de Aviación*.
<https://aerolineasmexicanas.com.mx/mexicana-de-aviacion/>
- Agusdinata, B. y de-Klein, W. (2002). *The dynamics of airline alliances*. *Journal of Air Transport Management* 8, 201-211.
- AIT (2020). *Historia del aeropuerto de Toluca*.
<https://aeropuertodetoluca.com.mx/corporativo-historia>
- ASA (2006). *Libro blanco. Programa de Atención a la Demanda de Servicios Aeroportuarios en el Centro del País*. Aeropuertos y Servicios Auxiliares. Coordinación de las Unidades de Negocios. <http://www2.asa.gob.mx/ServletRepositorio?id=95>
- ASA, 50 años.
- AICM (2020). *Estadística del AICM, Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México*.
<https://www.aicm.com.mx> [ingresado el 23 de enero de 2020]
- AIP (2019). *AIP México*. Servicios a la Navegación del Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM). DGAC [ingresado el 14 de noviembre de 2019]
- AIRBUS (2016). *Operations. Wake vortices. Safety first #21*. January, 2016.
https://safetyfirst.airbus.com/app/themes/mh_newsdesk/pdf.php?p=22690
[ingresado el 14 de febrero de 2020]
- ALN News (2014). *La línea de tiempo de la aviación*. IATA Publication.
<https://aerolatinnews.com/cien-anos-de-la-aviacion/la-linea-del-tiempo-en-la-aviacion/>
- ALN News (2019). *CAPA: Por saturación del AICM, conexiones aéreas podrían irse de México*.
<https://aerolatinnews.com/destacado/capa-por-saturacion-del-aicm-conexiones-aereas-podrian-irse-de-mexico/>
- ASA (2006). *Aeropuertos para la competitividad y desarrollo*. Colección editorial del gobierno del cambio, ASA-México, 299.
- Banco Mundial (2019). *Pasajeros transportados en México*.
<https://datos.bancomundial.org/indicador/IS.AIR.PSGR?end=2018&locations=MX&start=1970&view=chart>
- BBC (2018). *Cuáles son los aeropuertos más conectados del mundo (y en qué lugar se ubican los de América Latina)*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-45595523>
[ingresado el 26 de enero de 2020]
- Belda, C. F. y Grande, E. U. (2009). *Los modelos de simulación una herramienta multidisciplinar de investigación*. *Encuentros multidisciplinares* 11 (32). ISSN 1139-9325, 37-48.
- Bermúdez L. T. y Carreño D. A. (2011). *Hacia el uso de la simulación como herramienta para el análisis de proyectos de inversión*. *Revista de Investigación Desarrollo e Innovación* 1 (2), 40-52. ISSN: 2027-8306.

- Bintaned, M. A. (2014). *Historia de la aviación comercial desde 1909 hasta nuestros días* [tesis de doctorado, Facultad de Filosofía y Letras. Universitat de les Illes Balears]. Repositorio institucional: http://dspace.uib.es/xmlui/bitstream/handle/11201/149004/Bintaned_Ara_Martin.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Bonnefoy, P. A. (2008). *Scalability of the Air Transportation System and Development of Multi-Airport Systems: A Worldwide perspective* [tesis de doctorado, Massachusetts Institute of Technology].
- Bonnefoy, P. A., de Neufville, R. y Hansman, R. J. (2010). *Evolution and Development of Multi-Airport Systems: World Perspective*. *Journal of Transportation Engineering* 13, 1021-1029.
- Brunner, J. O. (2014). *Rescheduling of flights during ground delay programs with consideration of passenger and crew connections*. *Transportation Research Part E* 72, 236–252. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.10.004>
- Bustos, A. S. (2017). *Elaboración de cartografía aeronáutica de navegación visual*. *Revista Mapping*, 26(185), 16-22. ISSN: 1131-9100
- Canseco, A. D. G., Zuñiga, C. A. y Blanco M. L. (2015). *Strategic analysis of Mexico's low-cost airlines development*. *Novia Scientia*, 7 (15), 343-363. ISSN: 2007-0705.
