

Octubre
2018

**Análisis preliminar basado en simulación de
capacidad operacional para las posibles
configuraciones operativas del sistema
aeroportuario MEX-NLU.**

Informe Técnico Preliminar
Nº 181002 - Rev. 00

**Grupo Multidisciplinario
de Investigación en Infraestructura y Transporte Aéreo**



ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. TEMA	3
2. OBJETIVO	3
3. ALCANCE	3
4. MARCO DE DESARROLLO	3
4.1. SISTEMA AEROPORTUARIO ANALIZADO	3
4.2. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS	5
4.3. CONDICIONES DE CONTORNO	9
4.4. HIPÓTESIS DE TRABAJO Y CRITERIOS DE ANÁLISIS	10
EL ANÁLISIS SE REALIZA PARTIENDO DE LAS SIGUIENTES CONSIDERACIONES GENERALES:	10
5. RESULTADOS	10
5.1. CASOS DE ANÁLISIS	18
5.1.1. Conclusiones, sugerencias y trabajo futuro	20
6. DOCUMENTACION DE REFERENCIA	21

RESPONSABLES TÉCNICOS

DR. MIGUEL MUJICA MOTA, GRUPO DE SIMULACION, ACADEMIA DE AVIACION, AMSTERDAM UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES, THE NETHERLANDS

MSA. ING. ALEJANDRO DI BERNARDI, GRUPO TRANSPORTE AÉREO, DEPARTAMENTO DE AERONAUTICA, UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA, ARGENTINA

M.I. PAOLO SCALA, DEPARTAMENTO DE LOGISTICA, AMSTERDAM UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES, THE NETHERLANDS

1. TEMA

Análisis preliminar mediante simulación operacional del nivel de capacidad para las posibles configuraciones operativas del sistema aeroportuario MEX-NLU.

2. OBJETIVO

Obtener un intervalo preliminar de la capacidad potencial operativa para el sistema aeroportuario MEX-NLU tomando en cuenta el espacio aéreo y el espacio terrestre en su conjunto.

Identificar potencial de capacidad operativa en base a las características técnicas actuales de NLU así como tomando en consideración la mezcla de tráfico aéreo.

Plantear diferentes escenarios de evolución del sistema con base al tipo de tráfico esperado y los modelos de negocio de las aerolíneas existentes.

Evaluar las potenciales ventajas y/o desventajas comparativas entre los diferentes escenarios planteados.

3. ALCANCE

El presente documento comprende un análisis técnico, de carácter general y preliminar, de diferentes escenarios operacionales del sistema aeroportuario MEX-NLU con el fin de determinar los intervalos operacionales que podría alcanzar dicho sistema respetando todas las normas de seguridad operacional en un contexto de cumplimiento de la normativa OACI de aplicación.

En una etapa posterior, no incluida en el presente estudio, se simulará a mayor detalle las plataformas y calles de rodaje de NLU para verificar que la operación cumpla según los márgenes de seguridad operacional estipulados en la normativa de OACI.

Vale comentar que el presente estudio no contempla análisis ambientales, ni económicos financieros, ni plantea alternativas configurativas de la parte aeronáutica de la base aérea NLU.

4. MARCO DE DESARROLLO

4.1. SISTEMA AEROPORTUARIO ANALIZADO

El presente análisis involucra a los siguientes campos de vuelo

- Aeropuerto Internacional Benito Juárez de la Ciudad de México (MEX)
- Base Aérea Militar “General Alfredo Lezama Álvarez” de Santa Lucía (NLU)

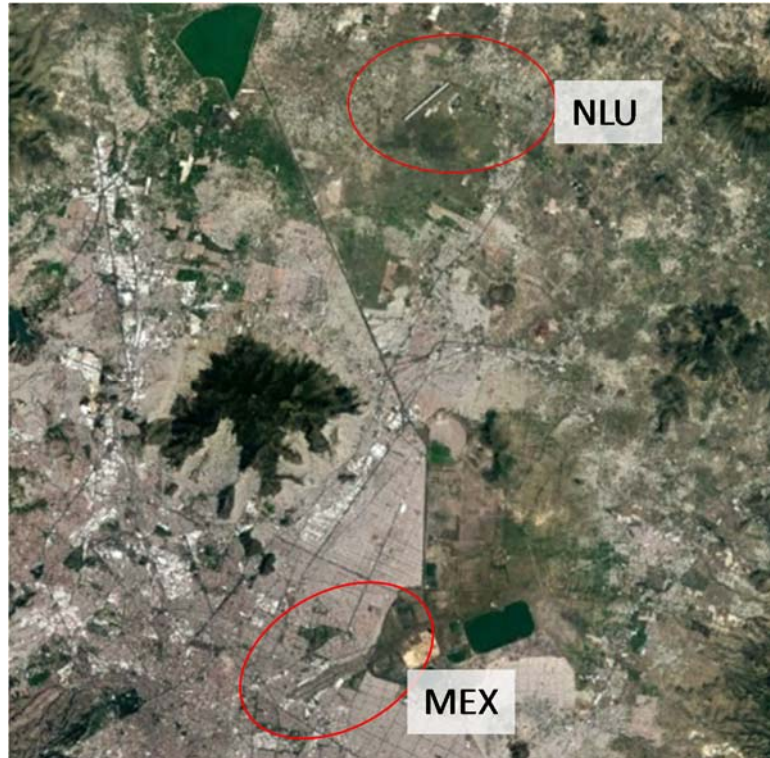


Figura 1. Campos de vuelo objeto del estudio



Figura 2. Aeropuerto Internacional Benito Juárez de la Ciudad de México (MEX)



Figura 3. Base Aérea Militar “General Alfredo Lezama Álvarez” de Santa Lucia (NLU)

4.2. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

El método a seguir se basa en la metodología de simulación digital (Banks et al. 1996, Mujica et al. 2018) considerando los siguientes elementos:

- Aeropuerto Internacional Benito Juárez (Código IATA: MEX)
- Aeropuerto de Santa Lucia (Código IATA: NLU)
- Rutas aéreas actuales
- Capacidades actuales del sub sistema pistas de MEX
- Capacidades actuales del sub sistema pistas de NLU

En primera instancia se pone en evidencia el escenario 0 que representa el punto de partida para las simulaciones de escenarios hipotéticos de desarrollo, para luego, presentar un esquema básico de las rutas propuestas y asumidas para la simulación de la operación del espacio aéreo en NLU en combinación con MEX.

Finalmente, siguiendo varias suposiciones de trabajo que fungen como variables de contorno, se desarrollan 6 escenarios para obtener conceptos claves que permiten caracterizar la capacidad de operación aeronáutica.

Los escenarios se describen a continuación.

• **Escenario 0.**

Este escenario funge como el caso base y representa la situación actual del aeropuerto de la ciudad de México. Se hace uso de un modelo de simulación de bajo nivel basado en el AIP de MEX, así como utilizando valores actuales de tráfico aéreo para poder comparar los resultados operacionales con los escenarios posteriores. El modelo comprende los siguientes elementos:

- Espacio Aéreo de MEX, basado en las cartas publicadas en AIP de MEX
- Sistema de pistas 05R-23L y 05L-23R
- Terminal 1 y Terminal 2 con 103 posiciones de atraque de aeronaves en total
- Sistema de calles de rodaje
- Plan de vuelos de un día promedio
- Mezcla de tráfico que incluye aerolíneas de bajo coste (LCCs) y aerolíneas de servicio completo (FSCs).

