



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD PROFESIONAL TICOMAN**

**“Desarrollo de una herramienta informática
que permita calcular la capacidad de
distintos sistemas de pistas aplicable a
aeropuertos mexicanos”**

TESINA

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

Ingeniero en Aeronáutica

PRESENTAN:

**Othón González Chávez
Luis Gerardo Zavala Reyes**

ASESOR:

M. en C. Mario Alfredo Batta Fonseca



México, D.F.

Marzo 2010

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

UNIDAD TICOMÁN

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE: INGENIERO EN AERONÁUTICA
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN: CURRICULAR
DEBERÁN PRESENTAR: LOS CC. PASANTES:
GONZÁLEZ CHÁVEZ OTHÓN
ZAVALA REYES LUIS GERARDO

“DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA QUE PERMITA CALCULAR LA CAPACIDAD DE DISTINTOS SISTEMAS DE PISTAS APLICABLE A AEROPUERTOS MEXICANOS”

	ÍNDICE
	LISTADO DE FIGURAS
	LISTADO DE TABLAS
	LISTADO DE GRÁFICAS
	INTRODUCCIÓN
	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA
	JUSTIFICACIÓN
	HIPÓTESIS PRINCIPAL
	OBJETIVOS
	ALCANCE
CAPÍTULO I	CAPACIDAD DEL SISTEMA DE PISTAS DE UN AEROPUERTO
CAPÍTULO II	PARÁMETROS PRINCIPALES DE LA CAPACIDAD DE PISTAS
CAPÍTULO III	METODOLOGÍA
CAPÍTULO IV	PROPUESTA DE DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA
CAPÍTULO V	ESTUDIO REALIZADO AL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE TOLUCA
	CONCLUSIONES
	RECOMENDACIONES
	GLOSARIO
	LISTADO DE SIGLAS Y ABREVIATURAS
	SEPARACIONES RADAR
	BIBLIOGRAFÍA

México, DF., a 11 de marzo de 2010.

A S E S O R E S

M. EN C. MARIO ALFREDO BATA FONSECA

Vo. Bo/

ING. MIGUEL ALVAREZ MONTALVO
DIRECTOR



I. P. N.
ESCUELA SUPERIOR DE
INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD TICOMÁN
DIRECCIÓN

Agradecimientos

Othón González Chávez

En primer lugar agradezco a Dios, por mostrarme el camino de la Fe, por estar siempre a mi lado durante toda esta travesía y por no dejarme caer nunca, por haberme dado la fortaleza necesaria para continuar en los momentos más difíciles, por haber llenado mi vida de bendiciones, por poner en mi vida a todas las personas que mencionaré más adelante.

Agradezco también de manera infinita a mis Padres, quienes desde pequeño me hicieron darme cuenta de mis capacidades, que me guiaron y me educaron en la vida para poder convertirme en una persona de bien y tener como meta utilizar mis conocimientos para el bien de la mayoría. Por inculcarme valores que se han vuelto ley para mí y sin los cuales jamás hubiera podido llegar a este punto. Por ser un modelo a seguir, por ser mis objetos de admiración y por amarme, mil gracias. A mi hermana por estar siempre dispuesta a escucharme si tuve un mal día, por haberse convertido también en mi gran amiga y por estar siempre a mi lado, pero sobre todo por no rendirse nunca. Eres mi más grande orgullo.

Gracias Karen por estar a mi lado en uno de los momentos más difíciles de mi vida, por cuidarme, por soportarme, por creer en mí más allá de lo que te correspondía, pero sobre todo gracias por amarme, por ser mi motor y motivación, llegar a este punto no hubiera sido posible sin la alegría que llegaste a imprimir a mi vida, te amo.

Especial mención merece mi tío, el Cap. Pedro Álvarez, por mostrarme que para poder hacer las cosas se necesita tener pasión, por mostrarme lo bello del mundo de la aviación, por no dejarme en ningún paso que di durante esta carrera, y por apoyarme tanto ahora que la he terminado, prometo continuar con este legado y manejarme con esa entrega y ética que tú siempre tuviste.

Gracias a mi tía Lidian, por ser un ejemplo de vida, porque por medio de su testimonio logré acercarme más a Dios, gracias por enseñarme que no hay límites en lo fuerte que uno puede llegar a ser, sé que ahora está disfrutando de la gracia del Señor, mirándome desde arriba, como un ángel guardián, jamás te defraudaré.

Gente digna de mención también son Humberto, por ser mi mejor amigo, por enseñarme que ninguna limitación es pretexto suficiente para dejar de hacer las cosas, por siempre

estar junto a mí al pie del cañón, por enseñarme a ser más noble y en general por ser la mejor persona que conozco sobre este mundo. Claudia, por haberme animado a hacer ese cambio de carrera que tanto trabajo me costó. Arturo, por haber estado en ese momento de transición y darme siempre palabras de aliento.

Durante mi estancia en esta maravillosa escuela también hubo gente que logró que estos años fueran los más divertidos y que además de amigos logramos formar un equipo para salir todos juntos adelante. Gracias Jaz por ser mi mejor amiga, por estar ahí cuando lo necesité, por preocuparte siempre por mí aunque estuvieras lejos, gracias Daisy por hacerme reír siempre, por tener esa alegría que contagia y por ser testimonio de que cuando se quiere algo se consigue. A mi amigo y compañero de tesis Luis, gracias por haber sido parte de esto, por haber hecho que este logro conjunto se hiciera realidad, ahora nos toca cosechar los frutos.

Gracias Jesús por mostrarme que la distancia no es motivo para perder una amistad, sino que al contrario, la puede hacer más fuerte y sólida. Gracias Marco por tu amistad, sin duda eres una de las personas más divertidas y más inteligentes que conozco. Gracias a mis grandes amigas, Daniela y Sandy, por enseñarme que una amiga es también una confidente, por escucharme cuando lo necesité, y por darme ánimos en todo momento.

Gracias a toda mi familia por creer siempre en mí, por alentarme a explotar al máximo mis capacidades, por esos ratos de diversión, pláticas y convivencia. Han hecho que mi vida esté completa.

A mi asesor, el M.C. Mario Alfredo Batta, por hacerme parte de este proyecto, por brindarme su apoyo y conocimientos, por convertirse en más que un profesor, en un amigo. Al Ing. Gustavo García Rojas, por ser uno de los mejores profesores que he tenido en mi vida, por brindarme no sólo conocimientos sino lecciones de vida, y sobre todo gracias por tu amistad.

Gracias al Instituto Politécnico Nacional, a la ESIME Ticomán y a mis profesores, por brindarme los conocimientos y la educación que me acompañarán por el resto de mi carrera profesional, por inculcarme ese amor a la patria, esa responsabilidad social que tengo como profesionista, nunca lo olvidaré.

A todas las personas que por descuido olvidé mencionar, pero que saben forman parte importante en mi vida, mil gracias.

Luis Gerardo Zavala Reyes

“Siembra un pensamiento y cosecharás un acto;
Siembra un acto; y cosecharás un hábito;
Siembra un hábito y cosecharás un carácter;
Siembra un carácter y cosecharas un destino”

Charles Reade

Agradezco...

A mis padres:

Alma Delia Reyes Orozco y Gerardo Zavala Martínez.

Por su amor, comprensión y apoyo sin condiciones, por esa fuerza que me enseñaron que no hay cosa imposible por realizar. Por guiarme sobre el camino de la educación, el amor y las buenas costumbres. Reciban con todo amor mi admiración y respeto así como mi eterno agradecimiento.

A mis hermanos:

Angie y Fer.

A ti hermanita linda que has sido un ángel para nosotros, por tu amor incondicional, se que estas orgullosa de mi y a ti hermano por tu amor, apoyo y opiniones, esperando ser un buen ejemplo para ti, ya que ustedes son muy importantes para mí.

A mi novia:

Sandra Hernández Vilchis.

Por su amor y comprensión en los tiempos difíciles, por su eterno apoyo y por demostrarme que aunque la vida sea dura se puede lograr todo, además de su fe y confianza en mí.

Gracias por escucharme y tus consejos.

A mis abuelos:

Por encomendarme siempre con Dios para que saliera adelante. Yo sé que sus oraciones fueron escuchadas. Y por haber guiado por buen camino a mis padres para que ellos hicieran lo mismo conmigo.

A mi compañero de tesis:

Othón González Chávez.

Por permitir compartir estos conocimientos juntos, por participar a lo largo de la carrera en buenos y malos momentos, finalmente vemos concluido este fruto de nuestros esfuerzos.

A mi asesor:

M. en C. Mario Alfredo Batta Fonseca.

Por permitirme compartir sus conocimientos conmigo. Sus consejos, paciencia y opiniones sirvieron para que me sienta satisfecho en mi participación dentro del proyecto de investigación.

A mis profesores de la carrera:

Que participaron en mi desarrollo profesional durante mi carrera, sin su ayuda y conocimientos no estaría en donde me encuentro ahora.

A Dios:

Por permitirme ser uno más de su rebaño y darme la fortaleza y entereza para lograr una de las metas más importantes en mi vida y colmarme de tanta bendiciones que han hecho de mí un hombre de bien

Gracias.

Índice

LISTADO DE FIGURAS	9
LISTADO DE TABLAS	10
LISTADO DE GRAFICAS	11
INTRODUCCIÓN	12
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
JUSTIFICACIÓN	15
HIPÓTESIS PRINCIPAL	15
HIPÓTESIS SECUNDARIA	16
OBJETIVOS	16
OBJETIVO GENERAL	16
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
ALCANCE	16
CAPÍTULO I	17
Capacidad del sistema de pistas de un aeropuerto	
1.1 CAPACIDAD DE PISTA DE VUELO	18
1.2 FACTORES QUE AFECTAN A LA CAPACIDAD	20
<i>Control del tráfico aéreo</i>	20
<i>Características de la demanda</i>	21
<i>Factores del entorno del aeropuerto</i>	22
<i>Factor por diseño</i>	22
1.3 REGLAMENTACIÓN Y NORMATIVIDAD NACIONAL ASOCIADA	24
<i>Ley de Aeropuertos</i>	24
<i>Reglamento de la Ley de Aeropuertos</i>	24
CAPÍTULO II	26
Parámetros principales de la capacidad de pistas	
2.1 IDENTIFICAR LOS PARÁMETROS OPERACIONALES QUE INFLUYEN EN LA CAPACIDAD DE UN SISTEMA DE PISTAS.....	27
2.2 ANÁLISIS DE LOS MODELOS EXISTENTES	28
<i>Modelo de la FAA</i>	28
<i>Modelo basado en el concepto de posición-tiempo</i>	32
2.3 COMENTARIOS	39

CAPÍTULO III	41
Metodología	
3.1 ELECCIÓN DEL MODELO MÁS ÚTIL PARA LA REALIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA	42
3.2 REGISTROS DURANTE LA OPERACIÓN REAL DEL AICM Y LA APLICACIÓN DEL MODELO	43
3.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS	53
CAPÍTULO IV	54
Propuesta de desarrollo de la herramienta informática	
4.1 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS NECESARIOS Y CREACIÓN DE LA INTERFAZ	55
4.2 CREACIÓN DEL COMPLEMENTO “INGRESAR DATOS EN TIEMPO REAL”	58
CAPÍTULO V	63
Estudio realizado al Aeropuerto Internacional de Toluca	
5.1 AEROPUERTO INTERNACIONAL DE TOLUCA (AIT)	64
5.2 INFORMACIÓN GENERAL	66
5.3 INFRAESTRUCTURA	67
5.4 TOMA DE MUESTRAS	70
5.5 OBTENCIÓN DE PARÁMETROS OPERACIONALES	74
5.6 CÁLCULO DE LA CAPACIDAD	77
5.6.1 <i>Determinación de la capacidad correspondiente al 19 de noviembre</i>	77
5.6.2 <i>Determinación de la capacidad correspondiente al 20 de noviembre</i>	78
5.7 COMENTARIOS	79
5.8 EJERCICIO ALTERNATIVO	80
CONCLUSIONES	83
RECOMENDACIONES	86
GLOSARIO	88
LISTADO DE SIGLAS Y ABREVIATURAS	93
A.1 SIGLAS DE LAS AEROLÍNEAS	94
A.2 DENOMINACIÓN DE LOS TIPOS DE AERONAVES	94
A.3 ABREVIATURAS MATEMÁTICAS	95
SEPARACIONES RADAR	96
<i>S.1 Separaciones según la FAA</i>	97
<i>S.2 Separaciones según la OACI</i>	97
<i>S.3 Separaciones según SENEAM</i>	98
BIBLIOGRAFÍA	99

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1.1.- Relación del índice demanda/capacidad y fluctuación de la demanda con la media horaria de la demora de aeronaves. Pág. 14

Figura 1.2.1.- Diagrama tiempo-distancia para dos aterrizajes y un despegue: rectángulo en blanco, pista ocupada por el despegue; rectángulo rayado, pista ocupada por el aterrizaje. Pág. 15

Figura 4.1.1.- Interfaz del programa. Pág. 52

Figura 4.1.2.- Resultado de la aplicación del método. Pág. 53

Figura 4.2.1.- Interfaz de usuario del complemento. Pág. 55

Figura 5.1.1.- Localización del Aeropuerto Internacional de Toluca. Pág. 60

Figura 5.3.1.- Plano general del Aeropuerto Internacional de Toluca. Pág. 64

Figura 5.3.2.- Plano de posiciones en plataforma. Pág. 65

Figura 5.3.3.- Vista Satelital Cabecera 15. Pág. 66

Figura 5.3.4.- Vista Satelital Cabecera 33. Pág. 66

Figura 5.4.1.- CCO del Aeropuerto Internacional de Toluca. Pág. 67

Figura 5.6.1.1.- Resultado de los datos del Aeropuerto Internacional de Toluca del 19 de noviembre del 2009. Pág. 73

Figura 5.6.2.1.- Resultado de los datos del Aeropuerto Internacional de Toluca del 20 de noviembre del 2009. Pág. 74

Figura 5.8.1.- Pantalla del cálculo para el 19 de noviembre (ejercicio alternativo). Pág. 77

Figura 5.8.2.- Pantalla del cálculo para el 20 de noviembre (ejercicio alternativo). Pág. 78

LISTADO DE TABLAS

Tabla 2.2.1.- Clasificación de aeronaves por la Federal Aviation Administration. *Pág. 26*

Tabla 2.2.2.- Diagrama de configuración de pistas. *Pág. 27*

Tabla 3.2.1.- Muestra de aterrizajes, tomada del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México el 9 de marzo del 2007. *Pág. 39*

Tabla 3.2.2.- Muestra de despegues, tomada del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México el 9 de marzo del 2007. *Pág. 40*

Tabla 3.2.3.- Muestra de aterrizajes, tomada del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México el 12 de marzo del 2007. *Pág. 45*

Tabla 3.2.4.- Muestra de despegues, tomada del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México el 12 de marzo del 2007. *Pág. 46*

Tabla 5.2.1.- Información general del Aeropuerto Internacional de Toluca. *Pág. 62*

Tabla 5.3.1.- Infraestructura del Aeropuerto Internacional de Toluca. *Pág. 63*

Tabla 5.4.1.- Muestra de aterrizajes, tomada del Aeropuerto Internacional de Toluca el 19 de noviembre del 2009. *Pág. 68*

Tabla 5.4.2.- Muestra de despegues, tomada del Aeropuerto Internacional de Toluca el 19 de noviembre del 2009. *Pág. 68*

Tabla 5.4.3.- Muestra de aterrizajes, tomada del Aeropuerto Internacional de Toluca el 20 de noviembre del 2009. *Pág. 69*

Tabla 5.4.4.- Muestra de despegues, tomada del Aeropuerto Internacional de Toluca el 20 de noviembre del 2009. *Pág. 69*

LISTADO DE GRAFICAS

Grafica 2.2.1.- Grafica para calcular la capacidad horaria. *Pág. 27*

Grafica 2.2.2.- Grafica posición-tiempo. *Pág. 29*

Grafica 2.2.3.- Grafica buffer. *Pág. 32*

Grafica 2.2.4.- Diagrama posición-tiempo. *Pág. 33*

INTRODUCCIÓN

Hoy en día la demanda aeroportuaria es mayor, trayendo como consecuencia el incremento de las operaciones, lo cual obliga a los operadores de los aeropuertos a incrementar la capacidad instalada de la infraestructura de los mismos. Ahora bien, la capacidad aeroportuaria está dada por la capacidad del sistema de pistas, la de los rodajes y la que se encuentra en plataforma. Estas tres capacidades deben de estar en equilibrio, ya que al estar alguna disminuida repercutirá notablemente en las otras dos; trayendo como consecuencia saturación, demoras e ineficiencia en las operaciones.

En la mayoría de los países miembros de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), entre los que se encuentra México, el cálculo de la capacidad operacional del sistema de pistas de un aeropuerto se hace siguiendo métodos gráficos y matemáticos recomendados por entidades como la OACI, por autoridades aeronáuticas locales o de otros países, o de algunos especialistas en la materia. Sin embargo es de cuestionarse la aplicación de estos métodos en aeropuertos de México, ya que podrían no ser confiables porque no cuentan con las mismas condiciones operacionales o los tipos de aeronaves que estos operan, por lo que los cálculos de capacidad de pistas son poco precisos si se aplican a aeropuertos mexicanos.

Considerando que en México existe poca experiencia para la realización de estudios sobre capacidad de sistemas de pistas, algunos de los grupos aeroportuarios han contratado empresas extranjeras de consultoría, para efectuar este tipo de trabajos a un costo sumamente elevado, además de que en éstos no se tiene la certeza de que sean confiables tales cálculos.

Sería de gran ayuda para los operadores contar con una herramienta que les permitiera realizar sus propios estudios, y que además esta herramienta utilizará el método que más pudiera adecuarse a las características particulares de cada aeropuerto.

Por lo anteriormente expuesto, en este trabajo de investigación se busca desarrollar una herramienta informática con la cual sea posible realizar el cálculo de la capacidad de pistas de un aeropuerto. Para este fin, este trabajo consta de 5 capítulos.