- CANSO (2015). *Recommended key performance indicators for measuring ANSP operational performance*. <https://www.canso.org/sites/default/files/RecommendedKPIforMeasuringANSOperationalPerformance.pdf>
- Cantera, S. (2018). *Operar en aeropuertos alternos duplica el gasto para las aerolíneas*. *El Universal*. <https://www.eluniversal.com.mx/cartera/finanzas/operar-en-aeropuertos-alternos-duplica-el-gasto-para-las-aerolineas-canaero> [ingresado el 26 de septiembre de 2018]
- Cantú-González, J. R., Guardado, M.C. y Balderas, J. L. (2016). *Simulación de procesos, una perspectiva en pro del desempeño operacional*. *Revista iberoamericana de producción académica y gestión educativa* 4. ISSN 2007-8412.
- Casanueva, C., Gallego, A., Castro, I. y Sancho, M. (2014). *Airline alliance: mobilizing network resources*. *Tourism Management* 44, 88-98. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tourman.2014.02.011>
- Castellanos, J. (2017). *Aviación en México genera 2.9% del PIB nacional: IATA*. A21 website: <https://a21.com.mx/aeropuertos/2017/05/15/aviacion-en-mexico-genera-29-del-pib-nacional-iata> [ingresado el 15 de mayo de 2017]
- Chatterji, G.B. y Sridhar, B. (2004). *National airspace system delay estimation using weather weighted traffic counts*. AIAA Guid., Navig. Contr. Conf., San Francisco, CA.

- Chías, J. L. (1981). *Desarrollo histórico de la aviación comercial mexicana*. Invest. Geo. 11, 263-276. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46111981000100010&lng=es&nrm=iso
- Cohas, F. (1993). *Market share model for a Multiairport system*. Massachusetts Institute of Technology. Flight Transportation Laboratory Report R 93-2
- Dávila, I. (2019). *Inicia gobierno federal compra accionaria de aeropuerto de Toluca*. La Jornada website: <https://www.jornada.com.mx/ultimas/economia/2019/08/15/inicia-gobierno-federal-compra-accionaria-de-aeropuerto-de-toluca-4663.html> [ingresado el 15 de agosto de 2019]
- De Neufville (1995). *Amsterdam Multi-airport System, Policy Guidelines*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA.
- De Neufville (2013). *Airport Systems Planning, Design, and Management*. McGraw-Hill, 2nd edition. ISBN 978-0071770583.
- Doganis, R. (1995). *La empresa aeroportuaria*. Paraninfo. ISBN 978-84-283213-9-6, 257p.
- Donaldson, A. D. y Hansman, R. J. (2010). *Capacity improvement potential for the New York Metroplex System*. Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference. <https://doi.org/10.2514/6.2010-9285>
- Ehliar, L. J. y Wagner, T. (2016). *Key performance indicators of the evaluation of an air navigation service provider's safety management system*. Department of Science and Technology. Linköping University. LiU-ITN-TEK-G--16/002--SE
- Eurocontrol (2003). *Eurocontrol Manual for Airspace Planning – Common guidelines*. Vol. 2. European organization for the safety of air navigation. European Air Traffic Management. ASM.ET1.ST03.4000.EAPM.02.02.
- Expansión (2019). *La saturación del AICM dificulta la operación de los vuelos largos, dice la IATA*. <https://expansion.mx/empresas/2019/08/27/la-saturacion-del-aicm-dificulta-laoperacion-vuelos-largos> [ingresado el 27 de agosto de 2019]
- FAA (2020). *Aeronautical Chart's user guide*. Aeronautical Information Services, Federal Aviation Administration.
- Flightfrom (2020). <https://www.flightsfrom.com/MEX> [ingresado el 27 de marzo de 2020]
- Flightradar (2019). <https://www.flightradar24.com/> [ingresado el 14 de febrero de 2020]
- FORBES (2019). *Gobierno presenta propuesta para comprar acciones de Aeropuerto de Toluca*. <https://www.forbes.com.mx/gobierno-presenta-propuesta-para-comprar-acciones-de-aeropuerto-de-toluca/> [ingresado el 15 de agosto de 2019]
- Flores, Z. (2020). *Terminal 3 del AICM, sin recursos del presupuesto de egreso de la federación 2020*. El Financiero website: <https://www.elfinanciero.com.mx/economia/gobierno-omitio-asignar-presupuesto-para-construir-terminal-3-del-aicm> [ingresado el 14 de enero de 2020]

- Foro consultivo (2018). *Opciones para solucionar la saturación del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México*. INCYTU, 2018. www.foroconsultivo.org.mx [ingresado el 24 de enero de 2020]
- Galindo López, D. y Nava Figueroa, B. (2011). *El sistema metropolitano de aeropuertos a seis años de su establecimiento*, Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres A.C. (AMIVTAC). México, 157.