Para el modelado del sistema, se utilizó un modelo de simulación del espacio aéreo actual y un modelo de bajo nivel de la operación en tierra de MEX. La Figura 4 ilustra el espacio aéreo del modelo de MEX. Se utilizan las rutas actuales reportadas en el AIP de México (SENEAM 2016).

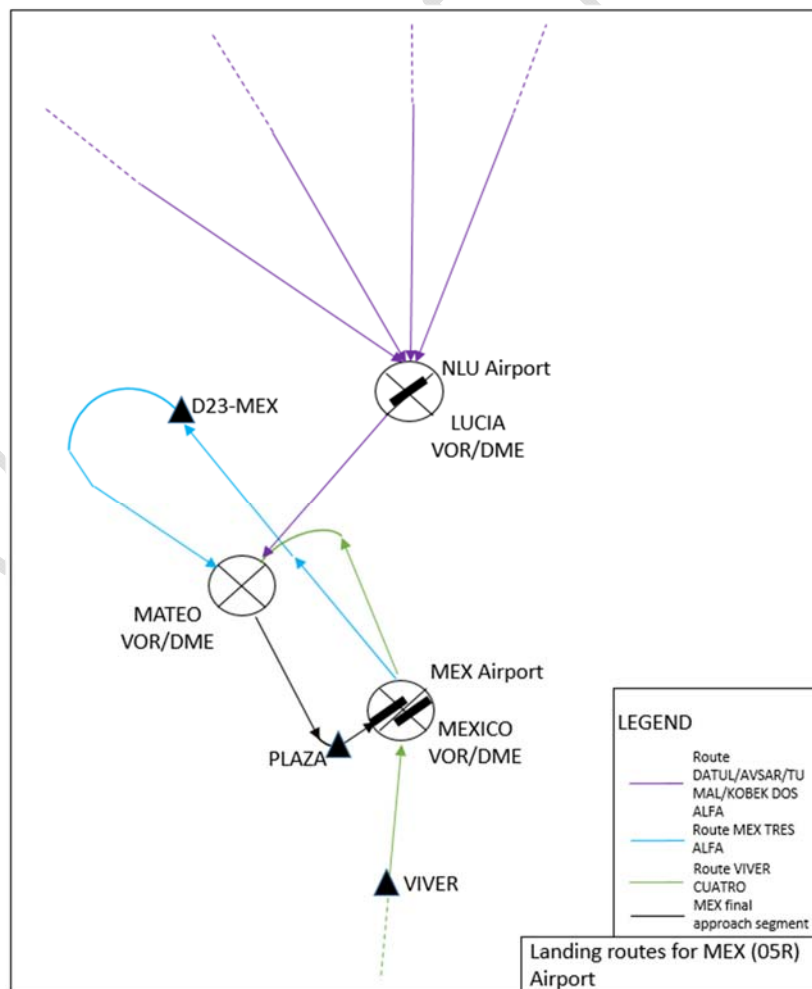


Figura 4. Espacio aéreo para MEX utilizado en el modelo

La Figura 5 ilustra el modelo operativo de bajo nivel implementado en MEX. Con dicho modelo se pueden simular adecuadamente todas las dinámicas emergentes, así como situaciones de conflicto que limitan la capacidad del mismo. Este mismo modelo de MEX se utilizó en los escenarios posteriores.



Figura 5. Modelo de Simulación aeropuerto MEX

• **Escenario 1**

En este escenario, se asume que las aerolíneas de bajo costo LCCs trasladan su operación a NLU. Para este escenario, fue necesario hacer una propuesta de rediseño de las rutas aéreas que respetaran las restricciones operativas, de manera que puedan volar de norte y sur hacia ambos aeropuertos. Este mismo diseño se mantuvo para los escenarios posteriores.

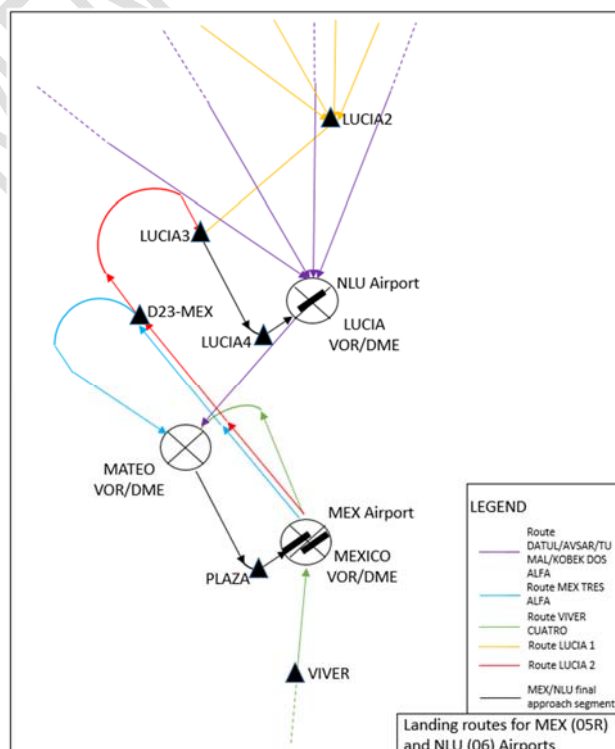


Figura 6. Espacio aéreo simulado NLU-MEX

La Figura 6 ilustra el espacio aéreo simulado así como la ubicación de los dos aeropuertos de estudio.

La Tabla 1 muestra los valores de las rutas aéreas simuladas. Estas fueron propuestas de manera que se respeten las separaciones impuestas por la OACI de manera que se eviten violaciones a la seguridad.

Tabla 1. Descripción de las rutas de aterrizaje para el Aeropuerto MEX y NLU

Destination airport	Route	Waypoint	Altitude [ft]	Speed [kts]
MEX	DATUL/AVSAR/TUM AL/KOBEK/ DOS ALFA	LUCIA	12.000	220
		MATEO (IAF)	12.000	220
		PLAZA (FAF)	8.800	130
MEX	MEX TRES ALFA	MEX	FL 240*	250
		D23-MEX	18.000	250
		MATEO (IAF)	12.000	220
		PLAZA (FAF)	8.800	130
MEX	VIVER CUATRO	VIVER	12.000	250
		MEX	12.000	220
		MATEO (IAF)	12.000	220
		PLAZA (FAF)	8.800	130
NLU	Route LUCIA 1	LUCIA2	12.000	220
		LUCIA3	12.000	220
		LUCIA4 (FAF)	8.800	130
NLU	Route LUCIA 2	MEX	FL 240*	250
		D23-MEX	18.000	250
		LUCIA3	12.000	220
		LUCIA4 (FAF)	8.800	130

*Altitud medida como presión (Nivel de Vuelo)

Este escenario correspondería a una etapa previa a la construcción de las dos pistas incluidas en el Ante Programa de Obra de Santa Lucía (Rioboo, 2018). De esta manera se liberaría capacidad a MEX sin afectar el crecimiento de tráfico. Aunado a esto, la función del HUB aeroportuario con el cual operan las aerolíneas de servicio completo actualmente no se ve afectada, y las aerolíneas de bajo coste que dan servicio a la demanda doméstica y alguna que otra operación punto a punto internacional tampoco se vería afectada. Las aerolíneas que se asume operarían en NLU serían las siguientes: Magnicharter, Viva Aerobus, Interjet y Volaris. Esta misma premisa se mantiene para los escenarios posteriores con la variación de volumen de tráfico.