El capítulo 1, presenta las definiciones de capacidad de pista, los factores que afectan a la capacidad como: el control de tráfico aéreo, características de la demanda, factores del

entorno del aeropuerto y el factor por diseño; también se menciona la reglamentación y normatividad nacional relacionada a la investigación.

En el capítulo 2, se muestran los métodos que se analizarán en este trabajo de investigación los cuales son el; modelo de la Federal Aviation Administration (FAA) y el modelo basado en el concepto de posición-tiempo, y se identifican los parámetros operacionales que influyen en la capacidad de un sistema de pistas.

En el capítulo 3, se presenta una aplicación del modelo de la FAA, con una muestra tomada del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) y se analizan los resultados obtenidos.

El capítulo 4, aquí se presenta la interfaz de la herramienta informática, se da una breve explicación del funcionamiento de la misma y se presenta la creación de un complemento, para ingresar datos en tiempo real de las operaciones que se realizan en un aeropuerto.

En el capítulo 5, se da una descripción del Aeropuerto Internacional de Toluca (AIT); en su infraestructura, su ubicación algunos datos de sus operaciones y se describe el ejercicio que se realizó en el, utilizando el método posición-tiempo.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En México la tarea de hacer los cálculos y estudios aeronáuticos para determinar la capacidad de pistas se ha delegado a empresas consultoras, primordialmente extranjeras. Los modelos, que ocupan dichas empresas para los cálculos, en ocasiones no son claros o son desconocidos por el operador aeroportuario quien únicamente recibe los resultados que arrojó dicho estudio. Por todo esto, este proceso se vuelve una “caja negra” en donde el operador no sabe de dónde salieron los resultados, por lo cual si hay alguna modificación en infraestructura, en los procedimientos de aproximación, etc. se debe contratar de nuevo a la empresa consultora para que realice el estudio con las nuevas variables a considerar, lo que representa un gasto para el operador, gastos que muchas veces resultan muy elevados.

La existencia de una herramienta informática que calcule la capacidad de un sistema de pistas de manera “transparente”, y que sea fácilmente modificable para adaptarla a diferentes escenarios, les daría a los operadores la capacidad de realizar sus propios estudios y explorar distintos escenarios, como lo son las distintas capacidades que tendría su aeropuerto frente a diferentes condiciones meteorológicas, o el caso de rediseñar los procedimientos de aproximación, entre otros.

JUSTIFICACIÓN

Existen actualmente algunos modelos, computacionales y analíticos que permiten hacer el cálculo de la capacidad de un sistema de pistas, sin embargo se debe elegir aquél que tome en cuenta las características especiales de flota, infraestructura aeroportuaria y características operacionales particulares de México, pues no todos permiten modificar las variables para adaptarlas a dichas características.

Es necesario resaltar la importancia que tiene la capacidad operacional del sistema de pistas de un aeropuerto para efectos de planeación o desarrollo del mismo. Se mostrará más adelante que esta importancia también radica en asuntos económicos para el aeropuerto pues legalmente existen limitantes, condiciones de saturación, y dicha saturación se determina en base a la capacidad máxima del mismo. Por ello contar con una herramienta que permita obtener la capacidad de manera clara y que se adapte a las condiciones de cada aeropuerto es un tema de suma importancia en la industria aérea actual.

La investigación busca ser un apoyo a futuros profesionistas que deseen incursionar en este tema, pues no se cuenta con mucha experiencia en este campo, de manera que se logre crear una herramienta informática confiable para calcular la capacidad de un sistema de pistas que sea aplicable a los aeropuertos de México. Los resultados de esta investigación serán muy útiles para los administradores de los aeroportuarios, ya que con esta información se podrán enfrentar a problemas de saturación que puedan tener en un futuro, también será de gran utilidad para tener un mejor control sobre la capacidad de pistas.

HIPÓTESIS PRINCIPAL

La creación de una herramienta informática que permita el cálculo de la capacidad de pistas, permitirá a los operadores aeroportuarios tener mayores y mejores recursos para la planeación de infraestructura de sus aeropuertos.

HIPÓTESIS SECUNDARIA

- No existen en México empresas especializadas en estudios de capacidad de pistas.
- La oferta de diseño de herramientas que calculen la capacidad de pistas esta primordialmente ocupada por empresas extranjeras.

OBJETIVOS

Objetivo General

Desarrollar una herramienta informática que basada en diferentes modelos permita calcular la capacidad de sistemas de pistas de aeropuertos en México y que atienda las condiciones particulares de cada uno de ellos.

Objetivos Específicos

- Analizar los métodos existentes para determinar la capacidad de pistas de un aeropuerto y evaluar su aplicabilidad para aeropuertos mexicanos.
- Determinar los parámetros de operación durante el aterrizaje y despegue que influyen en la capacidad de las pistas.
- Elegir el modelo que mejor se aplique a los aeropuertos mexicanos.
- Desarrollar la herramienta informática.
- Obtener y analizar los registros de una muestra de operaciones de llegada y salida en tiempo real.
- Aplicar el modelo a la muestra de operaciones seleccionada y analizar los resultados obtenidos.

ALCANCE

La investigación determinará la capacidad operacional (aterrizajes y despegues) de las pistas de un aeropuerto en particular, a través de una herramienta informática que utilice el modelo que más se adecue a las características particulares de los aeropuertos mexicanos, y permitirá ser aplicado a otros aeropuertos del país con diferentes configuraciones.

Capítulo I

Capacidad del sistema de pistas de un aeropuerto

1.1 Capacidad de pista de vuelo

La capacidad indica la habilidad de un aeropuerto para recibir aeronaves. Esto se expresa en operaciones como por ejemplo, aterrizajes y despegues por unidad de tiempo; es así como se define la capacidad horaria de un sistema aeroportuario: “es el número máximo de operaciones de aeronaves que pueden utilizarlo en una hora con condiciones específicas de operación”. **(Horonjeff, 1994, p.295).**

Esta capacidad depende de muchas condiciones existentes, tales como el techo de nubes, la visibilidad, control del tráfico aéreo, la similitud de aeronaves, el tipo de operación que hay en los aeropuertos, configuración de pistas y rodajes.

La Administración Federal de Aviación (FAA, por sus siglas en inglés; Federal Aviation Administration), anteriormente recomendaba el concepto de "capacidad práctica", valor que corresponde a un "razonable" y "tolerable" nivel de demoras (por ejemplo, demora media en los despegues durante las dos horas pico consecutivas de la semana, de 4 minutos). El valor preferido y empleado a lo largo de este trabajo es la capacidad extrema o saturación, valor máximo de aeronaves que pueden operar durante un período dado en condiciones de demanda continúa. No debe confundirse capacidad con demanda. Capacidad significa la posibilidad física de un aeropuerto para atender eficazmente las operaciones de aterrizajes y despegues evitando la saturación del mismo, con ayuda de su infraestructura. La demora, sin embargo, es independiente de la capacidad y de la magnitud y fluctuación de la demanda que pueda tener el aeropuerto. Puede reducirse la demora de las aeronaves incrementando la capacidad y ofreciendo una distribución más uniforme de la demanda (por ejemplo, reduciendo las puntas de la demanda).¹

¹ Roberto, Horonjeff. (1994). Planning and design of airports. USA: McGraw Hill.

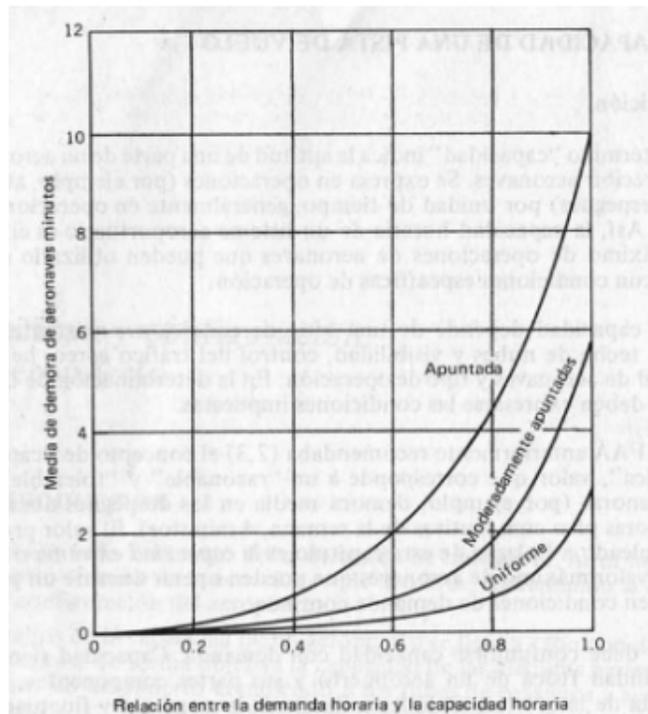


Figura 1.1.1.- Relación del índice demanda/capacidad y fluctuación de la demanda con la media horaria de la demora de aeronaves.

Fuente: Horonjeff, 1994, p. 315

En la figura 1.1.1 se observa que conforme la demanda se acerca a la capacidad, la demora de las aeronaves crece bruscamente. Además, calcular la magnitud de las demoras y su impacto económico es más importante al justificar la mejora de un aeropuerto que la determinación de su capacidad.

La capacidad de una pista de vuelo es generalmente, el elemento del control de la capacidad de un aeropuerto.

1.2 Factores que afectan a la capacidad

Existen un sin fin de factores que tienen influencia sobre la capacidad de una pista de vuelo, estos se pueden agrupar de la siguiente manera:

- 1.- Control del tráfico aéreo.
- 2.- Características de la demanda.
- 3.- Factores del entorno del aeropuerto.
- 4.- Factor por diseño.

Control del tráfico aéreo

Durante los procedimientos de aproximación a un aeropuerto, la separación que debe existir entre dos aeronaves es de 2 a 5 millas náuticas (3.7 a 9,3 km), dicha separación se modifica en función del tamaño y velocidad de aproximación de cada aeronave, esto beneficia a la disponibilidad del radar y en la secuencia de las operaciones del aeropuerto. Ya que no se permite que dos aviones estén en la pista simultáneamente, el tiempo de ocupación de la pista también influye en la capacidad.

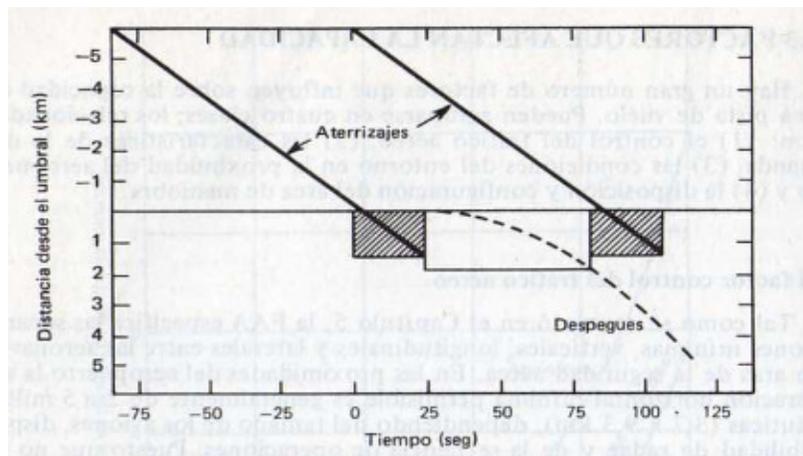


Figura 1.2.1.- Diagrama tiempo-distancia para dos aterrizajes y un despegue: rectángulo en blanco, pista ocupada por el despegue; rectángulo rayado, pista ocupada por el aterrizaje.

Fuente: Horonjeff, 1994, p. 319

La capacidad de una pista puede incrementarse sustancialmente intercalando un despegue entre dos aterrizajes, como se representa por la línea de trazos de la Fig. 6.2. Este esquema secuencial tiene como limitación la regulación de FAA, que requiere una separación mínima de 2 millas náuticas (3,6 km) entre un despegue y el aterrizaje siguiente.

El factor dominante en el control del tráfico aéreo que afecta a la capacidad es la separación. Otros factores son los siguientes:

1. La longitud del tramo común desde la entrada en la senda del ILS hasta el umbral, normalmente de 4 a 8 millas (7,4 a 15 km).
2. La estrategia empleada por los controladores en la sucesión de aeronaves que vuelan a diferentes velocidades (por ejemplo: primero que llega-primero atendido, clasificación por velocidad).
3. La probabilidad de violación de la regla de separación, reconociendo que no es posible mantener con precisión y en todo momento la separación recomendada.
4. La sofisticación de los sistemas de control de tráfico aéreo que afectan la precisión con la que los aviones pueden ser situados en el portal del ILS y la habilidad para monitorizar las velocidades de las aeronaves y detectar su posición y movimientos.²

Características de la demanda

Como ya se mencionó la capacidad de una pista depende del tamaño de los aviones, velocidad, maniobrabilidad, capacidad de freno, así como la técnica de los pilotos. El efecto que ocasionan las aeronaves en la punta de las alas se llama estela turbulenta, esto es debido al tamaño de la aeronave y el tamaño de la estela depende de la velocidad del mismo avión. Los grandes aviones generan torbellinos de punta de ala, que crean problemas de maniobrabilidad y control a los pequeños aviones que operan en su estela. La FAA ha introducido reglas para el control del tráfico aéreo, incrementando la separación entre un avión pequeño que sigue a un gran reactor, a 5 millas náuticas (9,3 km).

² Roberto, Horonjeff. (1994). Planning and design of airports. USA: McGraw Hill.

En muchos aeropuertos dedicados a la aviación general hay gran cantidad de pilotos entrenándose en las operaciones de Touch-and-go (tomas-despegues). Esta expresión se refiere a un avión que aterriza y despegue sin llegar a pararse totalmente. Esta maniobra es realizada para que los pilotos estén perfectamente entrenados de tal manera de que cuando tengan que hacer este tipo de maniobra la hagan de manera eficaz y sin tener ningún problema. Este tipo de operaciones, que se contabilizan como dos movimientos de aeronaves, pueden afectar significativamente la capacidad de la pista.

Otra característica de la demanda, que puede afectar significativamente a la capacidad de una pista, es el porcentaje de aterrizajes sobre el total de operaciones.

Factores del entorno del aeropuerto

Uno de los factores que pueden influir más en la capacidad de una pista es la visibilidad, las condiciones de la superficie de la pista, los vientos y los procedimientos para la reducción de ruidos.

En un entorno de mala visibilidad, los pilotos y los controladores del tráfico aéreo tienen que estar más atentos de lo normal para evitar problemas y que esto no sea factor para que se ocasione un accidente. Las separaciones aumentan y se incrementan los tiempos de ocupación de pistas, y las pistas, con vientos transversales, no son aptas para usarse. Cuando la visibilidad está extremadamente reducida las pistas pueden pasar a cerrarse al tráfico, esto ocasionara algunas demoras y problemas al aeropuerto.

“Por razones de seguridad, la velocidad de la componente del viento perpendicular a la trayectoria del avión no debería exceder de 15 nudos (27,8 km/h) y la componente en la dirección del movimiento del avión no debería sobrepasar los 5 nudos (9,3 km/h). Los vientos transversales o en cola, imponen ocasionalmente limitaciones al uso de una o varias pistas, con lo que la capacidad de las pistas se reduce.” **(Osio Granada, 2007: p.24).**

Factor por diseño

El diseño y configuración de un aeropuerto debe incluir la mayoría de los factores principales que afectan la capacidad de la pista. Cuando ha de aumentarse la capacidad de un aeropuerto para atender la demanda futura, el proyectista del aeropuerto ha de

considerar las mejoras en el diseño y configuración del conjunto de pista de vuelo y calles de rodaje. Los principales factores en este aspecto son:

1. El número, separación, longitud y orientación de las pistas de vuelo.
2. El número, situación y trazado de las calles de rodaje de salida.
3. El trazado de entradas a los slots.

1.3 Reglamentación y normatividad nacional asociada

Con respecto a la reglamentación y normatividad nacional asociada contamos con la Ley de Aeropuertos y su respectivo reglamento, de los cuales se presenta a continuación aquellos artículos que tienen relación directa con la capacidad de sistema de pistas de un aeropuerto.

Ley de Aeropuertos

Artículo 61. Todo aeropuerto constituirá un comité de operación y horarios.

Artículo 62. El comité de operación y horarios emitirá recomendaciones relacionadas con:

- El funcionamiento, operación y horario del aeropuerto.
- La asignación de horarios de operación, áreas, posiciones de contacto y remotas, itinerarios y de espacios dentro del aeropuerto, de acuerdo a los criterios establecidos.
- Las reglas de operación.
- Las medidas necesarias para la eficiente operación aeroportuaria.

Artículo 63. En los aeropuertos el administrador aeroportuario determinara los horarios de aterrizaje y despegue y las prioridades de turno de las aeronaves.

Reglamento de la Ley de Aeropuertos

Artículo 93. Para efectos del artículo 63 de la Ley, se entiende por horario de aterrizaje y despegue el asignado por el administrador aeroportuario a un transportista u operador aéreo para la organización y planeación de los vuelos en el aeródromo.

Artículo 94. En cada aeródromo la Secretaria determinara, el numero de aterrizajes y despegues que pueden ser atendidos en cada hora, para lo cual considerara la capacidad de operación del aeródromo, criterios de seguridad y eficiencia de acuerdo con la capacidad de las aeronaves y su programación de vuelos, así como las recomendaciones del comité de operación y horarios. En todo momento se deberán respetar las limitaciones del espacio aéreo que determine el prestador de los servicios a la navegación aérea.

La capacidad de operación de un aeródromo se medirá con base en el número máximo de operaciones por hora que puede atender en sus instalaciones en campo aéreo, esto es, pistas, calles de rodaje y plataformas, así como, con base en el número máximo de pasajeros por hora que pueden ser atendidos en el edificio terminal.

Artículo 95. El administrador aeroportuario asignara los horarios de aterrizaje y despegue de las aeronaves y las prioridades de turno de las mismas, considerando las recomendaciones del comité de operación y horarios, atendiendo:

Criterios de eficiencia y seguridad, así como de acuerdo con las prioridades siguientes:

- Regulares de pasajeros.
- De transporte aéreo no regular bajo la modalidad de fletamento para pasajeros.
- Regulares de carga.
- De transporte aéreo no regular de fletamento de carga.