- GOB (2005). *Memoria de obras 2005*. Secretaría de Gobernación website: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/67607/Infraestructura_aeropuerto_uaria_2005.pdf
- GOB (2019). *Presidente López Obrador presenta proyecto de nuevo Sistema Aeroportuario de la Ciudad de México*. Gobierno de México. Comunicado 248.
- González, E. E. (2007). *La teoría de los stakeholders. Un puente para el desarrollo práctico de la ética empresarial y de la responsabilidad social corporativa*. Veritas II (17), 205-224.
- González, E. y Rivera, R. (2019). *La conectividad aérea, el nuevo reto de México*. Milenio website: <https://www.milenio.com/tianguis-turistico/la-conectividad-aerea-el-nuevo-reto-de-mexico> [ingresado el 05 de abril de 2019]
- Gordoa, I. (2016). *El ABC del Sistema Metropolitano de Aeropuertos; conectividad en México*. Excelsior website: <https://www.excelsior.com.mx/comunidad/2016/05/14/1092523> [ingresado el 14 de mayo de 2016]
- Guash, A., Piera, M. A., Casanovas, J. y Figueras, J. (2003). *Modelado y simulación. Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios*. Universitat Politècnica de Catalunya. ISBN: 978-84-8301-704-3.
- Hamzawi, S. G. (1992). *Lack of airport capacity: Exploration of alternative solutions*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 26(1), 47–58. [https://doi.org/10.1016/0965-8564\(92\)90044-8](https://doi.org/10.1016/0965-8564(92)90044-8).
- Herrera García, A. (2001). *Simulación de operaciones aeroportuarias. El caso de despegues y aterrizajes en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Querétaro. IMT
- Herrera García, A. (2014). *Evaluación de una nueva estrategia de atención a los despegues y aterrizajes en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, para reducir los costos de operación de las aeronaves y las demoras de los pasajeros*. Ingeniería Investigación y Tecnología XV (1), 51-61.
- Herrera García, A. (2017). *Alternative solutions to airport saturation*. International Transport Forum. Discussion paper 28. Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México.

- Hispadrones (2019). *Clases de espacio aéreo*. 24 de septiembre de 2019. <https://www.hispadrones.com/principiantes/aprendizaje-consejos/clases-de-espacio-aereo/>
- IATA (1995). *Airport development reference manual*. International Air Transport Association, Montreal. ISBN 92-9035-729-0.
- IATA (2019). *Mayor conectividad y eficiencia*. Estadística del transporte aéreo mundial 2018. Comunicado no. 45. Montreal, 31 de julio de 2019.
- ICAO (2009). *Cartas aeronáuticas. Anexo 4 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional*. 11ª edición. Normas y métodos, recomendaciones internacionales. Organización de Aviación Civil Internacional. ISBN 978-92-9231-364-7.
- ICAO (2017). *Wake turbulence separation in RVSM airspace*. Third meeting ATM SG/3-WP/27. Cairo, Egypt, 22-25 may 2017.