- **Escenario 2**

Este escenario asume que se han completado dos pistas en NLU, y por tanto la operación del HUB se trasladaría a NLU mientras que el tráfico de bajo costo LCCs se movería a MEX. En este escenario, se podría tener una operación simultanea de aterrizajes y despegues en NLU, y MEX podría tener suficiente espacio para absorber el crecimiento de las aerolíneas de bajo costo como se observará en los resultados de las simulaciones.

Los escenarios siguientes se utilizan para determinar los elementos que restringirían el crecimiento debido a las restricciones operativas y de capacidad.

- **Escenario 3**

En este escenario, se mantiene la misma proporción de mezcla de tráfico entre FSCs y LCCs, la variación consiste en aumentas en un 10% la demanda de LCCs y en 10% las operaciones tipo FSCs en MEX y NLU. Este escenario correspondería a un escenario de relativamente corto plazo asumiendo la tendencia de crecimiento de tráfico actual.

- **Escenario 4**

En este escenario el incremento de tráfico aéreo corresponde a un 30% de LCCs y 30% FSCs en MEX y NLU respectivamente. Como se mencionó previamente, los LCCs operarían en MEX y FSCs en NLU con un modelo de negocio de tipo Hub-Spoke. Este escenario sería uno de mediano plazo.

- **Escenarios 5a y 5b**

En el escenario 5a se incrementa el tráfico aéreo un 70% en MEX y NLU respectivamente. Este escenario correspondería al supuesto de que el tráfico creciera como se ha pronosticado en los siguientes 50 años. Este sería un escenario de largo plazo, y permitiría evaluar la operativa y limitaciones para absorber el tráfico esperado. Dado que con el tráfico esperado la infraestructura de NLU se vería limitada, se plantea un escenario 5b el cual contempla una expansión de los puntos de estacionamiento o atraque y edificio terminal. En este escenario se duplica el número de puestos de estacionamiento (66 *Gates*) para poder absorber la demanda creada en este escenario.

Vale comentar que para todas las simulaciones realizadas, se llevaron a cabo simulaciones de 30 horas de operación y para cada escenario se realizaron 30 réplicas con los cual se pudieron obtener los indicadores estadísticos correspondientes.

En conformidad con los enfoques previos, se estiman los indicadores operativos esperados para el aeropuerto MEX y NLU.

Finalmente, se resumen los resultados derivados del análisis. Del mismo modo, se evalúan las ventajas y/o desventajas que conciernen a cada una de las configuraciones, toda vez que se muestran algunas situaciones de conflicto que pueden generarse en cada caso.

4.3. CONDICIONES DE CONTORNO

El análisis se lleva a cabo tomando en cuenta las siguientes suposiciones operativas que naturalmente condicionan los resultados obtenidos:

- Configuración geométrica actual de MEX.
- Configuración secuencial de pistas, calles de rodaje y plataformas de NLU.
- Mezcla de tráfico operativa actual en el aeropuerto MEX.
- Modelado del espacio aéreo actual de MEX sin variabilidad en trayectoria para el escenario base.
- Modificación factible de espacio aéreo para permitir operación en NLU y MEX.

4.4. HIPÓTESIS DE TRABAJO Y CRITERIOS DE ANÁLISIS

El análisis se realiza partiendo de las siguientes consideraciones generales:

- Se mantienen los índices de mezcla $\%(C+3D)$ del AICM.
- Se adoptan 44.320.000 Pax/ Año.
- Se adoptan 414.000 Movimientos/año. Partiendo de 590 llegadas al día.
- Se asumen 18 hrs de operación y 120 Pax/Aeronave promedio para ambos aeropuertos.
- Se asume una operación anual para ambos aeropuertos
- El modelo de gestión de slots se mantiene.
- Los puestos de estacionamiento disponibles en MEX se mantienen en 103
- Los puestos de estacionamiento disponibles en NLU se asumen 33
- El espacio aéreo propuesto es factible.
- Se asumen válidas las herramientas de simulación.
- Las consideraciones realizadas son de carácter conceptual asociados solo a la capacidad aeronáutica y espacio aéreo asociado.

5. RESULTADOS

- **Relativo al Escenario 0.**

El escenario 0 representa la operación actual del aeropuerto de la ciudad de México. La Figura 7 representa la evolución del tráfico para un día estándar, y la Tabla 2 presenta los principales indicadores operativos.

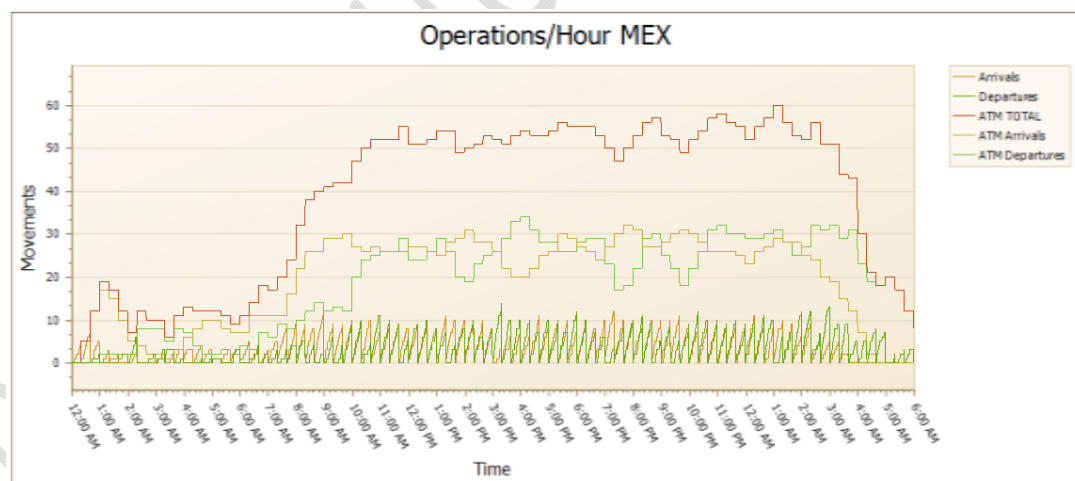


Figura 7. Evolución de número de movimientos del aeropuerto MEX en un día tipo

Tabla 2. Valores operativos de la simulación de MEX

	MEX	
	Valor Promedio	Valor Máximo Obtenido
ATM/Hr	38.6	62
Ocupación Puestos de estacionamiento	55%	78%
Aeronaves en Espera de Pista	6	15
Aeronaves en espera de Gate	0	6
Total Pasajeros Anual	30.4 MILL	48 MILL

• **Relativos al Escenario 1**

El resultado del primer Escenario indica las diferentes capacidades que presentaría el sistema aeroportuario MEX-NLU. La Figura 8 presenta un ejemplo de la evolución de movimientos por hora a lo largo del día para NLU, mientras que la Figura 9 muestra lo correspondiente a MEX. Por otra parte, la Tabla 3 presenta los principales indicadores de capacidad de ambos sistemas.