Artículo 99. En el supuesto de que la Secretaria resuelva que un aeródromo se encuentra en condiciones de saturación en campo aéreo en horarios específicos, el administrador aeroportuario, a partir de que surta efectos dicha resolución, asignara los horarios de aterrizaje y despegue.

Artículo 100. La Secretaria, por si o petición de parte, escuchando previamente al concesionario o permisionario, determinara cuando un aeródromo se encuentra en condiciones de saturación. Se considerara que existen condiciones de saturación:

- En el campo aéreo, si en más de 52 ocasiones en el año en una hora determinada:
 - Se rebasa el número máximo de operaciones o solicitudes que pueden ser atendidas por hora en el campo aéreo.
 - Se demora de conformidad con las reglas de tránsito aéreo el aterrizaje o despegue de aeronaves por causas atribuibles al concesionario, tales como falta de pista, posiciones o servicios.

Los concesionarios y permisionarios deberán llevar un registro del número de operaciones totales atendidas en cada hora, precisando los aterrizajes y los despegues; el número de solicitudes recibidas, señalando cuales fueron atendidas y las que no, y las causas de ello.

Artículo 101. La Secretaria notificara al concesionario o permisionario la resolución en que determina que el aeródromo se encuentra en saturación.

Capítulo II

Parámetros principales de la capacidad de pistas

2.1 Identificar los parámetros operacionales que influyen en la capacidad de un sistema de pistas

La capacidad de un aeropuerto, en específico de la pista de aterrizajes, depende mucho de factores externos, es por ello que cuando se hace un estudio de capacidad a las pistas de un aeropuerto debe indicarse bajo que suposiciones o premisas se hizo el cálculo. Entre algunos de los factores que afectan la capacidad de un sistema de pistas están los siguientes:

- La configuración, número, espaciamiento y orientación del sistema de pistas.
- La configuración, número y localización de las calles de rodaje y salidas de la pista.
- La disposición, tamaño y número de posiciones en el área de plataforma.
- El tiempo de ocupación de pista para aeronaves despegando y aterrizando.
- El tamaño y mezcla de las aeronaves que están operando.
- Condiciones meteorológicas, dado que las reglas de vuelo son diferentes en buen tiempo que en mal tiempo.
- Condiciones del viento que puedan impedir a ciertas aeronaves que operen en la pista.
- Las reglas de abatimiento del ruido pues pueden limitar la operación y frecuencia de ciertas aeronaves.
- El número de aterrizajes contra el número de despegues.
- El número y frecuencia de operaciones para entrenamientos denominadas Touch & Go (T&G).
- La existencia y frecuencia de estelas turbulentas que nos requerirá una mayor separación entre aeronaves ligeras y pesadas.
- La existencia y tipo de las ayudas a la navegación.
- La disponibilidad y estructura del espacio aéreo para el establecimiento de procedimientos de llegada y de salida
- El tipo y límites de las facilidades de Control de Tránsito Aéreo (CTA).

[Horonjeff, 1994, p.303]

Los cálculos que se hacen para determinar la capacidad máxima de cualquier instalación (edificio terminal, plataformas, pistas, etc.) se realizan con condiciones ideales, es decir, sin condiciones climatológicas que puedan influir, pistas en perfecto estado, que el piloto realice la aproximación tal y como se prevé en los procedimientos (autorizados por la autoridad aeronáutica), etc. En el momento de presentar el estudio se debe especificar para qué condiciones son válidos los cálculos.

Debido a esto, los datos que arroje el cálculo de la capacidad de pistas pueden ser muy optimistas sin embargo si se le utiliza correctamente puede ser una herramienta de mucha ayuda para el estudio del aeropuerto.

2.2 Análisis de los modelos existentes

Debido a que éste trabajo intenta crear una herramienta informática que permita calcular la capacidad de los diferentes sistemas de pistas en aeropuertos mexicanos, lo que se intentará hacer en este análisis es verificar cuáles modelos tienen más facilidad de adaptarse a las diferentes mezclas que operan en un aeropuerto en particular.

Durante este capítulo se tratará de definir cuáles son los parámetros que se pueden modificar antes de aplicar el modelo.

El parámetro que más nos interesa modificar es el de la mezcla de aeronaves, pues sabemos que en México operan aviones con características muy particulares.

Modelo de la FAA

El Modelo aplicado por la FAA para el cálculo de la capacidad y análisis de las demoras en los aeropuertos está contenido en la “Advisory Circular (AC) 150/5060-5, titulada “Airport Capacity and Delay”.

Esta Circular contiene cálculos para computar la capacidad aeroportuaria, el volumen anual de las operaciones y las demoras de las aeronaves. Contiene además una computación especial de la capacidad cuando la misma se ve afectada por pobres

condiciones meteorológicas, de aeropuertos sin cobertura radar o sin ILS así como análisis detallados para evaluar aeropuertos con pistas paralelas y cálculos más refinados para analizar especiales situaciones que pueden afectar la capacidad de pista.

En este Modelo la capacidad horaria es influenciada por la configuración de pista, la mezcla de aeronaves, el porcentaje de arribos, el porcentaje de operaciones de Toque y Despegue bajo Reglas de Vuelo Visual (VFR) y la localización de las salidas de Calles de Rodaje. Se calcula la capacidad horaria tanto para condiciones en VFR o de Reglas de Vuelo Instrumental (IFR). Las condiciones meteorológicas es un factor determinante para este método de cálculo.

Complementariamente, este Modelo se basa en una gran cantidad de datos estadísticos recolectados durante años lo que permite, para los escenarios americanos, un muy buen desempeño para sus Aeropuertos entre la capacidad teórica y la real. **[Arca Jaurena, Roberto, 2009, p. A-10]**

Dicho documento incluye, además del texto explicativo, una serie de gráficas para el cálculo de la capacidad del sistema de pistas.

Para poder hacer los cálculos se debe contar con los siguientes datos:

- Visibilidad y techo (VFR, IFR o PVC).
- Configuración de las pistas.
- Mezcla de aeronaves ($MI=C+3D$).
- Porcentaje de aterrizajes.
- Porcentaje de operaciones T&G.
- Localización de los rodajes de salida. [FAA, AC150-5060-5, 1983, p.14]

Cabe mencionar que el índice de mezcla (MI) es el porcentaje relativo de operaciones realizadas por cada uno de los distintos tipos de aeronaves, de acuerdo con la clasificación que se asienta en dicho documento las aeronaves se dividen en los siguientes grupos:

Aircraft Class	Max. Cert. T.O. Weight (lbs)	Number Engines	Wake Turbulence Classification
A	12,500 or less	Single	Small (S)
B		Multi	
C	12,500 - 300,000	Multi	Large (L)
D	over 300,000	Multi	Heavy (H)

Tabla 2.2.1.- Fuente: FAA, AC150-5060-5, 1983, p.3

El porcentaje de operaciones para cada grupo de aeronaves se calculará de la siguiente manera:

$$\text{porcentaje} = \left(\frac{\# \text{ operaciones realizadas por el grupo de aeronaves}}{\# \text{ total de operaciones realizadas por todos los grupos}} \right) \times 100$$

Una vez con estos datos se calcula el índice de mezcla: $MI=C+3D$.

Se puede apreciar que los tipos de aeronaves A y B no se utilizan para el cálculo del índice de mezcla (MI), el impacto de esta omisión se estudiará más tarde en el documento.

Además se deberán calcular el porcentaje de llegadas (*arrivals*) y de operaciones de toque y despegue (*touch & go*), cuyas fórmulas se presentan a continuación:

$$\text{porcentaje arrivals} = \frac{A + 0.5(T\&G)}{A + D + T\&G} \times 100$$

$$\text{porcentaje T\&G} = \frac{T\&G}{A + D + T\&G} \times 100$$

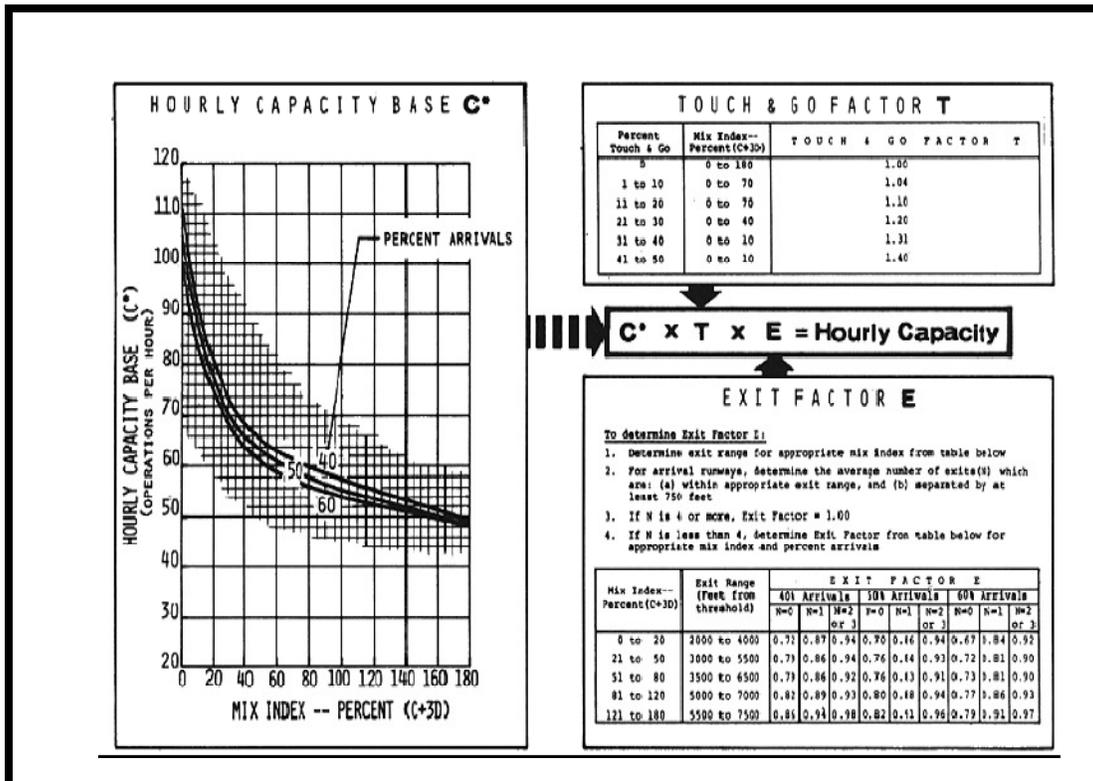
Donde: A – número de llegadas
D – número de salidas
T&G – número de operaciones de toque y despegue

Una vez con estos datos se entra a las primeras tablas en donde, de acuerdo con la configuración de las pistas, se nos direcciona hacia otra tabla.

RUNWAY-USE DIAGRAM	DIAG. NO	ANGLE Ø	FIGUR	
			FOR CAPACITY	
			VFR	IFR
	100	0° To 14°	3-42	3-44
	101	15° to 90°	3-42	3-5,
	102	NA	3-41	3-44

Tabla 2.2.2.- Fuente: FAA, AC150-5060-5, 1983, p.29

Con el número de diagrama y con los datos antes calculados ingresamos a la siguiente gráfica que nos brindará los datos de C*, T y E para aplicar la fórmula y con ello se obtiene el dato de capacidad horaria del sistema de pistas.



Grafica 2.2.1.- Fuente: FAA, AC150-5060-5, 1983, p.30

Podemos decir que en este caso se consideran bastantes variables de las que afectan la capacidad horaria, desde la configuración de las pistas hasta la ubicación de las salidas.

El problema que encontramos con esta metodología es que el índice de mezcla no toma en cuenta a las aeronaves más ligeras, esto consideramos que es una importante omisión, pues considerar la operación de aeronaves pequeñas en un aeropuerto es de alta importancia, toda vez que al operar ellas se deben dar separaciones más grandes en la senda de aproximación, siempre que la aeronave ligera sea precedida por una aeronave pesada, para evitarle a la ligera la estela turbulenta de la pesada. Estas separaciones más grandes obviamente influirán negativamente en la capacidad real del sistema de pistas.

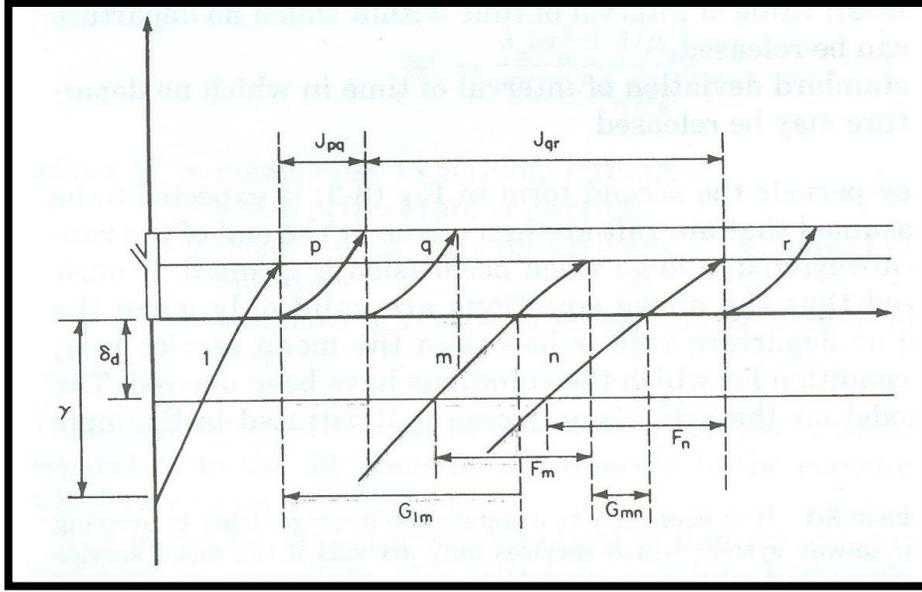
Otro punto que consideramos importante mencionar es que esta herramienta fue desarrollada en los Estados Unidos, por analistas basados en información de aeropuertos estadounidenses, los cuales tienen una mezcla de aeronaves y una configuración de pistas muy distinta a las que se encuentran en México.

Consideramos entonces que esta metodología aplicada a aeropuertos mexicanos nos dará valores lejanos a la realidad por las razones antes expuestas.

Modelo basado en el concepto de posición-tiempo

El concepto de posición-tiempo es muy útil cuando se requiere trabajar no solo con la pista sino también con el espacio aéreo en el cual operan las aeronaves al despegar o aterrizar.

El modelo se apoya en diagramas y gráficas lo que permite al analista visualizar cómo es que se comportan las aeronaves en dicho espacio aéreo.



Grafica 2.2.2.- Fuente: Horonjeff, 1994, p. 306

Las reglas para aterrizajes y despegues son las siguientes:

- Dos aeronaves no pueden operar en la pista al mismo tiempo.
- Las llegadas tienen prioridad sobre las salidas.
- Las salidas pueden efectuarse sólo si la pista está libre y la siguiente llegada se encuentra a una distancia determinada del umbral.

Haciendo el análisis del diagrama podemos observar varias cosas, por ejemplo, la salida p pudo realizarse debido a que la pista estaba libre y el siguiente aterrizaje se encontraba a una mayor distancia que δ_d . Lo mismo sucede para la salida q , la llegada m se encontraba a una mayor distancia que δ_d y la pista ya había sido desalojada por p y por eso pudo efectuarse.

A continuación abordaremos el modelo para el caso en que la pista está admitiendo llegadas únicamente. La capacidad horaria para este caso está afectada por los siguientes parámetros.

1. La mezcla de aeronaves, la cual se obtiene separando a los distintos aviones que operan en el aeropuerto en grupos de acuerdo a su velocidad de aproximación.

$$\text{porcentaje} = \left(\frac{\# \text{ operaciones realizadas por el grupo de aeronaves}}{\# \text{ total de operaciones realizadas por todos los grupos}} \right)$$

2. El promedio de la velocidad de las aeronaves de cada uno de dichos grupos.

$$\text{velocidad promedio} = \frac{\sum \text{ cada una de las velocidades de cada aeronave del grupo en kts}}{\text{total de aeronaves de ese grupo}}$$

3. La longitud de la senda de aproximación.
4. Las reglas de separación mínima.
5. La magnitud de los errores que se pueden encontrar al entrar a la senda de aproximación.
6. La probabilidad de violación de las reglas de separación mínima.
7. La ocupación promedio de la pista de cada una de las clases de aeronaves. **[Horonjeff, 1994, p. 311]**

$$\text{ocupación promedio} = \frac{\sum \text{ cada uno de los tiempos de ocupación de pista de cada aeronave del grupo}}{\text{total de aeronaves de ese grupo}}$$

Las aeronaves se agrupan según diferentes velocidades. El tiempo de servicio ponderado, en llegadas, se calcula a partir de un matriz de intervalos mínimos de tiempo entre pares de aviones en el umbral de la pista y a partir del porcentaje de las diferentes clases de aviones. Se calcula de la siguiente manera:

$$\Delta T_{ij} = \frac{\delta_{ij}}{V_j} \quad \text{si } V_i \leq V_j$$

$$\Delta T_{ij} = \frac{\delta_{ij}}{V_i} + \gamma \left(\frac{1}{V_j} - \frac{1}{V_i} \right) \quad \text{si } V_i > V_j$$

donde: γ = Longitud de la senda de aproximación

δ_{ij} = Separación mínima entre clases de aeronaves i y j

V_i = Velocidad del primer avión

V_j = Velocidad del avión siguiente

El inverso de este valor es la capacidad de la pista. La expresión matemática de esto es:

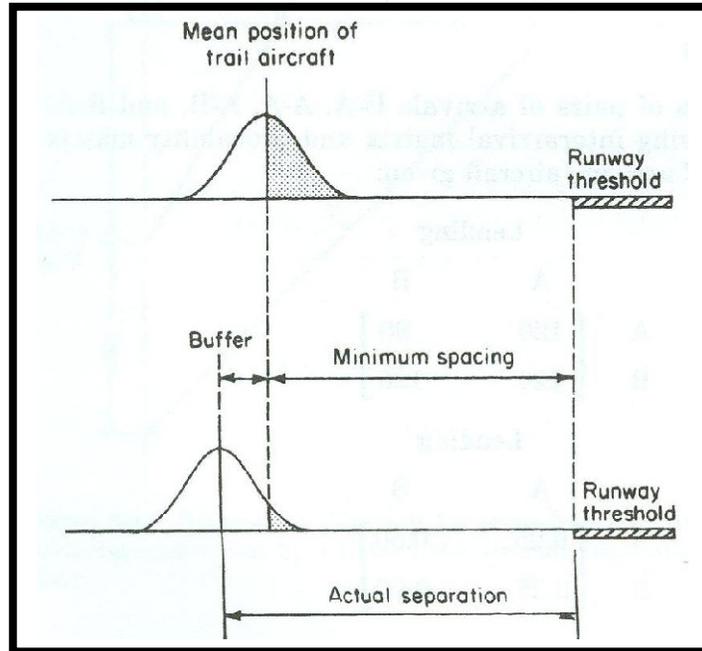
$$C_a = \frac{1}{\sum_{ij} P_{ij} T_{ij}}$$

donde: C_a = Capacidad de atender sólo salidas

P_{ij} = la matriz de probabilidades de que un avión i preceda a un avión j

T_{ij} = la matriz de tiempos mínimos de separación para una aeronave i seguida de una j

En el caso “libre de error” tendríamos aeronaves espaciadas de manera precisa de acuerdo a los mínimos de separación preestablecidos, por lo tanto llegarían al punto de inicio de aproximación final exactamente en el momento en que el controlador lo fijara. Sin embargo sabemos que las cosas no son así, la realidad es que muchas veces se violan éstas separaciones mínimas y por lo tanto la llegada al punto de inicio de aproximación final lleva un error inherente, se supondrá que ese error sigue una distribución normal con media cero y con una determinada desviación estándar. Para evitar violaciones en las separaciones mínimas se agrega un “colchón” o buffer a los tiempos de separación mínimos.