- ICAO (2020). *Effects of Novel Coronavirus (COVID-19) on Civil Aviation: Economic Impact Analysis*. Montreal, Canada. Air Transport Bureau, 20 de julio de 2020. https://www.icao.int/sustainability/Documents/COVID-19/ICAO_Coronavirus_Econ_Impact.pdf
- INEGI (2019). *Población*. <https://www.inegi.org.mx/temas/estructura/>
- Infobae (2019). *Una pesadilla llamada AICM: en 2019 aumentaron 52% los aterrizajes abortados*. <https://www.infobae.com/america/mexico/2019/08/12/una-pesadilla-llamada-aicm-en-2019-aumentaron-52-los-aterrizajes-abortados/> [ingresado el 12 de agosto de 2019]
- International Airport Council (2018). *ACI World publishes annual World Airport Traffic Report*. <https://aci.aero/news/2018/09/20/aci-world-publishes-annual-world-airport-traffic-report/> & https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_busiest_airports_by_passenger_traffic
- ISO (2017). *The future of airports*. <https://www.iso.org/news/2017/01/Ref2154.html> [ingresado el 14 de febrero de 2020]
- Jimenez, E. y Claro, J., (2017). *Dynamic evolution of European airport system in the context of Low-Cost Carriers growth*. *Journal of Air Transport Management* XXX, 1-9.
- John Koo, T., Ma, Y., Pappas, G. y Tomlin, C. (1997). *SmartATMS : A simulator for air traffic management systems*. *Proceedings of Winter Simulation Conference*.
- Liu, J., Yu, Y., Zhang L. y Nie, C. (2011). *An overview of conceptual model for simulation and its validation*. *International Conference on Advances in Engineering*. *Procedia Engineering* 24, pp. 152-158. ScienceDirect.
- Logtenberg, A. (2014). *Catchment Area Research. Spillover consequences for the Amsterdam Schiphol Catchment Area*. *Amsterdam University of Applied Sciences*. School of Technology Aviation Management Research Department.

- López Obrador (2019). *Aeropuerto Internacional de Santa Lucía*. https://lopezobrador.org.mx/wp-content/uploads/2018/08/AISL_P05-11X17_ALL-04.pdf
- Manufactura (2018). *Los pros y los contras de Santa Lucía para funcionar como aeropuerto civil*. <https://manufactura.mx/industria/2018/10/30/los-pros-y-contras-de-santa-lucia-para-funcionar-como-aeropuerto-civil> [ingresado el 30 de octubre de 2018]
- Martín, J. C. y Voltes-Dorta, A. (2011). *The dilemma between capacity expansions and multi-airport systems: Empirical evidence from the industry's cost function*. *Transportation Research Part E* 47, 382-389 <https://doi.org/10.1016/j.tre.2010.11.009>
- Mendoza E., Zuñiga C. y Martínez J. (2014). *Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México "Benito Juárez": revisión histórica de un problema recurrente de saturación*. *Revista de investigación e Innovación en Ingeniería*. pp. 6-17. Universidad Simón Bolívar. Barranquilla, Colombia. ISSN: 2344-8652.
- MITRE (2018). *El futuro aeroportuario de la Ciudad de México y MITRE*. <https://www.mitre.org/el-futuro-aeroportuario-de-la-ciudad-de-m%C3%A9xico-y-mitre> [ingresado el 20 de noviembre de 2018]
- Molina, M., Carrasco, S. y Martin, J. (2014). *Agent-Based Modeling and Simulation for the Design of the Future European Air Traffic Management System: The Experience of CASSIOPEIA*. *International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems*, 22-33.
- Morrish, S. C. y Hamilton, R.T. (2002). *Airline alliances-who benefits?* *Journal of Air Transport Management* 8, 401-407.
- Murrillo Dias, O. (2019). *Air transportation in Brazil: Guarulhos International Airport*. *South Asian Research Journal of Business and Management* 1(4). ISSN 2664-6757. <https://doi.org/10.36346/sarjbm.2019.v01i04.004>
- Nlarenas (2018). *México, Sao Paulo, Bogota y Panamá entre los principales hub del mundo*. <https://www.nlarenas.com/2018/09/mexico-sao-paulo-bogota-y-panama-entre-los-principales-hub-del-mundo/> [ingresado el 14 de febrero 2018]
- O'Connell, J. F., Williams, G. (2005). *Passengers' perceptions of low cost airlines and full service carriers: A case study involving Ryanair, Aer Lingus, Air Asia and Malaysia Airlines*. *Journal of Air Transport Management* 11, 259-272. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2005.01.007>
- OACI (2013). *Necesidad e idoneidad de la solución propuesta para el nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México*. Dirección de cooperación técnica proyecto MEX/13/801.