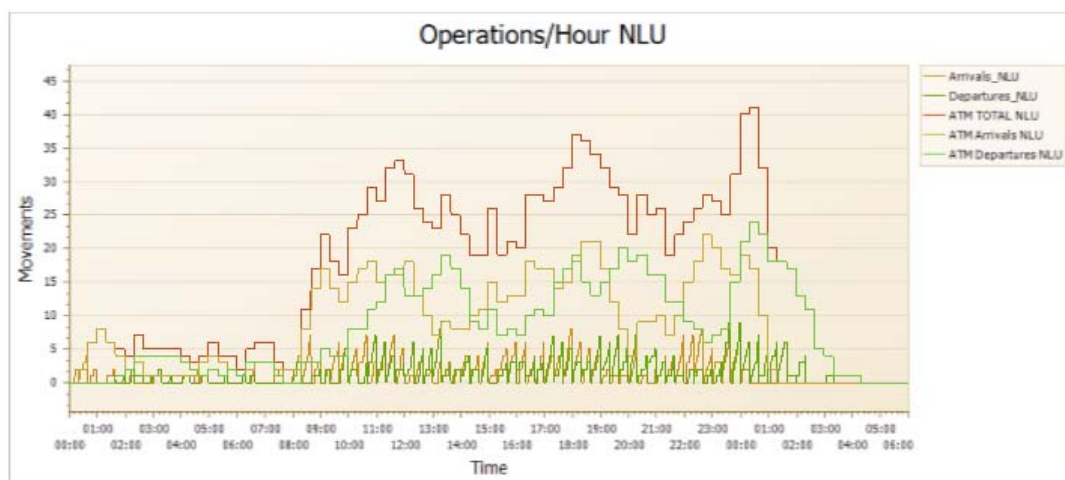


Figura 8. Evolución de movimientos en NLU

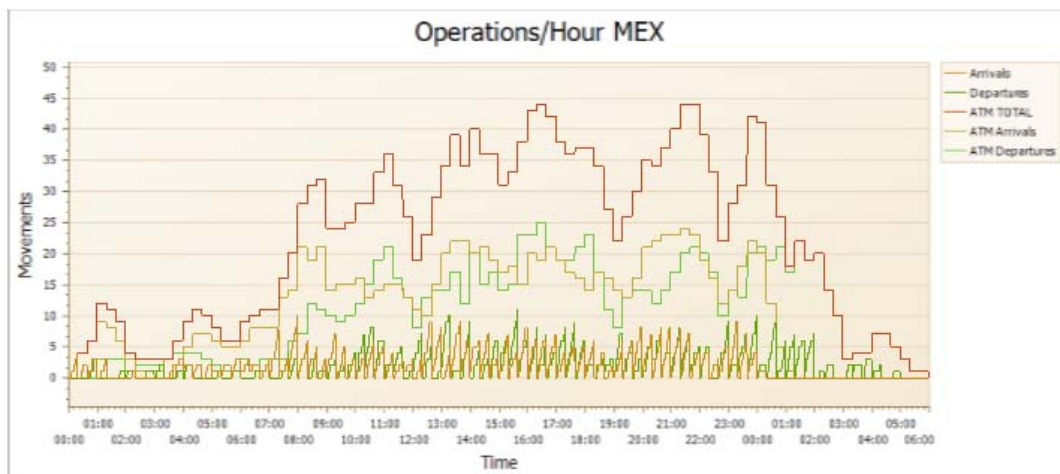


Figura 9. Evolución de movimientos en MEX

Tabla 3. Resumen de Indicadores Operativos Escenario 1

	MEX		NLU	
	Valor Promedio	Valor Máx.	Valor Promedio	Valor Máx.
Porcentaje Tráfico	57%		43%	
ATM/Hr	23	44	17	41
Ocupación de puestos de estacionamiento	47%	59%	48%	100%
Aeronaves en Espera de Pista	1	6	0	0
Aeronaves en espera de Gate	0	0	0	8
Total Pasajeros Anual	18 MILL	34.7 MILL	13.4 MILL	30.7 MILL

• **Relativos al Escenario 2**

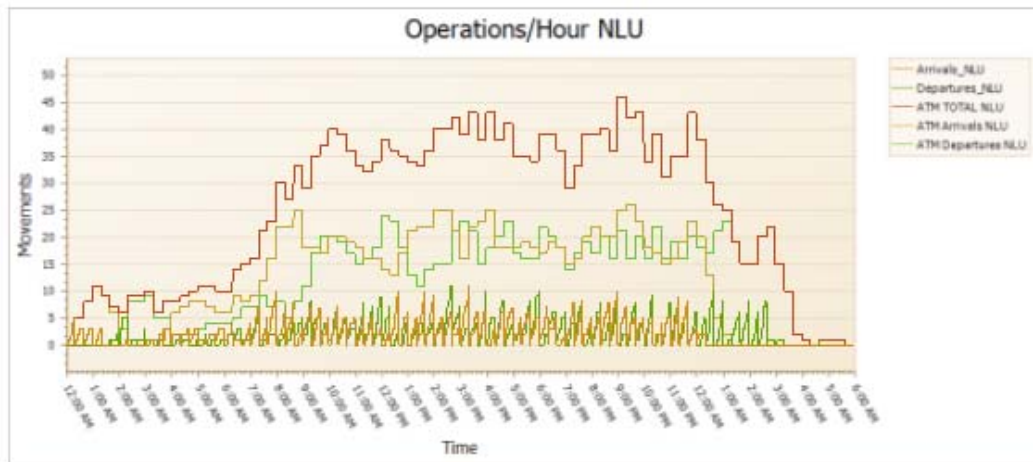


Figura 10. Evolución de movimientos para NLU (dos pistas)