Grafica 2.2.3.- Fuente: Horonjeff, 1994, p. 316

Como podemos ver en el primer caso existe una probabilidad del 50% de que la segunda aeronave viole los mínimos de separación (área sombreada). Al agregar el buffer y suponiendo que es una función de tipo normal podemos ver que la probabilidad de que no se respeten los mínimos de separación disminuye. El tiempo a añadir (buffer) se puede calcular con las siguientes expresiones:

$$b_{ij} = q_v \sigma_0 \quad \text{si} \quad V_i \leq V_j$$

$$b_{ij} = q_v \sigma_0 - \delta_{ij} \left(\frac{1}{V_j} - \frac{1}{V_i} \right) \quad \text{si} \quad V_i > V_j$$

Donde q_v es el valor para el cual la distribución normal acumulativa, tiene el valor $1-p_v$.

Una vez calculados los intervalos de buffer la nueva matriz T se forma de la siguiente manera:

$$T_{ij} = M_{ij} + B_{ij}$$

Los cálculos antes realizados son para pistas que sólo reciben llegadas. Mostraremos los cálculos ahora para una pista que sólo sea para salidas.

$$C_d = \frac{3600}{E(t_d)}$$

$$E(t_d) = \sum [p_{ij}] [t_d]$$

donde: $E(t_d)$ = valor esperado del tiempo entre dos salidas consecutivas.

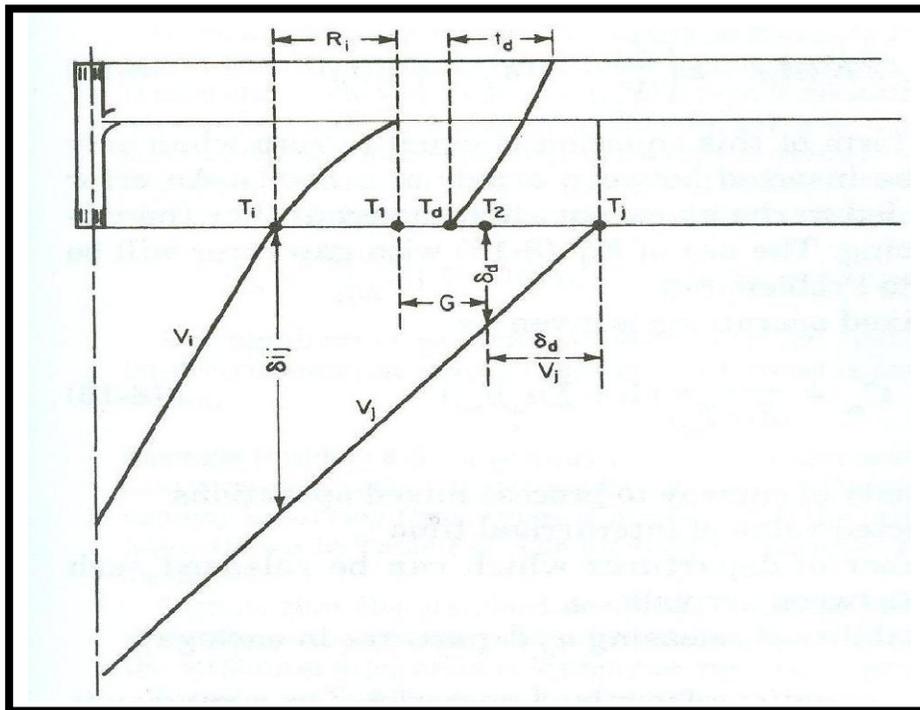
$[p_{ij}]$ = la matriz de probabilidades de que un avión i preceda a un avión j .

$[t_d]$ = matriz de tiempos entre salidas consecutivas.

C_d = Capacidad para atender sólo salidas

Sin embargo sabemos que en la mayoría de los casos no existen pistas únicamente para salidas o únicamente para llegadas por eso es necesario plantear cálculos que nos permitan conocer la capacidad de una pista que sea de aterrizajes y despegues.

Para calcular el caso de una pista que atiende operaciones mixtas de llegada y salida debemos recordar que los aterrizajes tienen prioridad sobre los despegues y que debe existir un intervalo de tiempo entre aterrizajes sucesivos para poder insertar un despegue. Estos intervalos se muestran en el diagrama posición-tiempo siguiente:



Grafica 2.2.4.- Fuente: Horonjeff, 1994, p. 321

$$G = T_2 - T_1 > 0$$

$$T_1 = T_i + R_i$$

$$T_2 = T_j - \frac{\partial_d}{V_j}$$

donde: G = es el espacio que hay entre que la primera llegada abandona la pista y la segunda de llegada se encuentra a la distancia mínima antes del umbral.

R_i = Tiempo de ocupación de pista de una llegada.

Para que una salida pueda efectuarse entre un par de llegadas debe cumplirse que:

$$T_j - T_i > R_i + \frac{\partial_d}{V_j}$$

Mediante una sencilla extensión de la ecuación anterior es:

$$E(\Delta T_{ij}) \geq E(R_i) + E\left(\frac{\delta_d}{V_j}\right) + (n_d - 1)E(t_d)$$

y la capacidad para servir operaciones mixtas llegadas-salidas.

$$C_m = \frac{1}{E(\Delta T_{ij})} (1 + \sum n_d p_{nd})$$

donde: C_m = capacidad para servir operaciones mixtas.

$E(\Delta T_{ij})$ = valor esperado del tiempo entre llegadas.

n_d = número de salidas que pueden ser efectuadas entre dos llegadas.

p_{nd} = probabilidad de hacer n_d salidas entre dos llegadas.

Como se puede constatar en éste método existen más variables que se pueden modificar para adaptar el modelo a las características especiales de cada aeropuerto. Creemos que este modelo es el más completo ya que en él sí se pueden tomar en cuenta las operaciones de aeronaves más pequeñas. Otro aspecto positivo es que es posible utilizar las reglas de separación mínima que se utilicen en diferentes condiciones meteorológicas por lo que es posible obtener diferentes capacidades dependiendo de cómo juguemos con los valores.

La desventaja de esto es que es un modelo analítico-estadístico lo que significa que se hicieron simplificaciones y suposiciones lo que podría repercutir en un valor de capacidad que no se acerque tanto a la realidad como se desea.

Otro inconveniente que se encontró con este modelo es que los cálculos son muy complicados y tardados lo que para fines prácticos es un obstáculo, sin embargo si se generara un software que realizara los cálculos, se lograría desarrollar una herramienta muy poderosa pues ésta permitiría realizar cuántos cálculos fueran necesarios y obtener distintas capacidades dependiendo de los valores que se introduzcan.

2.3 Comentarios

La capacidad de un sistema de pistas es un punto muy importante en el cual los administradores de un aeropuerto deben tomar en cuenta, si se establece un adecuado método de sistema de pistas, esto hará que se satisfagan la demanda de las operaciones ayudando a que no se cree una sobresaturación.

Un problema que se tiene en México es que los métodos que se aplican a los aeropuertos son extranjeros, lo cual puede ocasionar un problema porque los métodos tienen las configuraciones de los aeropuertos extranjeros y en México se cuenta con diferente infraestructura, operaciones y tipos de aeronaves.

Debemos de tomar conciencia sobre este tema que es muy importante, ya que si esto se sabe administrar de manera correcta, tendremos en los aeropuertos mexicanos una máxima eficiencia en cuestión de cubrir demandas y horarios provocando un excelente servicio para los usuarios.

Para garantizar los parámetros, es preciso que tanto el aeropuerto y las líneas aéreas cumplan con los requerimientos necesarios para tener operaciones seguras; como son tiempos de separación entre vuelos y el correcto seguimiento de las instrucciones por parte de las tripulaciones.

Capítulo III

Metodología

3.1 Elección del modelo más útil para la realización de la herramienta informática

Como ya se explico en el capítulo anterior, el modelo que más se adecua a no tener tantos errores, es el de posición-tiempo, ya que el de la FAA omite algunas consideraciones, por lo tanto la herramienta informática será realizada con el modelo posición-tiempo ya que se determino que es el que más se adecua a nuestra investigación.

Es considerado este modelo, ya que con éste existen más variables que se pueden modificar y así mismo poderse adaptar de mejor manera a cualquier aeropuerto con sus respectivas características. Otro punto que determinamos, fue que en este modelo si son tomadas en cuenta las operaciones de aeronaves de clasificación "A y B", las cuales en el modelo de la FAA no lo son, por esta situación creemos que el modelo posición-tiempo es mucho más exacto.

Este modelo es de gran utilidad para ser aplicado a los aeropuertos de México, ya que los modelos o métodos utilizados están creados con variables que en ocasiones no se encuentran aquí, como el tipo de mezcla de aeronaves, el sistema de pistas y rodajes.

Con el modelo posición-tiempo se obtendrán grandes ayudas para la capacidad de un aeropuerto. Con este tipo de cálculos se tendrán operaciones que se realicen dentro los rangos de seguridad y eficiencia, ya que con estos cálculos podemos conocer los límites operacionales. La incorporación de nuevas medidas que permitan mantener el promedio de las operaciones, como por ejemplo: la buena administración de horarios en hora pico. Se podrá determinar si hacen falta calles de rodaje y a qué distancia estarán. Podremos obtener la habilidad de determinar las operaciones simultáneas; lo cual propiciará un aumento de capacidad del aeropuerto.

La ventaja que obtendremos con este modelo, será que podremos poner valores característicos del aeropuerto, esto significa que dependiendo a nuestras necesidades el modelo se ajustara a las características específicas del aeropuerto.

3.2 Registros durante la operación real del AICM y la aplicación del modelo

Los siguientes datos fueron obtenidos de una muestra de la operación real realizada los días 9 y 15 de marzo de 2007 en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) y que se encuentran en la referencia bibliográfica [Azpiri Charteris, 2007, pp. K, L, M, N]. En la tabla T1 y T2 se muestran los tiempos de llegada al umbral y de desalojo de pista respectivamente, ambos tomados de acuerdo al Tiempo Universal Coordinado (UTC), que es el horario que se utiliza en todas las operaciones aéreas. En base a estos tiempos se calcula la ocupación de pista. La velocidad fue tomada con una pistola de velocidades en km/h y convertida posteriormente a nudos (KTS), dicha velocidad es la que tuvo la aeronave antes de tocar la pista.

Muestra del 9 de Marzo (Aterrizajes)

Denominación del tipo de aeronave	No.Vuelo	Tipo de aeronave	T1 [UTC]	T2 [UTC]	Ocupación [s]	Velocidad [kts]
B737	ASA252	M	21:23:57	21:24:41	44	131
F100	CBE7542	M	21:27:50	21:28:30	40	133
A320	MXA624	M	21:30:18	21:31:16	58	134
ATR42	TAO313	M	21:32:55	21:33:35	40	107
F100	CBE7332	M	21:34:35	21:35:35	60	133
A320	AWE173	M	21:36:06	21:36:44	38	134
MD80	AAL1653	M	21:38:16	21:39:00	44	133
A319	MXA421	M	21:40:34	21:41:30	56	130
MD80	AMX444	M	21:42:26	21:43:18	52	133
B737	CHP150	M	21:43:42	21:44:30	48	131
ERJ145	SLI2077	M	21:46:35	21:47:22	47	112
A319	MXA835	M	21:48:12	21:49:20	68	130
MD80	AMX253	M	21:50:33	21:51:41	68	133
A320	MXA140	M	21:52:28	21:53:20	52	134
A320	MXA642	M	22:04:44	22:05:49	65	134
B737	AMX135	M	22:06:20	22:07:17	57	131
B737	GMT711	M	22:07:42	22:08:48	66	131
B767	AMX006	H	22:09:28	22:10:42	74	153
B737	AMX518	M	22:10:52	22:12:08	76	131
MD80	AMX532	M	22:12:20	22:13:47	87	133
ERJ145	SLI2045	M	22:14:57	22:16:05	68	112
A320	MXA506	M	22:16:21	22:17:30	69	134
B737	GMT734	M	22:19:20	22:20:40	80	131
ERJ145	SLI2432	M	22:21:00	22:21:54	54	112
B737	AMX929	M	22:22:34	22:23:41	67	131
A320	MXA465	M	22:24:35	22:25:45	70	134
DASH8	XCBDM	L	22:26:05	22:27:10	65	118

Tabla 3.2.1.- Fuente: Azpiri Charteris, 2007

En la tabla T1 y T2 se enlistan los tiempos de inicio de la carrera de despegue y de desalajo de pista (pase sobre el umbral) respectivamente, ambos tomados de acuerdo al Tiempo Universal Coordinado (UTC). En base a estos tiempos se calcula la ocupación de pista. La velocidad fue tomada con una pistola de velocidades en km/h y convertida posteriormente a KTS, dicha velocidad es la que tuvo la aeronave en el momento de la rotación.

Muestra del 9 de Marzo (Despegues)

Denominación del tipo de aeronave	No.Vuelo	Tipo de aeronave	T1 [UTC]	T2 [UTC]	Ocupación [s]	Velocidad [kts]
A320	MXA	M	21:23:43	21:24:32	49	168
ERJ145	SLI	M	21:25:01	21:26:02	61	121
ATR42	TAO	M	21:27:21	21:28:35	74	97
MD80	AMX	M	21:31:55	21:32:55	60	156
B737	AMX	M	21:33:35	21:34:15	40	163
B757	DAL	M	21:36:31	21:37:30	59	156
A319	MXA	M	21:38:52	21:39:49	57	160
B737	CHP	M	21:40:01	21:40:58	57	163
B737	DAL	M	21:41:07	21:41:55	48	163
F100	CBE	M	21:43:46	21:44:46	60	150
ERJ145	SLI	M	21:44:58	21:45:59	61	121
ATR42	TAO	M	21:46:10	21:47:06	56	97
ATR42	TAO	M	21:47:08	21:48:21	73	97
B767	AMX	H	21:50:12	21:51:20	68	153
A318	MXA	M	21:52:36	21:53:33	57	159
B737	DAL	M	21:53:34	21:54:49	75	156
B737	CHP	M	22:01:45	22:02:44	59	163
F100	CBE	M	22:02:44	22:03:41	57	150
MD80	AAL	M	22:03:45	22:04:40	55	156
MD80	AMX	M	22:05:15	22:06:21	66	156
A318	MXA	M	22:06:35	22:07:20	45	159
A320	MXA	M	22:07:13	22:08:22	69	168
ATR42	TAO	M	22:08:30	22:09:21	51	90
B727	PFP	M	22:11:45	22:12:48	63	157
B737	AMX	M	22:13:05	22:13:58	53	163
B737	CHP	M	22:13:55	22:14:52	57	163
ATR42	TAO	M	22:14:45	22:15:46	61	90
ERJ145	SLI	M	22:17:28	22:18:31	63	121
ATR42	TAO	M	22:20:34	22:21:35	61	90
B737	AMX	M	22:22:38	22:23:44	66	163

Tabla 3.2.2.- Fuente: Azpiri Charteris, 2007

El tipo de aeronave se determina por el tamaño de la misma, esta dimensión será determinante para la estela turbulenta que pueda generar. [L: light (ligera); M: médium (mediana); H: heavy (pesada)].