- OACI (2019). *ICAO Aerodrome Reference Code*. https://www.skybrary.aero/index.php/ICAO_Aerodrome_Reference_Code

- ObrasWeb (2019). *La renovación del Aeropuerto de la CDMX se verá en un año, promete el GACM*. <https://obrasweb.mx/infraestructura/2019/08/12/la-renovacion-del-aeropuerto-de-la-cdmx-se-vera-en-un-ano-promete-el-gacm> [ingresado 12 de agosto de 2019]
- Oum, T. H. y Park, J. H. (1997). *Airline alliances: current status, policy issues, and future directions*. *Journal of Air Transport Management* Vol. 3, 133-144.
- Pazos, F. (2018). *Aeropuerto de Toluca, los costos de una falta de política aeronáutica*. A21 website: <https://a21.com.mx/aeropuertos/2018/10/24/aeropuerto-de-toluca-los-costos-de-una-falta-de-politica-aeronautica> [ingresado el 24 de octubre de 2018]
- Pels, E., Njegovan, N. y Behners, C. (2009). *Low-cost airlines and airport competition*. *Transport Research Part E* 45, pp. 335-344.
- Playersoflife (2020). *Recibirá Aeropuerto de Guadalajara millonaria inversión*. http://playersoflife.com/guadalajara/guadalajara/aeropuerto-de-guadalajara-tendra-t2-y-nueva-pista/?fbclid=IwAR2kKCiCOhdUv8VkegJHulp8U2Sb1Y95aEVRrr5O8gz7oh4Klo_xbnyNpwU [ingresado el 5 de febrero de 2020]
- Proceso (2019). *La SCT va por reactivación del Aeropuerto de Toluca*. Proceso website: <https://www.proceso.com.mx/596159/la-sct-va-por-reactivacion-del-aeropuerto-de-toluca> [ingresado el 15 de agosto de 2019]
- Quirós, F. J. (2016). *Análisis de la estrategia competitiva de las líneas aéreas europeas*. Escuela Universitaria de Estudios Empresariales, Universidad de Sevilla.
- Riobóo, J.M. y Samaniego, S.R. (2017). *Sistema Aeroportuario del Valle de México*. 1st edition. Cd.de Méx: Porrúa/UAM.
- Robinson, S. (2011). Choosing the right model: conceptual modeling for simulation. *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*, 1428-1440.
- Rocha, M. C. y Hansman, R. J. (2018). *Identification, characterization, and prediction of traffic flow patterns in Multi-Airport Systems*. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*. <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2833452>
- Rodríguez, F. J. (2017). *Estudio y análisis de los sistemas multi-aeropuerto. El caso del área de Barcelona* [tesis de fin de grado, Escuela técnica superior de Ingeniería, Sevilla]
- Santiago T., Wellens A. and Segura E. (2019). *Exploratory analysis of the turnaround time in Mexican airports*. *Proceedings of the 2019 MULTILOG Conference*, pp. 172-178.
- Schaar, D. y Sherry, L. (2010). *Analysis of airport stakeholders*. 2010 Integrated Communications, Navigation, and Surveillance Conference Proceedings. <https://doi.org/10.1109/icsurv.2010.5503233>
- SCT (2016). *Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México*. <http://aeropuerto.gacm.mx/2018/aeropuerto/doc/pdf/naicm-interiores-vf.pdf>

- SCT (2019). *50 años de Aeropuertos y Servicios Auxiliares, Manuel Ruiz Romero*. Gobierno de la República. <http://www.aerocivil.gov.co/Potada/revi.pdf>
- SCT (2020). *Estadísticas 2019*. <http://www.sct.gob.mx/transporte-y-medicina-preventiva/aeronautica-civil/5-estadisticas/>
- Sidiropoulus, S., Majumdar, A. y Han, K. (2018) *A framework for the optimization of terminal airspace operations in Multi-Airport System*. *Transportation Research Part B* 110, 160-187.
- SIMIO (2017). <https://www.simio.com>
- Transponder (2020). *Análisis del piloto: impacto y medidas de recuperación ante pandemia COVID-19*. Transponder website: <https://www.transponder1200.com/analisis-del-piloto-impacto-y-medidas-de-recuperacion-ante-la-pandemia-covid-19/> [ingresado el 22 de mayo de 2020]
- Takebayashi, M. y Ishikura, T. (2013). *Impact of Low Cost Carriers and Multiple Airport System*. *Asian Transport Studies*, 2(3), 309-322.