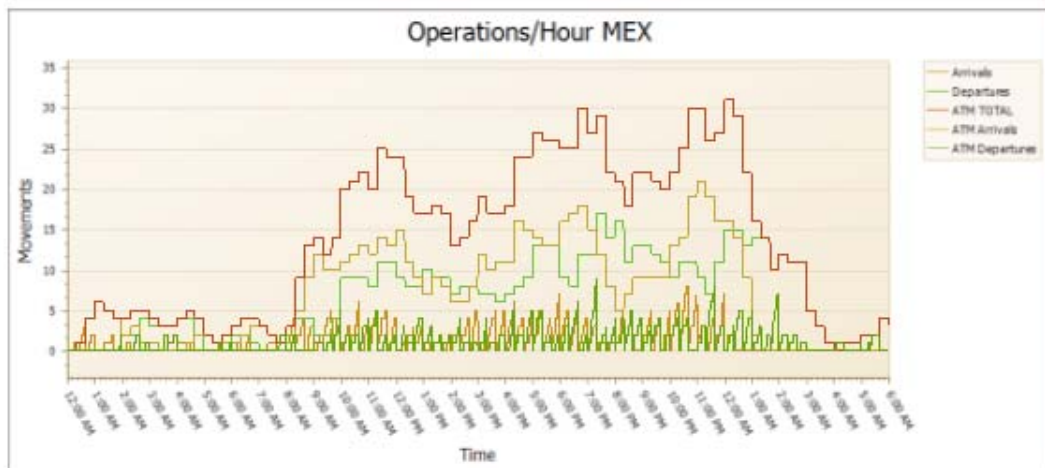


Figura 11. Evolución de movimientos para MEX

Tabla 4. Resumen de Indicadores Operativos escenario 2

	MEX		NLU	
	Valor Promedio	Valor Máx.	Valor Promedio	Valor Máx.
Porcentaje Tráfico	43%		57%	
ATM/Hr	14	37	25	47
Ocupación de puestos de estacionamiento	19%	44%	70%	100%
Aeronaves en Espera de Pista	0	4	0	1
Aeronaves en espera de Gate	0	0	5	23
Total Pasajeros Anual	11 MILL	29 MILL	19.7 MILL	37 MILL

• **Relativos al Escenario 3.**

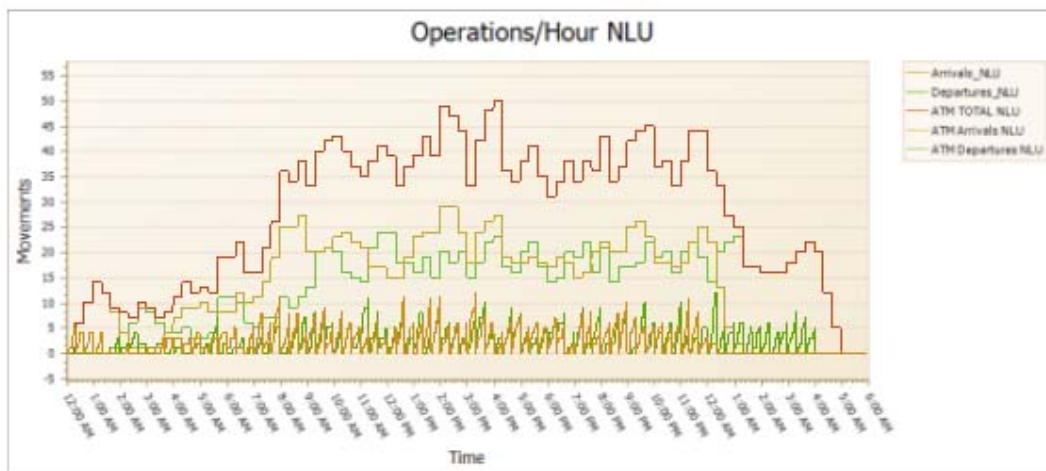


Figura 12. Evolución de tráfico en NLU con incremento 10%

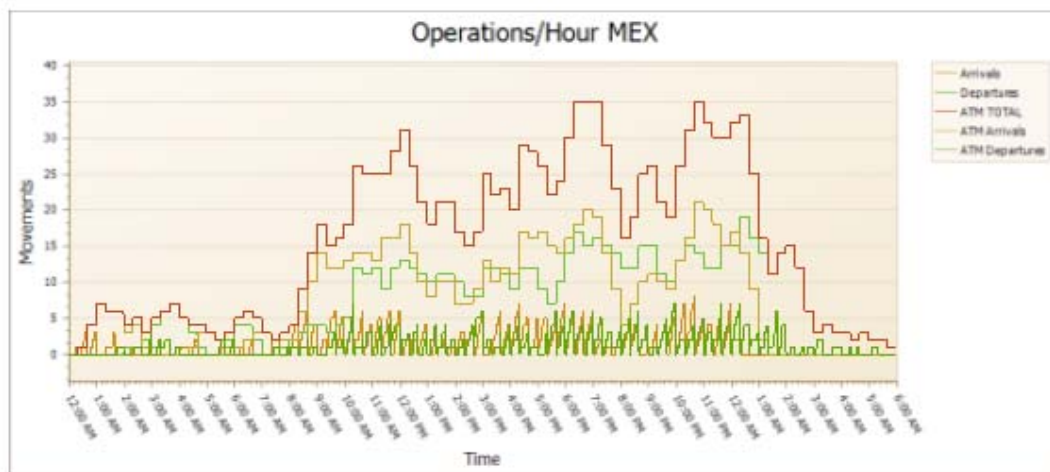


Figura 13. Evolución de tráfico en MEX con incremento 10%

Tabla 5. Resumen de Indicadores Operativos de escenario 3

	MEX		NLU	
	Valor Promedio	Valor Máx.	Valor Promedio	Valor Máx.
Porcentaje Tráfico	43%		57%	
ATM/Hr	15.5	40	27.5	49.6
Ocupación de puestos de estacionamiento	19%	44%	75.8%	100%
Aeronaves en Espera de Pista	0	3	0	1
Aeronaves en espera de Gate	1	1	14.4	45
Total Pasajeros Anual	12.2 MILL	31.5 MILL	21.7 MILL	39 MILL