De dichas muestras se obtuvieron los siguientes parámetros:

Aterrizajes

Mezcla

Tipo	Mezcla [%]
L	3.70%
M	92.59%
H	3.70%

Matriz de probabilidades

		Segundo Avión		
		L	M	H
Primer Avión	L	0.000	0.000	0.000
	M	0.038	0.885	0.038
	H	0.000	0.038	0.000

Tiempos y velocidades promedio

Tipo Aeronave	Prom. Ocupación [s]	Prom. Vel. [kts]
L	65	118
M	58.96	129
H	74	153

Despegues

Mezcla

Tipo	Mezcla [%]
L	3.33%
M	96.67%
H	0.00%

Matriz de probabilidades

		Segundo Avión		
		L	M	H
Primer Avión	L	0.000	0.000	0.000
	M	0.000	0.931	0.034
	H	0.000	0.034	0.000

Tiempos y velocidades promedio

Tipo Aeronave	Prom. Ocupación [s]	Prom. Vel. [kts]
L	-----	-----
M	59.07	142
H	68	153

Además el aeropuerto tiene los siguientes parámetros operacionales:

- Longitud de la senda de aproximación: 3.62 MN
- Distancia mínima entre un avión aproximándose y un despegando: 2 MN
- Reglas de separación (aproximación) en MN:

		Segundo Avión		
		L	M	H
Primer Avión	L	3	3	3
	M	4	3	3
	H	6	5	4

- Reglas de separación (despegues) en segundos:

		Segundo Avión		
		L	M	H
Primer Avión	L	60	60	60
	M	120	60	60
	H	120	120	60

Con dichos parámetros se calculará la capacidad de pistas, iniciaremos calculando:

$$\Delta M_{ij} = \begin{bmatrix} 91.53 & 83.72 & 70.59 \\ 121.05 & 83.72 & 70.59 \\ 166.44 & 133.49 & 94.12 \end{bmatrix}$$

Posteriormente calcularemos la matriz Buffer (tiempo a añadir) para una probabilidad aceptable de violación de los mínimos de separación del 20%, quedando la siguiente matriz:

$$B_{ij} = \begin{bmatrix} 16.8 & 16.8 & 16.8 \\ 6.394 & 16.8 & 16.8 \\ 0 & 0 & 16.8 \end{bmatrix}$$

Calculemos ahora la matriz ΔT_{ij} con la siguiente expresión:

$$\Delta M_{ij} + B_{ij} = \Delta T_{ij} = \begin{bmatrix} 108.33 & 100.52 & 87.39 \\ 127.44 & 100.52 & 87.39 \\ 166.44 & 133.49 & 110.92 \end{bmatrix}$$

Una vez con este dato y aplicando la fórmula:

$$C_a = \frac{3600}{\sum_{ij} P_{ij} T_{ij}}$$

$$\sum_{ij} P_{ij} T_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0.038 & 0.885 & 0.038 \\ 0 & 0.038 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 108.33 & 100.52 & 87.39 \\ 127.44 & 100.52 & 87.39 \\ 166.44 & 133.49 & 110.92 \end{bmatrix} = 0(108.33) + \dots + 0.885(100.52) + \dots = 102.1964$$

obtenemos así: $C_a = 35.226$ ops/hr

Calculemos ahora la capacidad para atender operaciones únicamente de salida:

$$E(t_d) = \sum [p_{ij}] [t_d]$$

$$E(t_d) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.931 & 0.034 \\ 0 & 0.034 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 60 & 60 & 60 \\ 120 & 60 & 60 \\ 120 & 120 & 60 \end{bmatrix} = 0(60) + \dots + 0.931(60) + \dots = 61.98s$$

$$C_d = \frac{3600}{E(t_d)}$$

$$C_d = 58.08 \text{ ops/hr}$$

Hemos obtenido así la capacidad para el supuesto en que sólo se efectuaran aterrizajes y si sólo se efectuaran despegues, para calcular la capacidad para atender operaciones mixtas de aterrizaje y despegue se deben efectuar los siguientes cálculos.

$$E(\Delta T_{ij}) \geq E(R_i) + E\left(\frac{\delta_d}{V_j}\right) + (n_d - 1)E(t_d)$$

En este caso y si agregamos un buffer, para evitar las violaciones de los mínimos de separación por parte de los pilotos, tenemos:

$$n = 1$$

$$E(R_i) = 59.74 \text{ s}$$

$$E\left(\frac{\delta_d}{V_j}\right) = 55.68 \text{ s}$$

$$E(t_d) = 61.98 \text{ s}$$

$$E(B_{ij}) = 11.91 \text{ s}$$

$$E(\Delta T_{ij}) = 59.74 + 55.68 + 11.91 + 61.98 (n_d - 1)$$

$$E(\Delta T_{ij}) = 127.33 + 61.98 (n_d - 1)$$

Esto quiere decir que para poder efectuar un despegue entre 2 llegadas la separación mínima debe ser de 127.33 s, para efectuar 2 despegues entre llegadas la separación mínima debe ser de 189.31.

Analizando la matriz de tiempos de llegadas observamos que únicamente podemos efectuar una sola salida entre 2 llegadas sucesivas manteniendo los mínimos de separación radar. con ello tenemos:

$$C_m = \frac{1}{E(\Delta T_{ij})} (1 + \sum n_d p_{nd})$$

$$C_m = \frac{3600}{102.1964} (1 + 0.076(1)) = 37.9 \text{ ops/hr}$$

Obtendremos ahora la capacidad de pistas para los datos recolectados el 12 de marzo de 2009.

Muestra del 12 de Marzo (Aterrizajes)

Denominación del tipo de aeronave	No.Vuelo	Tipo de aeronave	T1 [UTC]	T2 [UTC]	Ocupación [s]	Velocidad [kts]
B737	AMX253	M	22:01:52	22:02:52	60	131
A320	MXA421	M	22:03:05	22:03:57	52	134
A320	MXA506	M	22:04:47	22:05:58	71	134
A320	MXA955	M	22:06:31	22:07:17	46	134
B767	AMX006	H	22:08:15	22:09:10	55	153
A320	UAL821	M	22:09:23	22:10:33	70	134
B737	GMT711	M	22:10:58	22:11:55	57	131
B737	AMX483	M	22:12:37	22:13:32	55	131
F100	CBE7332	M	22:14:59	22:16:15	76	133
ATR42	TAO353	M	22:16:39	22:17:35	56	107
A320	MXA624	M	22:18:07	22:18:58	51	134
MD80	AMX532	M	22:19:37	22:20:32	55	133
B737	AMX929	M	22:21:55	22:22:47	52	131
A319	MXA342	M	22:23:20	22:24:26	66	130
B737	AMX306	M	22:25:27	22:26:37	70	131
B737	GMT734	M	22:27:21	22:28:05	44	131
A320	MXA929	M	22:29:33	22:30:42	69	134
B737	CHP501	M	22:31:53	22:32:48	55	131
F100	CBE7422	M	22:37:48	22:38:31	43	133
MD80	AMX423	M	22:39:54	22:40:48	54	133
ERJ145	SLI2045	M	22:41:09	22:42:00	51	112
B737	AMX637	M	22:43:37	22:44:47	70	131
F100	CBE7684	M	22:45:05	22:46:04	59	133
B737	CHP150	M	22:46:44	22:47:51	67	131
MD80	AMX185	M	22:48:34	22:49:28	54	133
B767	MAA6872	H	22:49:51	22:51:05	74	153
B737	AMX279	M	22:51:23	22:52:26	63	131
ATR42	TAO563	M	22:52:49	22:53:43	54	107
MD80	AMX287	M	22:54:50	22:55:52	62	133
ATR42	TAO3354	M	22:56:04	22:57:06	62	107
A320	MXA579	M	22:57:22	22:58:34	72	134
ATR42	TAO145	M	22:59:13	23:00:06	53	107
SABRE	MT204	L	23:00:42	23:01:46	64	106

Tabla 3.2.3.- Fuente: Azpiri Charteris, 2007

[L: light (ligera); M: médium (mediana); H: heavy (pesada)].

Muestra del 12 de Marzo (Despegues)

Denominación del tipo de aeronave	No.Vuelo	Tipo de aeronave	T1 [UTC]	T2 [UTC]	Ocupación [s]	Velocidad [kts]
A318	MXA324	M	21:59:05	21:59:57	52	159
A320	MXA436	M	22:00:17	22:01:11	54	168
MD80	AMX581	M	22:01:59	22:02:55	56	156
A318	MXA223	M	22:03:02	22:03:55	53	159
F100	CBE7927	M	22:04:04	22:05:00	56	150
B737	CHP331	M	22:07:03	22:07:58	55	163
F100	CBE7545	M	22:08:48	22:09:41	53	150
MD80	AMX232	M	22:09:46	22:10:42	56	156
B737	COA	M	22:10:46	22:11:46	60	156
ATR42	TAO348	M	22:13:26	22:14:26	60	90
ATR42	TAO615	M	22:14:36	22:15:24	48	90
ATR42	TAO651	M	22:15:38	22:16:41	63	90
MD80	AAL1156	M	22:18:22	22:19:14	52	156
B737	CHP253	M	22:20:40	22:21:30	50	163
MD80	AMX202	M	22:21:32	22:22:25	53	156
A320	MXA361	M	22:22:25	22:23:25	60	168
B737	AMX928	M	22:23:50	22:24:41	51	163
B737	CHP470	M	22:24:41	22:25:45	64	156
LJ45	XCPGN	L	22:25:50	22:26:55	65	86
B757	AMX172	M	22:28:05	22:28:57	52	156
B737	AMX527	M	22:30:49	22:31:47	58	156
ERJ145	SLI2072	M	22:31:56	22:32:55	59	121
B737	AMX404	M	22:32:49	22:34:07	78	156
MD80	AMX128	M	22:34:23	22:35:17	54	156
B737	CHP215	M	22:35:25	22:36:24	59	163
B737	AMX419	M	22:36:46	22:37:39	53	163
A318	MXA627	M	22:42:02	22:43:04	62	159
ERJ145	SLI2442	M	22:45:11	22:46:15	64	121
B757	AAL2188	M	22:47:05	22:47:53	48	156
B737	AMX488	M	22:49:40	22:50:25	45	163
B737	ASA231	M	22:50:55	22:51:42	47	163
SABRE	TP140	L	22:52:20	22:53:29	69	86
ATR42	TAO626	M	22:53:27	22:54:26	59	97
A320	MXA523	M	22:56:00	22:56:47	47	168
ERJ145	SLI2476	M	22:58:35	22:59:37	62	121

Tabla 3.2.4.- Fuente: Azpiri Charteris, 2007

[L: light (ligera); M: médium (mediana); H: heavy (pesada)].

De las muestras se obtuvieron los siguientes parámetros:

Aterrizajes

Mezcla

Tipo	Mezcla [%]
L	3.03%
M	90.91%
H	6.06%

Matriz de probabilidades

		Segundo Avión		
		L	M	H
Primer Avión	L	0.000	0.000	0.000
	M	0.031	0.844	0.063
	H	0.000	0.063	0.000

Tiempos y velocidades promedio

Tipo Aeronave	Prom. Ocupación	Prom. Vel. [kts]
L	64	106
M	58.97	128
H	64.5	153

Despegues

Mezcla

Tipo	Mezcla [%]
L	5.71%
M	94.29%
H	0.00%

Matriz de probabilidades

		Segundo Avión		
		L	M	H
Primer Avión	L	0.000	0.059	0.000
	M	0.059	0.882	0.000
	H	0.000	0.000	0.000

Tiempo y velocidades promedio

Tipo Aeronave	Prom. Ocupación	Prom. Vel. [kts]
L	67.00	86
M	55.85	147
H	-----	-----

Utilizando los mismos parámetros operacionales del aeropuerto calcularemos la capacidad de pistas, se omitirán los cálculos pues son similares al caso anterior, únicamente se presentarán los resultados de dichos cálculos.

$$C_a = 34.78 \text{ ops/hr}$$

$$C_d = 56.66 \text{ ops/hr}$$

$$C_m = 38.05 \text{ ops/hr}$$

3.3 Análisis de resultados

Como se puede observar durante los cálculos de capacidad para ambos días el modelo de posición-tiempo nos permitió introducir parámetros operacionales del aeropuerto como lo son la longitud de la senda de aproximación y las mezclas de aeronaves que operan en el aeropuerto.

Asimismo permitió introducir parámetros que tienen que ver más con el control de tránsito aéreo y que son particulares de cada aeropuerto, por ejemplo los mínimos de separación radar para aterrizajes y de separación entre despegues, así como los mínimos de distancia que deben existir para efectuar un despegue antes de una aeronave en aproximación. Igualmente se pudieron introducir datos estadísticos de la operación de las aeronaves.

Sin embargo la capacidad de pistas obtenida con este método fue mucho más baja que la reportada por las autoridades del aeropuerto, 38 operaciones por hora contra 54 que es la real.

Esto se debe indudablemente a que el modelo que se utilizó para el cálculo de capacidad es aplicable a aeropuertos con una sola pista, cuando el AICM cuenta con 2 pistas paralelas. Podríamos decir que la capacidad reportada en este trabajo es la capacidad que tendría el AICM si una de sus pistas fuera cerrada.

Se deberán realizar tomas de datos en aeropuertos con una sola pista, por lo que se propone para ello el aeropuerto de Toluca (MMTO).

Capítulo IV

Propuesta de desarrollo de la herramienta informática

4.1 Determinación de los parámetros necesarios y creación de la interfaz

Para la aplicación del modelo posición-tiempo propuesto por Roberto Horonjeff se necesitan los siguientes datos:

1. La mezcla de aeronaves, la cual se obtiene separando a los distintos aviones que operan en el aeropuerto en grupos de acuerdo a su velocidad de aproximación.
2. El promedio de la velocidad de las aeronaves de cada uno de dichos grupos.
3. La longitud de la senda de aproximación.
4. Las reglas de separación mínima.
5. La magnitud de los errores que se pueden encontrar al entrar a la senda de aproximación.
6. La probabilidad de violación de las reglas de separación mínima.
7. La ocupación promedio de la pista de cada una de las clases de aeronaves.

En base a dichos datos, necesarios para la aplicación del método, se creó la interfaz de usuario, la cual solicita los mínimos datos necesarios para el cálculo de la capacidad de pistas del aeropuerto, y la cual se muestra en la Figura 4.1. La interfaz de usuario y el programa en su totalidad fueron realizados en Microsoft Visual Basic 2005 Express.

Una vez creada la interfaz de usuario se procedió a la programación del método de Horonjeff para el cálculo de la capacidad de pistas y el cual se encuentra explicado a detalle en el capítulo 2 de esta tesina.

Una vez ingresados los datos se puede dar inicio a la aplicación del método con el botón "Calcular", un ejemplo de dicho cálculo se encuentra en la Figura 4.2.

Capacidad de Pistas

Probabilidad aceptable de violación de los mínimos de separación
 5% 10% 15% 20%

Reglas de separación aterrizaje - aterrizaje [MN]

	Light	Medium	Heavy
Segundo Avión	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Primer Avión	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Reglas de separación despegue - despegue [s]

	Light	Medium	Heavy
Segundo Avión	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Primer Avión	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Matriz de Probabilidades (Aterrizajes)

	Light	Medium	Heavy
Segundo Avión	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Primer Avión	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Matriz de Probabilidades (Despegues)

	Light	Medium	Heavy
Segundo Avión	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Primer Avión	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Mezcla [%]

	Aterrizajes	Despegues
Light	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Medium	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Heavy	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Promedio de tiempo utilizado en pista [s]

Light	<input type="text"/>
Medium	<input type="text"/>
Heavy	<input type="text"/>

Velocidad Promedio de aproximación [Kts]

Light	<input type="text"/>
Medium	<input type="text"/>
Heavy	<input type="text"/>

Longitud de la senda de aproximación [MN]

Distancia mínima entre un avión aproximándose y otro despegando [MN]

Desviación estándar [s]

Ca Ops / hr
 Cd Ops / hr
 Crr Ops / hr

Calcular

Ingresar datos en tiempo real

Figura 4.1.1.- Interfaz del programa

Capacidad de Pistas

Probabilidad aceptable de violación de los mínimos de separación
 5% 10% 15% 20%

Tipo de aeronave	Velocidad aproximación [Kts]	Promedio de tiempo utilizado en pista [s]	Mezcla [%]		Despegues
			Aterrizajes	Despegues	
Light	106	64	3.03	5.71	
Medium	128	58.97	90.91	94.23	
Heavy	153	64.5	6.06	0	

Reglas de separación aterrizaje - aterrizaje [MIN]

Primer Avión	Segundo Avión		
	Light	Medium	Heavy
Light	3	3	3
Medium	4	3	3
Heavy	6	5	4

Matriz de Probabilidades (Aterrizajes)

Primer Avión	Segundo Avión		
	Light	Medium	Heavy
Light	0	0	0
Medium	0.031	0.844	0.063
Heavy	0	0.063	0

Reglas de separación despegue - despegue [s]

Primer Avión	Segundo Avión		
	Light	Medium	Heavy
Light	60	60	60
Medium	120	60	60
Heavy	120	120	60

Matriz de Probabilidades (Despegues)

Primer Avión	Segundo Avión		
	Light	Medium	Heavy
Light	0	0.059	0
Medium	0.059	0.882	0
Heavy	0	0	0

Longitud de la senda de aproximación [MIN]
362

Distancia mínima entre un avión aproximándose y uno despegando [MIN]
2

Desviación estándar [s]
20

Ingresar datos en tiempo real

Calcular

	Ca	Cps /hr
	34.78276	
	Cd	Cps /hr
	56.65722	
	Cn	Cps /hr
	38.05234	

Figura 4.1.2.- Resultado de la aplicación del método

Los datos introducidos en la interfaz corresponden a las observaciones realizadas el 12 de marzo de 2007 en el AICM. Se puede apreciar que los resultados corresponden con aquellos obtenidos mediante la aplicación manual del método por lo que se concluye que la programación fue correcta y la aplicación del método se llevó a cabo como se esperaba.

4.2 Creación del complemento “Ingresar datos en tiempo real”

Durante la realización de los cálculos a mano e incluso con la ayuda del programa antes mencionado, se observó que dada la extensión de las muestras tomadas se vuelve complicado la determinación de ciertos parámetros necesarios para la aplicación de este método, como lo son las matrices de probabilidades tanto de aterrizajes como de despegues, así como los promedios de velocidades y ocupación de cada uno de los tipos de aeronaves.

Es por ello que se decidió crear un complemento a este programa, el cual permitiera:

- la introducción, en tiempo real, de los datos necesarios para el cálculo de la capacidad de pistas,
- la introducción de bases de datos previamente tomadas,
- visualizar de manera gráfica los puntos críticos de la toma de datos, como lo son el paso por las cabeceras o el desalojo de la pista,
- crear un archivo de texto que almacenara dichos datos para una posterior consulta o para realizar otro tipo de análisis,
- trasladar los datos al programa de cálculo de capacidad de pistas para realizar el cálculo sin mayores complicaciones.