- Todorov, T. y Petrov, P. (2017). *Measuring the efficiency of air traffic management systems*. MATEC Web Conference 133, 01004 (2017). *Bul-Trans*. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201713301004>
- Valadez, R. (2019). *CDMX, ejemplo de... deficiencia en aeropuertos: IATA*. Milenio website: <https://www.milenio.com/negocios/cdmx-ejemplo-de-deficiencias-en-aeropuertos-iata> [ingresado el 03 de junio de 2019]
- Valadez, R. (2020). *Pese a saturación del AICM, no 'despega' aeropuerto de Toluca*. Milenio website: <https://www.milenio.com/negocios/pese-saturacion-aicm-despega-aeropuerto-toluca> [ingresado el 14 de febrero de 2020]
- Villanueva, D. (2019). *IATA: es inviable el esquema de los tres aeropuertos*. *La Jornada* website: <https://www.jornada.com.mx/ultimas/2019/03/01/iata-es-inviable-el-esquema-de-los-tres-aeropuertos-2461.html> [ingresado el 10 de marzo de 2019]
- Villanueva, D. y Dávila I. (2019). *Afinan plan para crear una red aeroportuaria en el centro del país*. *La jornada* website: <https://www.jornada.com.mx/2019/08/16/economia/020n1eco> [ingresado el 16 de agosto de 2019]
- Wellens, A. y Mujica Mota, M. (2017). *Simulation of the Mexican airport network for addressing a ground delay program*. *Proceedings 29th European Modeling & Simulation Symposium, Barcelona, Spain*, 423-431. ISBN 978-88-97999-850.
- Zuñiga, C., Mujica Mota, M. y Herrera García, A. (2016). *Analyzing airport capacity by simulation: a Mexican case study*. In A. Ochoa-Zezzatti, J. Sanchez, M. G. Cedillo-Campos (Eds.), *Handbook of research on military, aeronautical, and maritime logistics and operations*, 115-150. Hershey, PA: IGI Global.

Zuniga, C., Wellens, A. y Brambila, K. (2019). *Are Mexican low-cost airline routes feasible to be diverted from Mexico City to Toluca airport?* Proceedings of the 2019 MULTILOG conference, 166-171.

Lista de acrónimos

Acrónimo	Significado
AICM	Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México
ASA	Air Service Agreement
ATZ	Aerodrome Traffic Zone (tiene forma de cilindro con un radio de 5 millas +/- 8 km)
ATM	Air Traffic Management (Administración del Tránsito Aéreo)
ATFCM	Air Traffic Flow and Capacity Management
ATS	
AWY	Aerovías
CTA	Control Traffic Area
CTR	Controlled Traffic Region, está a cargo del controlador aéreo y sus límites varían de acuerdo a cada aeropuerto
CVJ	Aeropuerto Internacional de Cuernavaca
IATA	Asociación Internacional del Transporte Aéreo
ICAO	Organización de Aviación Civil Internacional
ILS	Instrument Landing System
KPI	Key Performance Indicators
LCC	Low Cost Carrier
MAS	Sistema Metropolitano de Aeropuertos
msnm	Metros sobre el nivel del mar
NAICM	Nuevo Aeropuerto de la Ciudad de México
NLU	Aeropuerto Internacional de Santa Lucía
NM	Millas náuticas equivale a 1.852 km
PBC	Aeropuerto Internacional de Puebla
PIB	Producto Interno Bruto
QRO	Aeropuerto Intercontinental de Querétaro
RWY	Runway (pista de aterrizaje)
TFM	Traffic Flow Management
TLC	Aeropuerto Internacional de Toluca
TMA	Terminal Manouvering Area
TWR	Torre de Control que protege a los VFR
VFR	Área de operación aérea debajo de los 300m de altitud o 1000 pies(es para vuelos no controlados)
VOR	Very High Frecuency
VPN	Área de operación aérea arriba de los 300m de altitud