• **Relativos al Escenario 4**

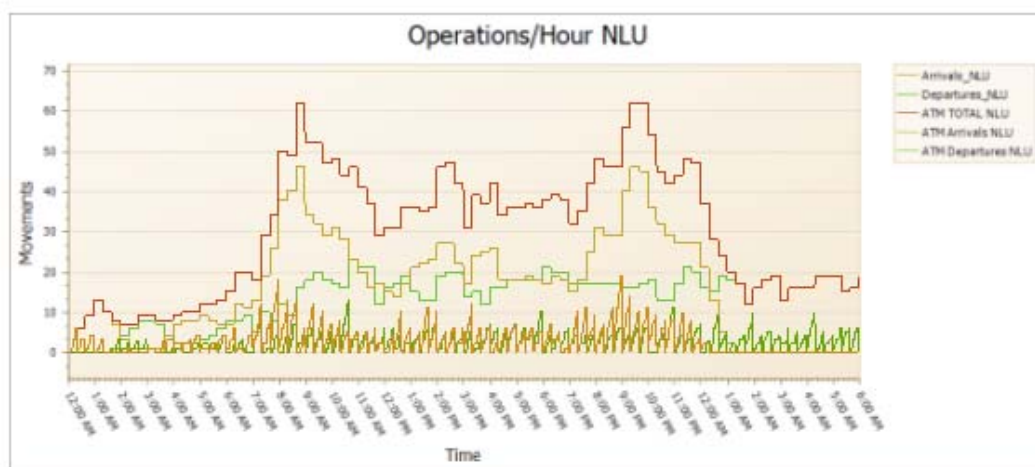


Figura 14. Evolución de movimientos en NLU con 30% de incremento en tráfico

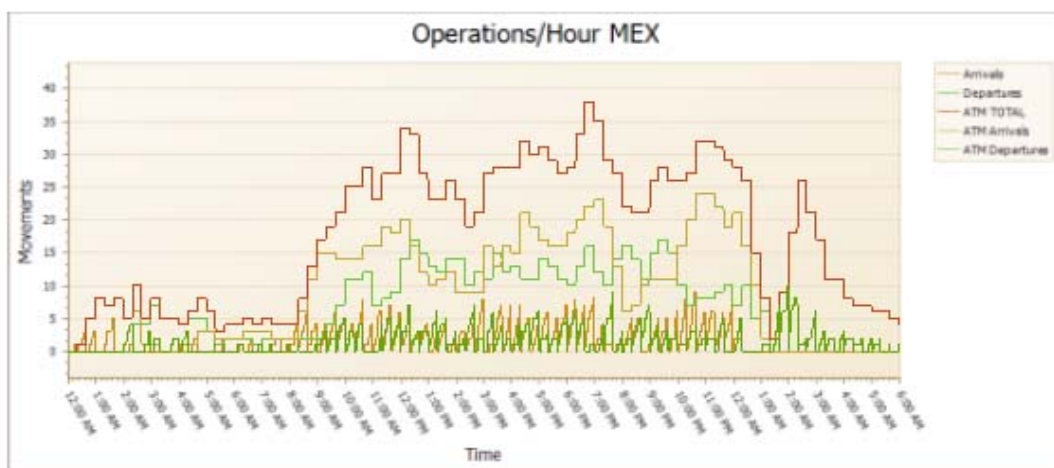


Figura 15. Evolución de movimientos en MEX con 30% de incremento en tráfico

Tabla 6. Resumen de Indicadores Operativos de escenario 4

	MEX		NLU	
	Valor Promedio	Valor Máx.	Valor Promedio	Valor Máx.
Porcentaje Tráfico	43%		57%	
ATM/Hr	17.7	45	31	65
Ocupación de puestos de estacionamiento	25%	49%	83%	100%
Aeronaves en Espera de Pista	0	3.6	0	2
Aeronaves en espera de Gate	0	1	44	119
Total Pasajeros Anual	14 MILL	35.5 MILL	24.4 MILL	51 MILL

• **Relativos al Escenario 5a (33 Gates en NLU)**

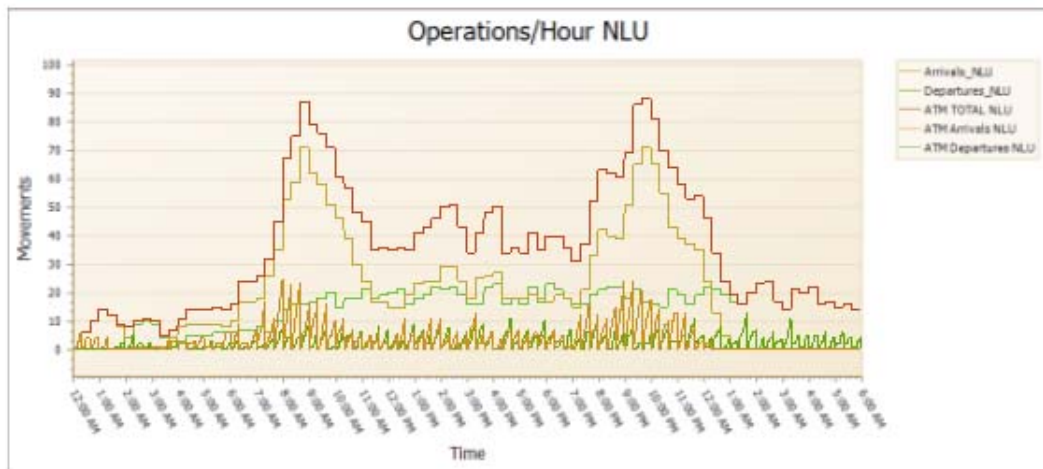


Figura 16. Evolución de movimientos en NLU con 70% incremento y 33 Gates

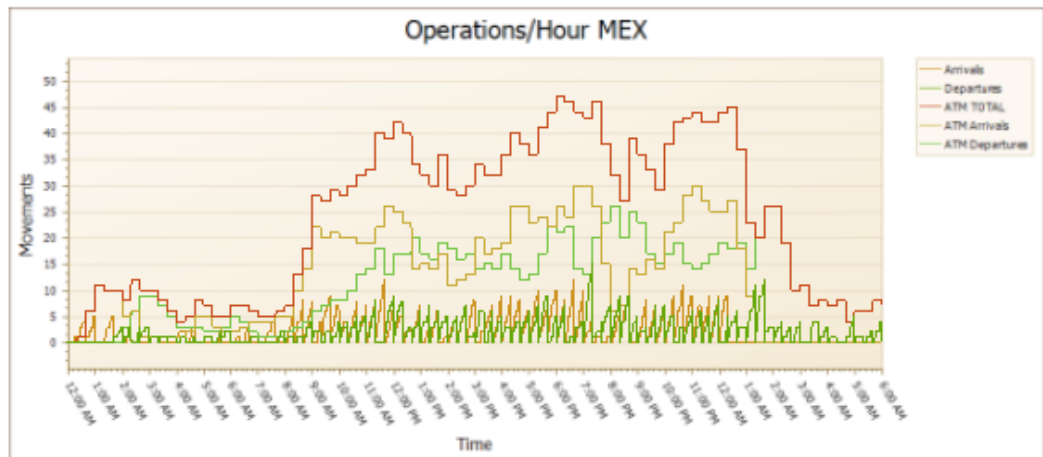


Figura 17. Evolución de tráfico en MEX con 70% de incremento

Tabla 7. Resumen de Indicadores Operativos de escenario 5

	MEX		NLU	
	Valor Promedio	Valor Máx.	Valor Promedio	Valor Máx.
Porcentaje Tráfico	43%		57%	
ATM/Hr	24	49.5	36	89
Ocupación de puestos de estacionamiento	28%	70%	85%	100%
Aeronaves en Espera de Pista	0.7	8	0	2.8
Aeronaves en espera de Gate	0	1	112	256
Total Pasajeros Anual	19 MILL	39 MILL	28.4 MILL	70 MILL