Con base en todo esto se propuso la creación de una nueva interfaz de usuario, accesible desde el programa principal de cálculo de capacidad de pistas presionando el botón “Ingresar datos en tiempo real”. Dicha interfaz se muestra en la Figura 4.3

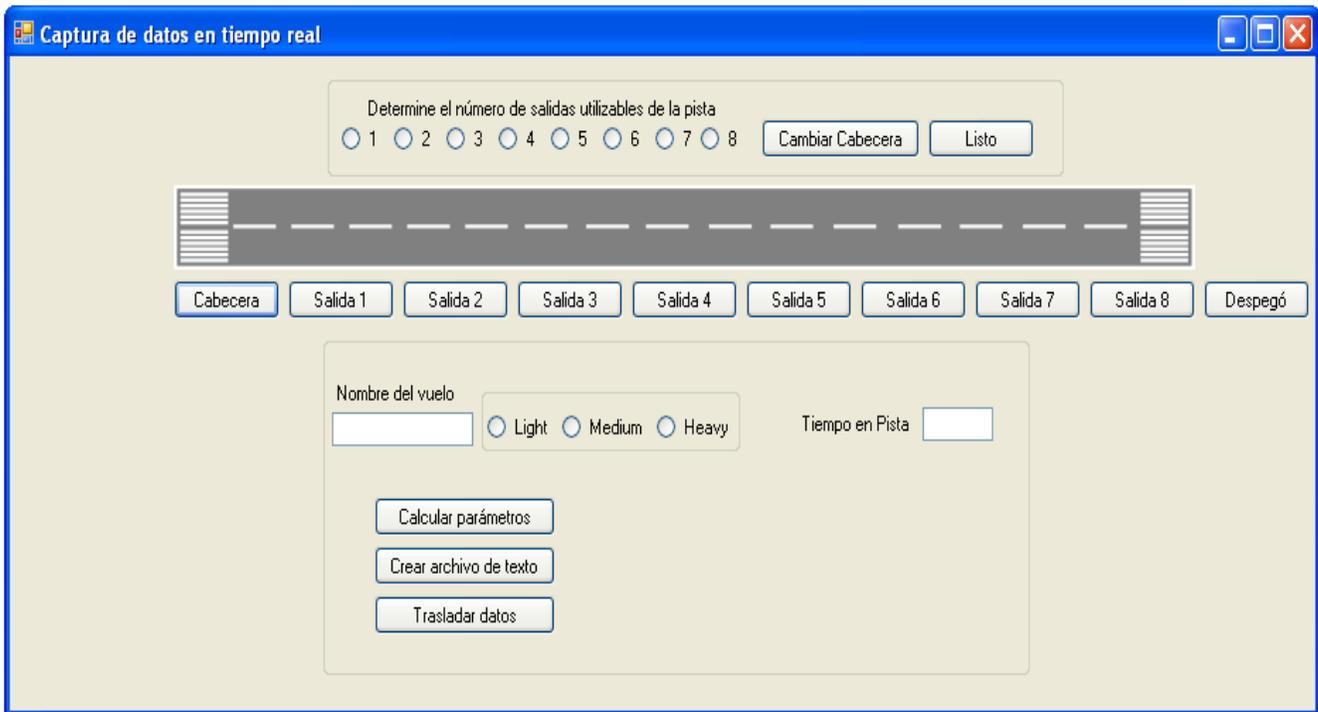


Figura 4.2.1.- Interfaz de usuario del complemento

En este complemento como se puede ver es posible calcular, a partir de datos ingresados en tiempo real, los parámetros necesarios para el cálculo de la capacidad de pistas, es decir, es posible llevar este programa a la toma de muestras en campo e introducirlos directamente al programa para que éste realice el análisis.

Para ello lo único que requiere el programa son, el nombre del vuelo, el tipo de aeronave y 2 clics más, uno sobre el botón “Cabecera” para el momento en que la aeronave se encuentre en la cabecera de la pista y que es lo que hace correr el cronómetro para la toma del tiempo de ocupación de pista. Se debe hacer clic en este botón ya sea para aviones aterrizando o para aviones despegando. El segundo clic dependerá del tipo de operación, para aterrizajes se hará clic sobre el botón que represente la salida utilizada por la aeronave al momento de desalojar la pista, para aeronaves despegando se hará clic sobre el botón “Despegó” en el momento en que se considere que la aeronave abandonó la pista.

El programa automáticamente almacena el tiempo de ocupación, así como los datos del nombre del vuelo, el tipo de aeronave, y para el caso de los aterrizajes la salida utilizada.

Con ello calculará, presionando el botón “Calcular parámetros”, la mezcla de aeronaves para aterrizajes y despegues, las matrices de probabilidad para aterrizajes y despegues, y el promedio de los tiempos de ocupación para cada tipo de aeronave.

Una vez calculados estos datos se podrá crear un archivo de texto, presionando el botón “Crear archivo de texto”, que muestre una tabla con todas las operaciones realizadas, separadas en aterrizajes y despegues, y también con los parámetros antes mencionados para el cálculo de la capacidad de pistas.

Asimismo con el botón “Trasladar datos” se podrán llevar dichos parámetros al programa principal de cálculo de capacidad de pistas para aplicar el método de posición-tiempo. A continuación se muestra como quedaría un archivo de texto utilizando el programa complementario.

ATERRIZAJES

Nombre de vuelo	Tiempo en pista (s)	Salida utilizada	Tipo Aeronave
AMX253	60	4	M
MXA421	52	3	M
MXA506	71	3	M
MXA955	46	5	M
AMX006	55	4	H
UAL821	70	4	M
AMX483	55	4	M
CBE7332	76	2	M
TAO353	56	2	M

DESPEGUES

Nombre de vuelo	Tiempo en pista (s)	Tipo Aeronave
MXA324	52	M
MXA436	54	M
AMX581	56	M
MXA223	53	M
CBE7927	56	M
CHP331	55	M
CBE7545	53	M
AMX232	56	M
COA234	60	M
XCPGN	65	L
TP140	69	L

MEZCLA ATERRIZAJES

L 0
M 88.88889
H 11.11111

MEZCLA DESPEGUES

L 18.18182
M 81.81818
H 0

MATRIZ PROB ATERRIZAJES

		Segundo Avión		
		L	M	H
Primer avión	L	0	0	0
	M	0	0.75	0.125
	H	0	0.125	0

MATRIZ PROB DESPEGUES

		Segundo Avión		
		L	M	H
Primer avión	L	0.1	0	0
	M	0.1	0.8000001	0
	H	0	0	0

PROM TIEMPOS OCUPACIÓN

L 0
M 60.75
H 55

Es importante mencionar que este complemento no está limitado a la toma de datos únicamente en campo, sino que también se puede realizar el ingreso de datos de muestras tomadas previamente. Esto se hace ingresando directamente el tiempo de ocupación de pista en el cuadro de texto, y en vez de hacer clic en el botón “Cabecera” se hará únicamente clic en el botón de la salida utilizada, para operaciones de aterrizaje, o en el botón “Despegó” para operaciones de despegue. El resto de los datos se ingresa de manera análoga.

Capítulo V

Estudio realizado al Aeropuerto Internacional de Toluca

pasando estos últimos de 110,000 durante el año 2005 a 2.2 millones en el 2006, a 3.3 en el 2007 y el año de 2008, cerró con 4.1 millones de pasajeros. Con lo anterior, el Aeropuerto Internacional de Toluca se consolida como una nueva y atractiva opción para atender viajeros residentes en la zona metropolitana del Valle de México y centro del país.

Asimismo el Gobierno Federal instrumentó el Sistema Metropolitano de Aeropuertos como alternativa para descongestionar el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM), siendo parte fundamental del mismo el Aeropuerto Internacional de Toluca (AIT), que ha iniciado un proceso de crecimiento impulsado por los Gobiernos Federal y Estatal, así como por capital privado.

El AIT, ha generado 4,500 empleos entre directos e indirectos y ha contribuido a detonar la actividad empresarial y comercial de la región. Asimismo, ha atraído la atención de una importante clientela radicada en la Ciudad de México que usaba el AICM y que ahora encuentra una atractiva alternativa para volar desde Toluca. Lo anterior, lo coloca entre los primeros cinco aeropuertos del país. Con la infraestructura actual: un edificio de 28 mil 300 metros cuadrados, un estacionamiento para más de dos mil vehículos y una plataforma con capacidad para recibir hasta 26 aeronaves, el AIT ofrece una capacidad instalada para atender hasta ocho millones de pasajeros anuales.

El AIT cuenta con una de las pistas más largas del país cuya longitud es de 4.2 kilómetros por 45 metros de ancho. Puede atender aeronaves de gran fuselaje y tiene capacidad para manejar hasta **36 operaciones aéreas por hora**.

Cuenta con la más avanzada tecnología en equipamiento que cumple con los más estrictos estándares de seguridad y eficiencia en aterrizajes automáticos, aún con niveles mínimos de visibilidad. Esta estructura tecnológica conocida como ILS CAT III ubica al Aeropuerto Internacional de Toluca como el primero en su tipo en México.³

³ AMAIT – Aeropuerto Internacional de la Ciudad de Toluca – Página Oficial
<http://www.am-ait.com/>

5.2 Información General

En la siguiente tabla se muestra la información general del aeropuerto de Toluca.

Información General	
País	México
Identificación OACI	MMTO
Hora Local	UTC-6(-5DT)
Latitud	19.337072 19° 20' 13.46" N
Longitud	-99.566008 099° 33' 57.63" W
Elevación	8466 ft 2580 m
Tipo	Civil
Variación Magnética	007° E (01/06)
Nombre Alternativo	TOLUCA INTL
Ciudad Cercana	Toluca
Horas de Operación	24 Horas
Horario de Verano	del primer domingo de abril al último sábado de octubre

Tabla 5.2.1.- Fuente: worldaerodata.com

5.3 Infraestructura

En la siguiente tabla se muestra información sobre la pista, sus dimensiones, el tipo de superficie, la latitud y longitud donde se ubica, la distancia del umbral desplazado, etc.

PISTAS			
Pista	Dimensiones	Superficie	PCN
15/33	13780 x 148 pies 4200 x 45 metros	Concreto Asfáltico	057FBXT
Pista 15			
Superficie	Concreto Asfáltico		
Rumbo verdadero	157.0°		
Latitud	19.354497 19° 21' 16.19" N		
Longitud	-99.573881 099° 34' 25.97" W		
Distancia de Aterrizaje (LD)	13485 ft 4110 m		
Distancia de Despegue (TOD)	13960 ft 4255 m		
Distancia de Umbral Desplazado	295 ft 90 m		
Prolongación de Pista	180 ft 55 m		
Superficie de la Prolongación de Pista	Concreto Asfáltico		
Sistemas de iluminación	HIRL A2 PAPI		
Pista 33			
Superficie	Concreto Asfáltico		
Rumbo verdadero	337.0°		
Latitud	19.319647 19° 19' 10.73" N		
Longitud	-99.558133 099° 33' 29.28" W		
Distancia de Aterrizaje (LD)	13255 ft 4040 m		
Distancia de Despegue (TOD)	13960 ft 4255 m		
Distancia de Umbral Desplazado	525 ft 160 m		
Prolongación de Pista	180 ft 55 m		
Superficie de la Prolongación de Pista	Concreto Asfáltico		
Sistemas de iluminación	HIRL PAPI		

Tabla 5.3.1.- Fuente: worldaerodata.com

A continuación se muestra el plano general de las instalaciones del aeropuerto de Toluca

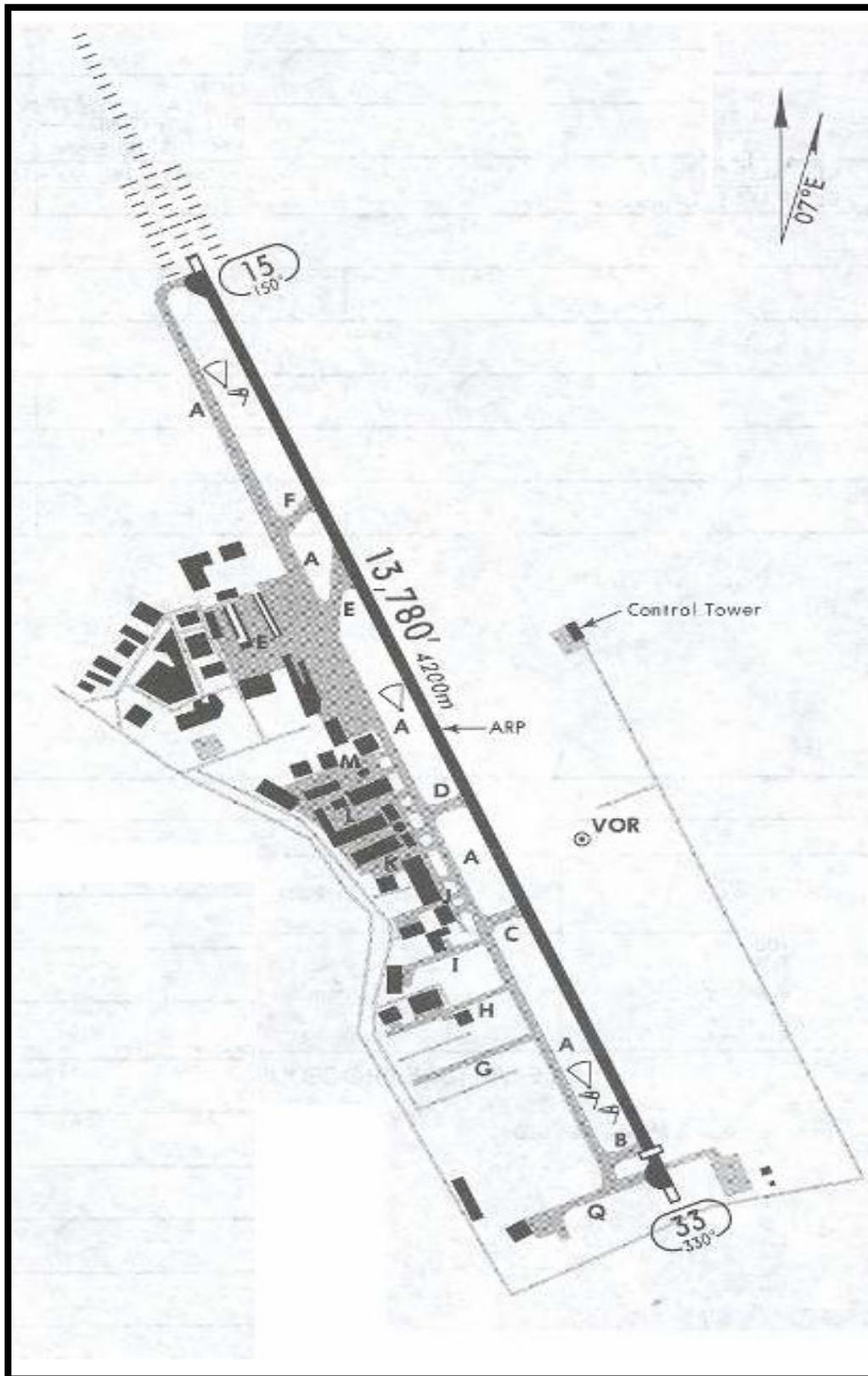


Figura 5.3.1.- Plano General del Aeropuerto de Toluca

Como se puede observar el aeropuerto tiene una sola pista, la 15/33, dicha pista dispone de 5 salidas denominadas: A, F, D, C y B y una salida rápida E. Al observar que la mayoría de las operaciones de aterrizajes se realizan por la cabecera 15, se ha detectado que, la mayoría de las aeronaves desalojan por C o incluso por B y al no haber una salida intermedia se provoca que las ocupaciones de pista de cada aeronave sean altas.

La mayoría de las posiciones de contacto se encuentran cerca del rodaje E por lo que la aeronave al pasar dicho rodaje y al tener que abandonar hasta C o B provoca una disminución en la capacidad operativa del sistema pista – rodaje – plataforma.

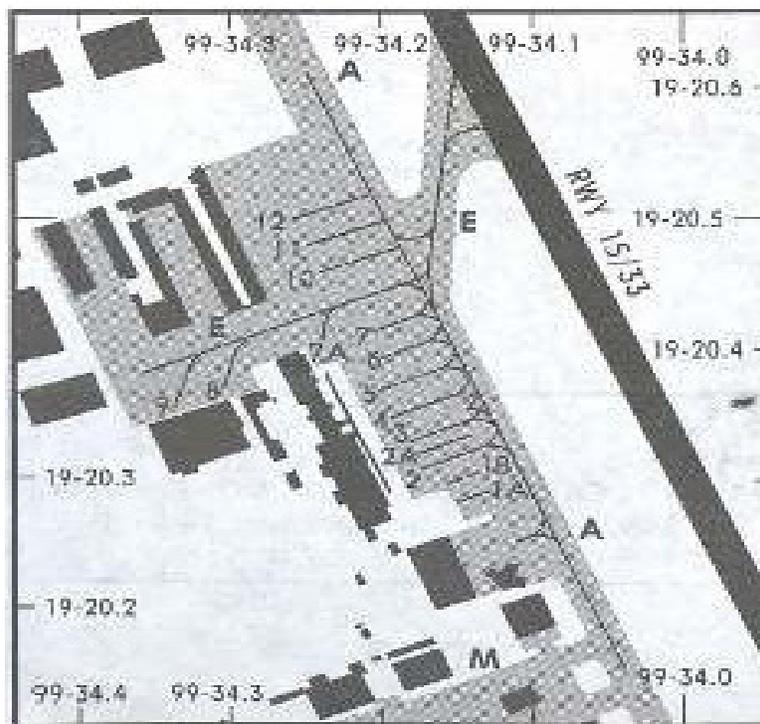


Figura 5.3.2.- Plano de posiciones en plataforma.

La pista 15 es la que cuenta con ILS Categoría III lo que permite aproximaciones por instrumentos en condiciones de visibilidad limitada hasta con un alcance visual en pista; Runway Visual Range (RVR) de 200m y una altura de decisión de 100ft.

Por la condición de los vientos predominantes en el área, la mayoría de los aterrizajes se hacen por la pista 15, pudiéndose apreciar en las siguientes imágenes satelitales en las cuales se observa la mayor contaminación por caucho de los neumáticos cerca de la cabecera 15.