• **Relativos al Escenario 5b. (66 Gates)**

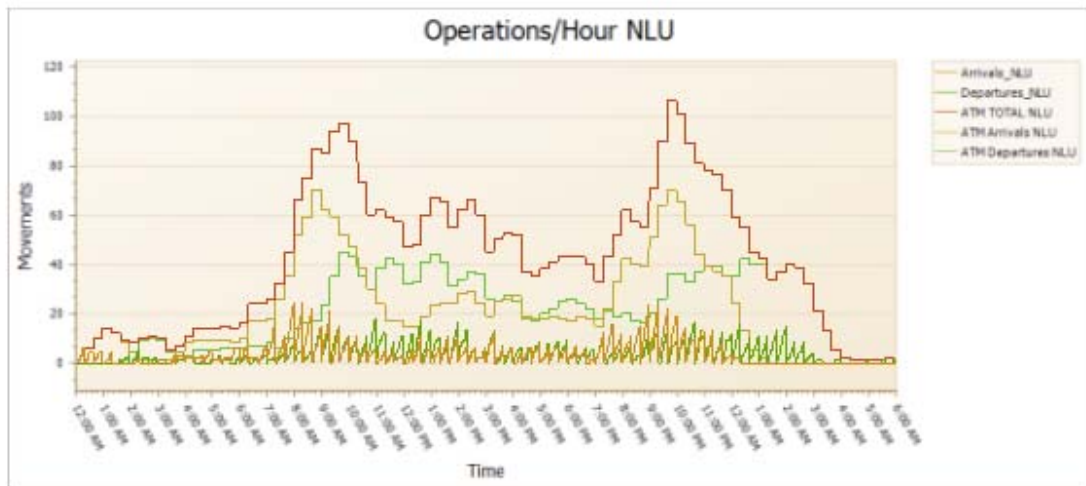


Figura 18. Tráfico en NLU con incremento en 70% y 66 Gates

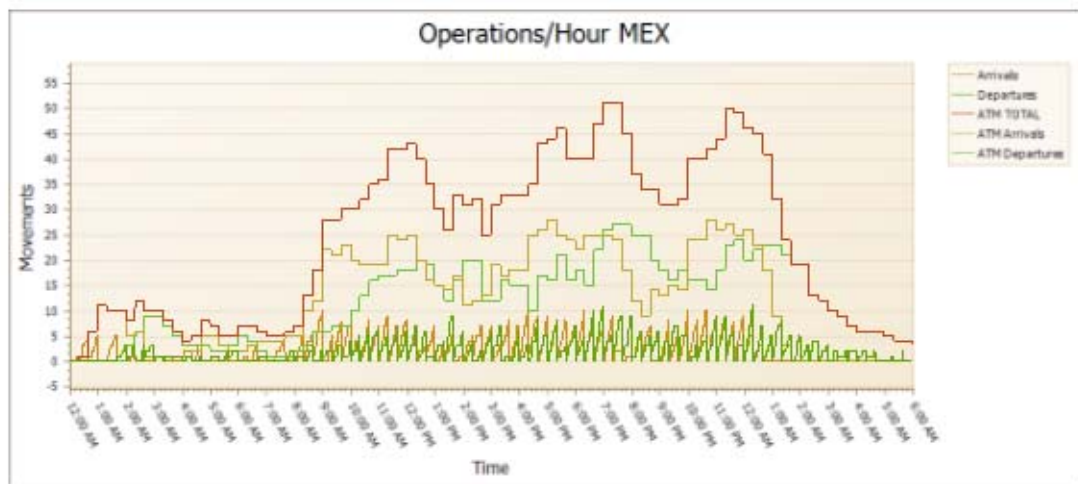


Figura 19. Evolución de tráfico en MEX con 70% de incremento en tráfico

Tabla 8. Resumen de Indicadores Operativos de escenario 5b

	MEX		NLU	
	Valor Promedio	Valor Máx.	Valor Promedio	Valor Máx.
Porcentaje Tráfico	43%		57%	
ATM/Hr	24	50	42	105
Ocupación de puestos de estacionamiento	28%	70%	57%	100%
Aeronaves en Espera de Pista	0.7	8	0	4
Aeronaves en espera de Gate	0	1	8	50
Total Pasajeros Anual	19 MILL	39.5 MILL	33 MILL	82.7 MILL

5.1. ANÁLISIS DE CASOS

El análisis realizado se basa en los resultados obtenidos con las simulaciones realizadas para los diversos escenarios propuestos

Escenario 0.

En este caso se puede observar de los indicadores operativos que en el sistema de MEX el cuello de botella es justamente el elemento pista. Lo anterior se puede inferir debido a las aeronaves en espera que se obtienen y que se han observado en la realidad del aeropuerto. Cabe mencionar que el valor de 6 naves en espera es un valor promedio, mientras que el valor de 15 es el valor máximo obtenido de las simulaciones realizadas. Por lo que no implica que siempre habrá 15, con una buena coordinación por parte de ATC esto puede evitarse. Se puede apreciar también que en ocasiones se pueden alcanzar movimientos por hora al límite de la capacidad declarada de 61 ATM/Hr.

Asumiendo estos niveles operativos, se puede estimar que este aeropuerto podría como máximo absorber una capacidad de 48 millones de pasajeros asumiendo el tipo promedio de aeronave con una ocupación de 120 pasajeros manteniendo continuamente 62 ATM/Hr lo cual es inviable actualmente.

Escenario 1.

Este escenario permite obtener los primeros estimados operativos del sistema MEX-NLU. Con los supuestos planteados, se puede identificar que en horas pico, NLU puede operar con valores de 41 ATM/Hr sin mayor problema con una sola pista, aunque el valor promediado al día sería de 17 ATM/Hr con el tráfico actual utilizado para el estudio. En el caso de MEX, se puede apreciar que al operar los LCCs en NLU se libera la capacidad de MEX con lo cual se resuelve el problema de la saturación a corto plazo.

En este escenario, el MEX estaría operando de las 13:00 a las 00:00 con un promedio de 40 ATM/Hr, o lo que es lo mismo a 65% de su capacidad actual. Con la liberación de capacidad, se esperaría que los problemas de retrasos en las aerolíneas se verían reducidos drásticamente, y aunado a eso, se esperaría también que la red nacional aeroportuaria mexicana operara sin mayor contratiempo ya que el *Ground Delay Program (GDP)* que se encuentra activo actualmente debido a la congestión (Mujica & Romero 2018) sería prácticamente innecesario. Lo anterior se justifica por los valores simulados ya que las aeronaves en espera de pista bajan drásticamente a un valor promedio de 1 y máximo 6 los cuales son valores muy alejados de la situación actual.

Por otra parte, para el caso de NLU se comienza a apreciar el problema de la limitante de puestos de estacionamiento. En este escenario el valor promedio es de 0 aeronaves en espera de *Gate*, mas sin embargo, habrá ocasiones que podrían haber hasta un máximo de 8 aeronaves que aterricen y no tengan *Gate* disponible si es que la operación de escala de alguna aeronave no está adecuadamente coordinada o surge un contratiempo que la retrase.

Con este escenario y si se mantuviera una demanda constante se podría estar hablando de un escenario donde el sistema MEX-NLU absorbiera un tráfico aproximado de 66 millones de pasajeros.

Escenario 2.

En este escenario, donde la operación HUB se traslada a NLU y MEX se queda como un aeropuerto para aerolíneas de bajo costo (LCCSs), se puede observar que el aeropuerto de MEX queda totalmente descongestionado, ya que por una parte con la demanda prevista, el número de movimientos máximo sería de 37 ATM/Hr o al 60% de su capacidad simulada. Por el otro lado, NLU contaría con dos pistas y operaría en su momento de máxima demanda a 47 ATM/Hr lo cual sugiere que ni siquiera estaría cerca de la situación del aeropuerto actual.

Es importante hacer notar que en este escenario se aprecia que el primer cuello de botella que presentará el aeropuerto de NLU son los puestos de estacionamiento de aeronaves, ya que se observa que habría un valor promediado de 5 casos de naves que al aterrizar no tiene *Gate* disponible. Y en momentos de alta demanda este número puede subir hasta 23 naves.

Con este tipo de demanda se podría asumir que se podrían mover unos 67 millones de pasajeros anualmente entre los dos aeropuertos con indicadores operativos muy razonables.

Escenario 3.

En este escenario, se observa que al aumentar la demanda, el aeropuerto MEX no presenta mayores problemas, podría operar sin mayor contratiempo. En el caso de NLU queda patente que aumenta su número de operaciones a casi 50 ATM/Hr en momentos de máxima demanda, aunque por otra parte ya es claro que para evitar problemas de retrasos reactivos o inducidos será necesario implementar puestos remotos o añadir más *Gates* a la infraestructura.

Bajo este escenario, se podrían esperar unos 70 millones de pasajeros (un 60% mas de lo que recibe actualmente MEX).

Escenario 4.

En este escenario, se puede observar que aún MEX no presenta mayores problemas, ya que estaría operando a un promedio diario de 18 ATM/Hr. Para el caso de NLU ya es patente que en lo referente a las pistas no tendría problemas, pero sería necesario encontrar una solución a la falta de *Gates*. Se esperaría que con el nivel de demanda de este escenario, habría retrasos debido a la falta de puestos de estacionamiento o atraque.

En el caso de máxima demanda se podría estimar 86 Millones de pasajeros para este sistema MEX-NLU.

Escenario 5a.

En el escenario 5, se puede observar que MEX presenta algunos problemas mínimos por el uso de pistas, aunque con base en la experiencia actual, la demanda máxima lo haría operar a 49.5 ATM/Hr aun a 81% de su máxima capacidad.

En el caso de NLU, con este nivel de demanda el problema de la falta de puestos de estacionamiento ocasionaría problemas de retrasos ya que en el día tendría un promedio

de 112 aeronaves que se queden sin *Gate* al aterrizar o lo que es lo mismo un 30% de las aeronaves que lleguen a NLU.

Este escenario corresponde a un horizonte de largo plazo donde como máximo se esperaría unos 110 millones de pasajeros.

Escenario 5b.

Este escenario, sirve para identificar como operaría el sistema si se duplicara la capacidad del cuello de botella en NLU, o lo que es lo mismo usar 66 Gates. Bajo esta premisa, se puede ver que los valores operativos son holgados, se puede apreciar en el caso de MEX que operaría a 82% de su capacidad, y NLU podría aumentar su capacidad a 105 ATM/Hr en los momentos de mayor demanda.

Es importante hacer notar que los problemas de naves en espera de *Gate* prácticamente se soluciona, ya que el promedio queda prácticamente en cero y en casos puntuales puede haber unas 4 aeronaves con un retraso por esta causa o el 0.4% del tráfico esperado al sistema.

5.1.1. Conclusiones, sugerencias y trabajo futuro

En el estudio, se puede observar que con las premisas planteadas y los resultados preliminares obtenidos de las simulaciones realizadas, el sistema aeroportuario MEX-NLU es factible hasta un horizonte de mediano plazo. Los resultados sugieren que con el sistema planteado, se puede resolver el problema actual de congestión así como disminuir o eliminar los retrasos inducidos en el sistema nacional aeroportuario por el *Ground Delay Program* que se encuentra activo actualmente. Hasta un horizonte de mediano plazo se puede concluir que el sistema MEX-NLU podría operar con niveles operativos aceptables, permitiendo el crecimiento del tráfico sin incurrir ni exportar retrasos a la red aeroportuaria nacional.

Se pudo identificar por otro lado, que en el caso de NLU el cuello de botella será el número de puestos de estacionamiento planteados en el plan maestro previo. Se identifica que a un horizonte de largo plazo, el número de *Gates* planeados sería insuficiente, por lo que se debe buscar una solución a esta situación.

Debido a lo anterior, se sugiere añadir al plan maestro un escenario donde se incremente ya sea el número de puestos de estacionamiento o hacer uso de puestos remotos para evitar los retrasos inducidos en la red por estos motivos. Esta acción eliminaría el cuello de botella y permitiría que el sistema opere adecuadamente y pueda absorber la demanda estimada a 50 años.

Se sugieren las siguientes etapas al estudio presentado:

- Modelado de bajo nivel de NLU haciendo uso de la metodología desarrollada por los autores (Mujica et al.2018) para identificar problemas operativos específicos en NLU y de esa manera disminuir riesgos tanto operativos, como de seguridad y financieros.

- Análisis de la estimación de la evolución de tráfico en México tomando en cuenta los modelos de negocio y el reemplazo de las aeronaves actuales por aeronaves de última generación (que permiten más carga y pasajeros así como radio de alcance).
- Verificar la factibilidad del espacio aéreo utilizado en el estudio.

Los autores sugieren enfáticamente el uso de técnicas de simulación en diferentes fases de la planeación de la infraestructura para poder minimizar los riesgos tanto de seguridad, económicos u operativos.

*****ESTE ESTUDIO SE LLEVÓ A CABO POR INICIATIVA DEL GRUPO DE TRABAJO Y SIN NINGÚN COMPROMISO MÁS QUE EL PURAMENTE CIENTÍFICO Y DE DIVULGACIÓN PARA EL PROBLEMA DEL SISTEMA AEROPORTUARIO MEX-NLU.**

6. DOCUMENTACION DE REFERENCIA

- SENEAM, MEXICO CITY AIP, 2016
- Anexo 14, vol. I “Diseño y Operación de Aeródromos”. OACI. Octava ed., 2018.
- Banks, J., Carson J.S., Nelson, B.L. (1996). Discrete Event System Simulation. 2nd Edition, Prentice Hall.
- Mujica Mota, Di Bernardi A., Scala P., Ramirez-Diaz G., 2018, “Simulation-based Virtual Cycle for Multi-level Airport Analysis”, Aerospace, Accepted for Publication, April 2018
- Mujica Mota M., Scala p., 2017a. Model-Based Remote Runway Solution for a Congested Airport: Mexico City Airport Case, in Proc. of EMSS 2017, Barcelona, Spain.
- Mujica Mota, M., Romero R., 2018, “Analysing the Decision-Rules for a Ground Delay Program: Mexican Airport Network”, In Proc. of Int. Conf of Research in Air Transport 2018, Castelldefels, Spain
- Mujica Mota, M., Boosten G., Zuniga C., 2017 “Time to Sweat the Assets? The analysis of two airport cases of restricted capacity in different continents”, Discussion Paper 2017.26, International Transport Forum, OECD
- Grupo Rioboo, 2018, “Ante Programa de Obra, Ante Presupuesto, Ante Proyecto Arquitectónico AISL”
- Manual de Diseño de Aeródromos, parte II. OACI. Cuarta ed., 2005.