Figura 5.3.3.- Vista Satelital Cabecera 15



Figura 5.3.4.- Vista Satelital Cabecera 33

Fuente: Google Earth ®

5.4 Toma de muestras

La toma de muestras en las operaciones se realizó durante los días jueves 19 y viernes 20 de noviembre de 2009. Se eligieron estos días pues en pláticas con los administradores aeroportuarios se nos informó que los jueves y viernes eran los días con mayor cantidad de operaciones, además de que en este caso particular el día 20 era día feriado, por lo que se preveía un aumento en el número de operaciones tanto de aviación general como comercial.

El día 19 de noviembre la toma de muestras se realizó de las 18:00 hrs a las 21:30 hrs, incluyendo la hora pico de la noche que va aproximadamente de las 18:00 hrs a las 19:30 hrs.

El día 20 de noviembre la toma de muestras se realizó de las 5:00 hrs a las 10:00 hrs, incluyendo la hora pico de la mañana que va aproximadamente de las 6:00 hrs a las 7:30 hrs.

En dicho aeropuerto se conto con la facilidad de monitorear las operaciones de llegadas y salidas desde el Centro de Control Operativo (CCO) del aeropuerto, adscrito a la administración del mismo.



Figura 5.4.1.- CCO del Aeropuerto Internacional de Toluca

Desde dicho Centro se pudieron tomar los datos más importantes para la aplicación del método antes descrito para obtener la capacidad de pistas.

Los datos más importantes que se pudieron obtener en estas oficinas fueron las matrículas o número de vuelo de las aeronaves, que con la ayuda de una base de datos del mismo aeropuerto pudimos saber también el equipo o tipo de aeronave de la cual se trataba. Asimismo la posición privilegiada que tiene esta oficina permitió tomar, con la ayuda de un cronómetro, el tiempo desde que un avión en aproximación cruza la cabecera de la pista hasta que la desaloja por cualquiera de las salidas antes mencionadas.

Posteriormente fue necesario acudir a las oficinas de Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM) localizadas cerca de la torre de control, para conocer más datos sobre los parámetros operacionales que se manejan en el aeropuerto como lo son las reglas de separación mínima entre aeronaves en aproximación, las reglas de separación entre despegues consecuentes, la longitud de la senda de aproximación, la distancia mínima entre un avión aterrizando y uno despegando, así como las velocidades de aproximación de las aeronaves que en este aeropuerto operan. Los resultados del proceso anterior se muestran en las siguientes tablas:

Muestra del 19 de noviembre (Aterrizajes)

Denominación del tipo de aeronave	No.Vuelo	Tipo de aeronave	Tiempo de ocupación en pista [s]	Velocidad promedio de aproximación [kts]
A319	VOI281	M	57	130
C650	XARRQ	M	34	130
A320	AIJ217	M	43	130
A319	VOI201	M	69	130
A319	VOI917	M	53	130
BE190	XAMVD	L	35	110
A320	AIJ307	M	55	130
LJ29	XCVSA	M	62	130
A319	VOI173	M	43	130
C130	FAM3615	M	40	130
ERJ145	SLI2616	M	58	130
A319	VOI901	M	50	130
GLF5	XABAL	M	50	130
A320	AIJ119	M	45	130
LJ45	XAEFM	M	47	130
BE20	N556BA	L	61	130
A320	AIJ704	M	50	130
A320	VOI135	M	62	130
H25A	XAMBM	M	54	130
C680	XAUJP	M	46	130
LJ25	XAJSC	M	54	130

Tabla 5.4.1

Muestra del 19 de noviembre (Despegues)

Denominación del tipo de aeronave	No.Vuelo	Tipo de aeronave
HS25	XAKNH	L
HS25	XANTE	L
C500	XCGTO	L
A319	VOI152	M
A320	AIJ703	M
C510	XAVMX	L
C130	FAM3615	L
A320	AIJ216	M
C500	XAAGA	M
A320	AIJ120	M
AC90	N122AV	L
LJ29	XCVSA	M
A319	VOI5130	M
A319	VOI214	M
A319	VOI182	M
A319	VOI142	M
MD10	FEDEX	H
A319	VOI174	M
ERJ145	SLI2617	M

Tabla 5.4.2

Muestra del 20 de noviembre (Aterrizajes)

Denominación del tipo de aeronave	No.Vuelo	Tipo de aeronave	Tiempo de ocupación en pista [s]	Velocidad promedio de aproximación [kts]
A320	AIJ103	M	56	130
AC90	N122AV	L	20	100
C650	XAGPS	M	63	130
BE40	XATWW	M	65	130
A319	VOI281	M	63	130
A319	VOI171	M	53	130
C210	XBJJT	L	47	80
A320	AIJ109	M	68	130
H25B	XATYK	M	58	130
ERJ145	COA2160	M	52	130
C182	XBHYF	L	69	80
MD10	FEDEX	H	68	160
A319	VOI219	M	54	130
A320	AIJ203	M	50	130
A320	AIJ650	M	49	130

Tabla 5.4.3

Muestra del 20 de noviembre (Despegues)

Denominación del tipo de aeronave	No.Vuelo	Tipo de aeronave
FA10	XAGPA	L
LJ35	XAWIN	M
A320	VOI210	M
A319	VOI170	M
A319	VOI180	M
A319	VOI218	M
A319	VOI192	M
GLF3	XAAEX	M
H25B	XATYK	M
H25B	XAAMI	M
GLF5	XAOEM	M
C525	XAUJY	L
BE40	XAUCV	M
A319	VOI280	M
A320	AIJ202	M
C525	XAALT	M
BE20	N556BA	L
C210	XBIZY	L
A320	AIJ651	M
C650	XAAEB	M
GLF3	XARBS	M
C172	XBINJ	L

Tabla 5.4.4

5.5 Obtención de parámetros operacionales

De dichas muestras en las operaciones se obtuvieron los siguientes parámetros operacionales:

Para el día 19 de noviembre

Aterrizajes

Mezcla

Tipo	Mezcla [%]
L	9.52%
M	90.48%
H	0.00%

Matriz de Probabilidades

		Segundo Avión		
		L	M	H
Primer Avión	L	0.000	0.100	0.000
	M	0.100	0.800	0.000
	H	0.000	0.000	0.000

Tiempos y velocidades promedio

Tipo Aeronave	Prom. Ocupación [s]	Prom. Vel. [kts]
L	48	120
M	51.16	130
H	-----	-----

Despegues

Mezcla

Tipo	Mezcla [%]
L	31.58%
M	63.16%
H	5.26%

Matriz de Probabilidades

		Segundo Avión		
		L	M	H
Primer Avión	L	0.167	0.167	0.000
	M	0.111	0.444	0.056
	H	0.000	0.056	0.000

Para el día 20 de noviembre

Aterrizajes

Mezcla

Tipo	Mezcla [%]
L	20.00%
M	73.33%
H	6.67%

Matriz de Probabilidades

		Segundo Avión		
		L	M	H
Primer Avión	L	0.000	0.143	0.071
	M	0.214	0.500	0.000
	H	0.000	0.071	0.000

Tiempos y Velocidades Promedio

Tipo Aeronave	Prom. Ocupación [s]	Prom. Vel. [kts]
L	86.67	87
M	57.36	130
H	68	160

Despegues

Mezcla

Tipo	Mezcla [%]
L	22.73%
M	77.27%
H	0.00%

Matriz de probabilidades

		Segundo Avión		
		L	M	H
Primer Avión	L	0.048	0.143	0.000
	M	0.143	0.667	0.000
	H	0.000	0.000	0.000

Asimismo el Aeropuerto Internacional de Toluca tiene los siguientes parámetros operacionales:

- Longitud de la senda de aproximación: 12 MN
- Distancia mínima entre un avión aproximándose y un despegando: 7 MN
- Reglas de separación (aproximación) en MN:

		Separación del Segundo Avión (MN)		
		L	M	H
Primer Avión	L	5	6	6
	M	6	6	6
	H	8	8	8

- Reglas de separación (despegues) en segundos:

		Separación del Segundo Avión (s)		
		L	M	H
Primer Avión	L	60	120	120
	M	120	60	60
	H	300	180	60

Cabe mencionar en este punto que las separaciones entre aeronaves en aproximación que operan en el aeropuerto de Toluca, no obedecen únicamente a la separación por estela turbulenta, sino que los controladores dan dichas separaciones ya que conocen la infraestructura del aeropuerto, y que las aeronaves no van a poder desalojar en los rodajes óptimos, es decir, dichas separaciones obedecen más a limitaciones infraestructurales del aeropuerto que a limitaciones del espacio aéreo.

Asimismo la separación entre aeronaves al despegue no tiene que ver tanto con la categoría de estela turbulenta sino más bien con los procedimientos de salidas por instrumentos (SID's) en los cuales se debe considerar las velocidades al despegue de cada aeronave.

Una vez más se corroboró las bondades que otorga el utilizar el método de Horonjeff para el cálculo de la capacidad de pistas, pues nos permite introducir estos parámetros únicos para cada aeropuerto en el cálculo de la capacidad.

5.6 Cálculo de la Capacidad

Con la ayuda del software ya programado y detallado en el Capítulo IV se calculará la capacidad para atender operaciones en la pista del Aeropuerto Internacional de Toluca. Se utilizará para calcular la capacidad una desviación estándar de 10 segundos en las posiciones de las aeronaves ya que según los controladores los procedimientos de aproximación no son tan complicados y los pilotos pueden cumplirlos con mayor precisión, además se utilizará la misma probabilidad aceptable de violación de los mínimos de separación igual que para el AICM, del 20%.

5.6.1 Determinación de la capacidad correspondiente al 19 de noviembre

A continuación se presenta una captura de la pantalla del programa con los datos de los parámetros operacionales antes mencionados ingresados y los resultados obtenidos.

Capacidad de Pistas

Probabilidad aceptable de violación de los mínimos de separación
 5% 10% 15% 20%

Tipo de aeronave	Velocidad Promedio de aproximación [Kts]	Promedio de tiempo utilizado en pista [s]	Mezcla [%]	
			Aterrizajes	Despegues
Light	120	48	9.52	31.58
Medium	130	51.16	90.48	63.16
Heavy	160	74	0	5.26

Longitud de la senda de aproximación [MN]: 12

Distancia mínima entre un avión aproximándose y uno despegando [MN]: 7

Desviación estándar [s]: 10

Botón: Ingresar datos en tiempo real

Botón: Calcular

	Ca	Ops / hr
Ca	20.39856	0ps / hr
Cd	43.13443	0ps / hr
Cm	20.39856	0ps / hr

Reglas de separación aterrizaje - aterrizaje [MN]

	Light	Segundo Avión Medium	Heavy
Light	5	6	6
Primer Avión Medium	6	6	6
Heavy	8	8	8

Matriz de Probabilidades (Aterrizajes)

	Light	Segundo Avión Medium	Heavy
Light	0	0.1	0
Primer Avión Medium	0.1	0.8	0
Heavy	0	0	0

Reglas de separación despegue - despegue [s]

	Light	Segundo Avión Medium	Heavy
Light	60	120	120
Primer Avión Medium	120	60	60
Heavy	300	180	60

Matriz de Probabilidades (Despegues)

	Light	Segundo Avión Medium	Heavy
Light	0.167	0.167	0
Primer Avión Medium	0.111	0.444	0.056
Heavy	0	0.056	0

Figura 5.6.1.1.- Resultado de los datos del aeropuerto internacional de Toluca del 19 de noviembre del 2009.

Los resultados, como se puede apreciar, fueron:

$$C_a = 20.40 \text{ ops/hr}$$

$$C_d = 43.13 \text{ ops/hr}$$

$$C_m = 20.40 \text{ ops/hr}$$

Siendo; C_a : Capacidad de aterrizajes, C_d : Capacidad de despegues, C_m : Capacidad mixta.

5.6.2 Determinación de la capacidad correspondiente al 20 de noviembre

A continuación se presenta una captura de la pantalla del programa con los datos de los parámetros operacionales antes mencionados ingresados y los resultados obtenidos.

The screenshot shows the 'Capacidad de Pistas' software interface. It includes input fields for aircraft type, speed, and separation rules, and displays calculated capacity values for arrivals (Ca), departures (Cd), and mixed traffic (Cm).

Tipo de aeronave	Velocidad Promedio de aproximación [Kts]	Promedio de tiempo utilizado en pista [s]	Mezcla [%]	
			Aterrizajes	Despegues
Light	87	86.67	20	22.73
Medium	130	57.36	73.33	77.27
Heavy	160	68	6.67	0

Reglas de separación aterrizaje - aterrizaje [MN]		Segundo Avión		
		Light	Medium	Heavy
Primer Avión	Light	5	6	6
	Medium	6	6	6
	Heavy	8	8	8

Matriz de Probabilidades (Aterrizajes)		Segundo Avión		
		Light	Medium	Heavy
Primer Avión	Light	0	0.143	0.071
	Medium	0.214	0.500	0
	Heavy	0	0.071	0

Reglas de separación despegue - despegue [s]		Segundo Avión		
		Light	Medium	Heavy
Primer Avión	Light	60	120	120
	Medium	120	60	60
	Heavy	300	180	60

Matriz de Probabilidades (Despegues)		Segundo Avión		
		Light	Medium	Heavy
Primer Avión	Light	0.048	0.143	0
	Medium	0.143	0.667	0
	Heavy	0	0	0

Ca	17.11608	Ops / hr
Cd	46.62004	Ops / hr
Cm	20.77892	Ops / hr

Figura 5.6.2.1.- Resultado de los datos del aeropuerto internacional de Toluca del 20 de noviembre del 2009.

Los resultados, como se puede apreciar, fueron:

$$C_a = 17.12 \text{ ops/hr}$$

$$C_d = 46.62 \text{ ops/hr}$$

$$C_m = 20.78 \text{ ops/hr}$$

5.7 Comentarios

Como resultado del análisis realizado con anterioridad, mismo que ha sido expuesto de manera extensa en el presente trabajo, se han obtenido dos capacidades: la primera, realizada para el periodo nocturno de 20.48 ops/hr, y una segunda, para el periodo matutino de 20.78 ops/hr.

Ambos resultados aparecen muy similares entre sí, por lo tanto, se puede concluir en que no existe una gran diferencia entre el volumen de operaciones que se pueden atender en ambos periodos. El promedio de ambas capacidades da **20.63 ops/hr**, dato que en este trabajo se reporta como la capacidad de pista que posee el AIT.

Comparando dicha cifra con la oficial (36 ops/hr) se puede observar que existe una discrepancia de casi el 75%, lo que se debe en gran medida a que, durante la entrevista con el personal encargado del Control de Tránsito Aéreo en las oficinas de SENEAM en el AIT, se nos informó que los datos proporcionados eran los que brindaban mayor seguridad a las operaciones y, puesto que en este aeropuerto no se recibían muchas operaciones, aunado a que no se encontraba en ningún momento en períodos de saturación, existía la posibilidad de dar más holgura a las separaciones de las operaciones en aproximación, sobre todo si existían operaciones de despegue en espera y se necesitaba intercalarlas entre dos aterrizajes. Es por ello que las cifras utilizadas en este estudio son promedios utilizados por los controladores y no representan del todo una situación de casi saturación.

En este trabajo se han establecido como principales premisas:

- el conocimiento del espacio aéreo que poseen los controladores, que son los que se encuentran en contacto constante con las aeronaves y pilotos,

- su noción de los procedimientos de aproximación y la eficacia con que se cumplen éstos, y
- su sentido de seguridad operacional.

Es por ello que se considerarán como válidos y lo más cercano a la realidad posible los parámetros operacionales reportados en el presente trabajo.

Otro punto a considerar es que la capacidad reportada oficialmente se refiere al conjunto pista – rodaje – plataforma y en este trabajo únicamente se está analizando la pista. Esto podría explicar de igual forma la discrepancia entre la cifra oficial y la reportada en este trabajo.

Tomando en cuenta lo anterior se concluye una capacidad horaria para la pista del Aeropuerto Internacional de Toluca, manteniendo unos niveles de seguridad elevados, de **21 ops/hr.**

5.8 Ejercicio alternativo

Es cierto que la capacidad de un sistema de pistas involucra tanto a las características infraestructurales, como a los procedimientos y a los servicios de Control de Tránsito Aéreo (CTA). Es igualmente cierto que las características de los servicios de CTA en el Aeropuerto Internacional de Toluca son muy particulares pues responden a otras necesidades, no sólo a las separaciones mínimas por estela turbulenta, si no a cuestiones de seguridad.

Sin embargo resulta interesante hacer el cálculo de la capacidad de pistas para este aeropuerto utilizando los mínimos de separación por estela turbulenta recomendados por la OACI en su Documento 4444.

		Segundo Avión		
		L	M	H
Primer Avión	L	3	3	3
	M	5	3	3
	H	6	5	4

Nosotros suponemos que en casos de extrema saturación los controladores tendrían que basarse en estos mínimos de separación.

Asimismo consideraremos una separación mínimo entre un avión aproximándose y uno despegando de 3 MN.

A continuación se presenta la captura de la pantalla donde se ingresaron los datos para ambos registros, el del 19 y el del 20 de noviembre, con los supuestos antes mencionados.

Capacidad de Pistas

Probabilidad aceptable de violación de los mínimos de separación
 5% 10% 15% 20%

Tipo de aeronave	Velocidad Promedio de aproximación [Kts]	Promedio de tiempo utilizado en pista [s]	Mezcla [%]	
			Aterrizajes	Despegues
Light	120	48	9.52	31.58
Medium	130	51.16	90.48	63.16
Heavy	160	68	0	5.26

Longitud de la senda de aproximación [MN]: 12

Distancia mínima entre un avión aproximándose y uno despegando [MN]: 3

Desviación estándar [s]: 10

Reglas de separación aterrizaje - aterrizaje [MN]

	Segundo Avión		
	Light	Medium	Heavy
Light	3	3	3
Medium	5	3	3
Heavy	6	5	4

Matriz de Probabilidades (Aterrizajes)

	Segundo Avión		
	Light	Medium	Heavy
Light	0	0.100	0
Medium	0.100	0.800	0
Heavy	0	0	0

Reglas de separación despegue - despegue [s]

	Segundo Avión		
	Light	Medium	Heavy
Light	60	120	120
Medium	120	60	60
Heavy	300	180	60

Matriz de Probabilidades (Despegues)

	Segundo Avión		
	Light	Medium	Heavy
Light	0.167	0.167	0
Medium	0.111	0.444	0.056
Heavy	0	0.056	0

Calcular

Ca: 33.76136 Ops / hr
 Cd: 43.13443 Ops / hr
 Cm: 37.1375 Ops / hr

Figura 5.8.1.- Pantalla del cálculo para el 19 de noviembre (ejercicio alternativo).

Capacidad de Pistas

Probabilidad aceptable de violación de los mínimos de separación
 5% 10% 15% 20%

Tipo de aeronave	Velocidad Promedio de aproximación [Kts]	Promedio de tiempo utilizado en pista [s]	Mezcla [%]	
			Aterrizajes	Despegues
Light	87	86.67	20	22.73
Medium	130	57.36	73.33	77.27
Heavy	160	68	6.67	0

Longitud de la senda de aproximación [MN]:

Distancia mínima entre un avión aproximándose y uno despegando [MN]:

Desviación estándar [s]:

Ca	24.47133	Ops / hr
Cd	46.62004	Ops / hr
Cm	36.68253	Ops / hr

Reglas de separación aterrizaje - aterrizaje [MN]

	Segundo Avión		
	Light	Medium	Heavy
Light	3	3	3
Medium	5	3	3
Heavy	6	5	4

Matriz de Probabilidades (Aterrizajes)

	Segundo Avión		
	Light	Medium	Heavy
Light	0	0.143	0.071
Medium	0.214	0.500	0
Heavy	0	0.071	0

Reglas de separación despegue - despegue [s]

	Segundo Avión		
	Light	Medium	Heavy
Light	60	120	120
Medium	120	60	60
Heavy	300	180	60

Matriz de Probabilidades (Despegues)

	Segundo Avión		
	Light	Medium	Heavy
Light	0.048	0.143	0
Medium	0.143	0.667	0
Heavy	0	0	0

Figura 5.8.2.- Pantalla del cálculo para el 20 de noviembre (ejercicio alternativo).

Como se puede observar en ambos casos obtenemos capacidades muy cercanas a las cifras oficiales reportadas por la administración del aeropuerto:

- 37.14 ops/hr para el caso nocturno
- 36.68 ops/hr para el caso matutino

De lo anterior podríamos inferir que fue bajo estos supuestos que se hizo el cálculo de capacidad de pistas por parte del administrador aeroportuario, de donde se obtiene el valor de 36 ops/hr que se reporta como el oficial.

Sin embargo esta cifra puede ser engañosa pues como ya se comentó los mínimos de separación entre aeronaves en aproximación que manejan los controladores en este aeropuerto no obedecen únicamente a los criterios por estela turbulenta que maneja la OACI por lo que si se requiere aumentar la capacidad horaria a las 36 ops/hr que se reportan como cifra oficial es necesaria una coordinación más cercana entre aeropuerto y CTA, para conseguir que los mínimos de separación se acerquen lo más posible a aquellos que nos dan la mayor capacidad de pistas, es decir, los recomendados por lo OACI.

Conclusiones

CONCLUSIONES

En este trabajo se analizaron diferentes maneras de calcular la capacidad de pistas de un aeropuerto en particular, de entre las cuales se eligió la más adecuada. Con ello se diseñó una herramienta informática.

Al probar el software mencionado se encontraron ciertas carencias, como la dificultad de cálculo que conlleva la determinación de algunos parámetros necesarios para el modelo, así como la inexistencia de una manera de conservar los datos importantes una vez cerrado el programa.

Para ello se programó un software complementario el cual permite de una manera gráfica y sencilla el almacenamiento de muestras de operaciones de un aeropuerto, a partir de las cuales se obtienen los parámetros necesarios para el cálculo de la capacidad de pistas, mismos que se almacenan en un archivo de texto para futuras consultas.

Todo el programa en conjunto se probó para 2 aeropuertos, el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (MMMX), y el Aeropuerto Internacional de Toluca (MMTO). Los resultados se muestran a continuación.

Aeropuerto	Capacidad de Pistas
MMMX	38 ops/hr
MMTO	20 ops/hr

Se debe recordar que la cifra reportada en este trabajo para el AICM representa la capacidad si una de sus pistas fuera cerrada. Para el caso de Toluca es la capacidad que se obtiene con las separaciones que a su juicio consideran más seguras los controladores de tránsito aéreo de dicho aeropuerto.

Con lo anterior y al comparar datos con las cifras oficiales se comprobó que el modelo utilizado discrepa de las cifras oficiales, sin embargo, como se mencionó en el Capítulo II, *“cuando se hace un estudio de capacidad a las pistas de un aeropuerto debe indicarse bajo qué suposiciones o premisas se hizo el cálculo de la capacidad”* [Horonjeff, 1994,

p.303] puesto que del modelo utilizado y de las suposiciones consideradas dependen en gran medida los resultados del análisis.

Muy probablemente los modelos utilizados por los aeropuertos para calcular su capacidad, así como las premisas utilizadas son distintos de los utilizados en este trabajo. Por ello no se debe dar tanto peso al hecho de que las cifras sean diferentes y debemos enfocarnos más al objetivo de este trabajo que es, *“la creación de una herramienta informática, que utilice el modelo que mejor atienda las particulares condiciones operacionales, infraestructurales y tipos de aeronaves que se utilizan en aeropuertos mexicanos.”*

En este sentido se cumplió completamente con el objetivo pues al final de este trabajo se obtuvo una herramienta con las características siguientes:

- Se adapta lo mejor posible a las características operacionales del aeropuerto en cuestión, en cuanto a la mezcla de aeronaves que en ella operan se refiere, los parámetros operacionales en materia de CTA y las condiciones particulares de la infraestructura aeroportuaria,
- Es de una relativa sencillez lo que lo vuelve *transparente* a los ojos del analista, es decir, al programar el software éste no se convirtió en una *caja negra* para el usuario, lo que le permite visualizar de mejor manera los parámetros que afectan a la capacidad de la pista,
- El modelo que utiliza el programa no desprecia ningún tipo de actividad operacional (p.ej. vuelos de aeronaves ligeras)
- Se toma en cuenta las limitaciones de espacio aéreo y de procedimientos tanto de aproximación, como de despegues,
- Se puede ajustar a diferentes escenarios de operación (p.ej. baja visibilidad, cambio en procedimientos de vuelo, diferentes mezclas de aeronaves, etc.)
- Es de fácil uso y cálculos rápidos, lo que permite explorar diferentes supuestos para una misma pista.

Con todo esto se ofrece a la industria aeronáutica nacional en general, y a los administradores aeroportuarios en particular, una herramienta creada pensando en las necesidades particulares de este sector en México, permitirá a los operadores aeroportuarios tener mayores y mejores recursos para la planeación de infraestructura de sus aeropuertos.

Recomendaciones

RECOMENDACIONES

El objetivo de esta tesina fue la creación de una herramienta informática, que utilice el modelo que mejor atienda las particulares condiciones operacionales, infraestructurales y tipos de aeronaves que se utilizan en aeropuertos mexicanos.

En este sentido se cumplió con él sin embargo es cierto que también una de las justificaciones de este trabajo fue que la investigación busca ser un apoyo a futuros profesionistas que deseen incursionar en este tema.

Con base en esto se puede extraer las siguientes recomendaciones:

- El presente software se puede mejorar, pues el modelo que utiliza es únicamente válido para aeropuertos con una sola pista, como un trabajo posterior se recomienda tomar este software y ya sea con alguna herramienta de simulación o con la aplicación de algún modelo alternativo, lograr que se calcule la capacidad para aeropuertos con más de una pista.
- Se ha mencionado que la capacidad de cada aeropuerto depende mucho de una lista de parámetros ya antes mencionados, una de las recomendaciones que se hace es ampliar el presente software para que calcule la capacidad no sólo bajo un único supuesto, pues sabemos que estos parámetros cambian y se presentan con cierta frecuencia en cada aeropuerto, sino bajo diferentes condiciones operacionales, cada una con su respectiva probabilidad de presentarse, y de esta manera obtener un promedio ponderado de todas las capacidades, siendo éste la capacidad máxima reportada para el aeropuerto.
- Se recomienda así mismo integrar un procedimiento que permita determinar donde sería más adecuado la construcción de salidas de pista para mejorar la capacidad del aeropuerto.

Glosario

GLOSARIO

Administrador aeroportuario.

Persona física designada por el concesionario o permisionario de un aeródromo civil, que tendrá a su cargo la coordinación de las actividades de administración y operación que se realicen dentro del mismo.

Aeródromo.

Área definida de tierra o de agua adecuada para el despegue, aterrizaje, acuatizaje o movimiento de aeronaves, con instalaciones o servicios mínimos para garantizar la seguridad de su operación.

Aeronaves.

Cualquier vehículo capaz de transitar con autonomía en el espacio aéreo con personas, carga o correo.

Aeropuerto.

Aeródromo civil de servicio público, que 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.

Avión.

Aerodino propulsado por motor, que debe su sustentación en vuelo principalmente a reacciones aerodinámicas ejercidas sobre superficies que permanecen fijas en determinadas condiciones de vuelo.

Buffer.

Espacio de memoria que se utiliza como regulador y sistema de almacenamiento intermedio entre dispositivos de un sistema informático.

Calle de rodaje.

Vía definida en un aeródromo terrestre, establecida para el rodaje de aeronaves y destinada a proporcionar enlace entre una y otra parte del aeródromo.

Capacidad de pista.

La capacidad nos indica la habilidad de un aeropuerto para recibir aeronaves (entre aterrizajes y despegues).

Climatología.

Ciencia que estudia los climas.

Concesionario.

Persona o entidad que tiene la concesión de un servicio o la distribución de un producto determinado.

Demanda.

Representa la cantidad de productos o servicios que el público objetivo quiere y puede adquirir para satisfacer sus necesidades o deseos.

Estela turbulenta o torbellino.

Un vórtice o torbellino (vortex) es una masa de aire que gira sobre sí misma, alrededor de un eje de rotación denominado línea de vórtice.

Flota.

Conjunto de aeronaves destinadas a una actividad definida, ya sea para el transporte o para fines de comercio.

Holgura.

Espacio que existe entre dos dimensiones.

Infraestructura aeroportuaria.

Conjunto de elementos que conforman al aeropuerto, edificios, accesos viales, etc.

Interfaz.

Punto de interconexión entre dos entidades, sistemas, equipos, conceptos, etc.

Itinerario.

Documento en el que se encuentra el recorrido o ruta de la aeronave.

Meteorología.

Ciencia que estudia el estado del tiempo y los meteoros en la atmósfera terrestre.

Mezcla de aeronaves.

Es la combinación de distintos aviones que operan en el aeropuerto en grupos de acuerdo a su velocidad de aproximación.

Nudos.

La velocidad igual a 1 milla marina por hora.

Operador aéreo.

El propietario o poseedor de una aeronave de Estado.

Parámetros.

Propiedad medible cuyo valor está determinado por las características del sistema.

Permisionario.

El titular de un permiso de Transporte, Almacenamiento o Distribución.

Pistas.

Área rectangular definida en un aeródromo terrestre preparada para el aterrizaje y el despegue de las aeronaves.

Plataforma.

Área definida, en un aeródromo terrestre, destinada a dar cabida a las aeronaves para los fines de embarque o desembarque de pasajeros, correo o carga, abastecimiento de combustible, estacionamiento o mantenimiento.

Secretaría.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Senda de aproximación.

Camino o línea imaginaria que toman las aeronaves cuando están en la etapa de aproximación final para el aterrizaje.

Servicios.

Comprenden los aeroportuarios, complementarios y comerciales.

Sistema.

Conjunto de reglas, principios, ideas o cosas, que están unidas por un criterio común y tienen una finalidad determinada.

Techo de nubes.

Altura a que, sobre la tierra o el agua, se encuentra la base de la capa inferior de nubes por debajo de 6 000 m (20 000 ft) y que cubre más de la mitad del cielo.

Umbral.

Comienzo de la parte de pista utilizable para el aterrizaje.

Visibilidad.

En sentido aeronáutico se entiende por visibilidad el valor más elevado entre los siguientes:

- a) La distancia máxima a la que pueda verse y reconocerse un objeto de color negro de dimensiones convenientes, situado cerca del suelo, al ser observado ante un fondo brillante.
- b) La distancia máxima a la que puedan verse e identificarse las luces de aproximadamente mil candelas ante un fondo no iluminado.

Listado de siglas y abreviaturas

LISTADO DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

A.1 Siglas de las Aerolíneas

AAL – American Airlines

AIJ – Interjet

AMX – Aeroméxico

ASA – Alaska Airlines

AWE – America West

CBE – Click Mexicana

CHP - Aviaca

COA – Continental Airlines

DAL – Delta Airlines

FAM – Fuerza Aérea Mexicana

FEDEX – Fedex

GMT – Magnicharters

MAA – Mas Air Cargo

MXA – Mexicana

PFP – Policía Federal Preventiva

SLI – Aerolitoral

TAO – Aeromar

UAL – United Airlines

VOI – Volaris

A.2 Denominación de los tipos de Aeronaves

A318 – Airbus 318

A319 – Airbus 319

A320 – Airbus 320

AC90 –Rockwell TurboCommander 690B

ATR42 – Aerospatiale/Alenia ATR 42

B727 – Boeing 727

B737 – Boeing 737

B757 – Boeing 757

B767 – Boeing 767

BE190 - Beechcraft 1900

BE20 – Raytheon Beech 200

BE40 – Raytheon Beechjet 400

C130 – Lockheed C-130 Hercules

C172 – Cessna 172 Skyhawk

C182 – Cessna Skylane 182

C210 – Cessna 210 Centurion

C500 – Cessna Citation I

C525 – Cessna 525 CitationJet

C650 - Cessna 650 Citation VII

C680 – Cessna Model 680 Sovereign

DASH8 - De Havilland Canada Dash 8

ERJ145 - Embraer RJ145

F100 – Fokker 100

FA10 – Dassault Falcon 10

GLF3 – Gulfstream III

GLF5 – Gulfstream V

H25A – Hawker Siddeley Domine HS 125

H25B –Hawker Siddeley HS 125-700/800

HS25 – Raytheon Hawker 800

LJ25 – Learjet 25

LJ29 – Learjet 29

LJ35 – Learjet 35

LJ45 – Learjet 45

MD10 – McDonnell Douglas DC-10

MD80 - McDonnell Douglas MD80

A.3 Abreviaturas matemáticas

A = número de llegadas.

D = número de salidas.

T&G = número de operaciones de toque y despegue.

MI = índice de mezcla.

γ = Longitud de la senda de aproximación.

δ_{ij} = Separación mínima entre clases de aeronaves i y j .

V_i = Velocidad del primer avión.

V_j = Velocidad del avión siguiente.

C_a = Capacidad de atender sólo salidas.

P_{ij} = la matriz de probabilidades de que un avión i preceda a un avión j .

T_{ij} = la matriz de tiempos mínimos de separación para una aeronave i seguida de una j .

$E(t_d)$ = valor esperado del tiempo entre dos salidas consecutivas.

$[p_{ij}]$ = la matriz de probabilidades de que un avión i preceda a un avión j .

$[t_d]$ = matriz de tiempos entre salidas consecutivas.

C_d = Capacidad para atender sólo salidas.

G = es el espacio que hay entre que la primera llegada abandona la pista y la segunda de llegada se encuentra a la distancia mínima antes del umbral.

R_i = Tiempo de ocupación de pista de una llegada.

C_m = capacidad para servir operaciones mixtas.

$E(\Delta T_{ij})$ = valor esperado del tiempo entre llegadas.

n_d = número de salidas que pueden ser efectuadas entre dos llegadas.

p_{nd} = probabilidad de hacer n_d salidas entre dos llegadas.

Separaciones Radar

SEPARACIONES RADAR

En este anexo se presentan las diferentes separaciones radar durante la aproximación que manejan las distintas autoridades aeronáuticas que tienen mayor relevancia a nivel mundial, y que influyen en las separaciones que se tendrán en la práctica en los aeropuertos mexicanos.

S.1 Separaciones según la FAA

La Federal Aviation Administration (FAA) estadounidense mediante su *Air Traffic Organization Policy ORDER JO 7110.65T*, fechada el día 11 de febrero de 2010, que las siguientes separaciones por estela turbulenta deben aplicarse cuando ambas aeronaves se encuentren directamente una detrás de la otra o a menos de 1,000ft en sentido vertical, o cuando ambas se encuentren realizando una aproximación por instrumentos.

Nota: L = Light, M = Medium, H = Heavy, ND = No Disponible

Separaciones en MN		Aeronave trasera		
		L	M	H
Aeronave delantera	L	4	ND	ND
	M	5	3	4
	H	6	ND	4

S.2 Separaciones según la OACI

Los mínimos de separación por estela turbulenta recomendados por la OACI (Organización de Aviación Civil Internacional) se encuentran asentados en su *Documento 4444. Reglas del Aire y Servicios de Tráfico aéreo*, cuya última revisión se realizó el 10 de septiembre de 1999. Dicha separación se debe aplicar cuando:

- Una aeronave esté operando directamente detrás de otra a la misma altitud o a menos de 300m (1000ft), o
- Cuando ambas aeronaves estén utilizando la misma pista, o pistas paralelas separadas por menos de 760m, o
- Cuando una aeronave cruce por detrás a otra a la misma altitud o a menos de 300m (1000ft).

Separaciones en MN		Aeronave trasera		
		L	M	H
Aeronave delantera	L	3	3	3
	M	5	3	3
	H	6	5	4

S.3 Separaciones según SENEAM

El SENEAM (Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano) tiene como misión garantizar a la navegación, el transporte seguro y eficiente de personas y bienes en el espacio aéreo mexicano y su objetivo primordial es proporcionar con calidad, dentro del territorio mexicano, los servicios de:

1. Control de Tránsito Aéreo.
2. Radio ayudas a la navegación aérea.
3. Telecomunicaciones.
4. Meteorología.
5. Información aeronáutica.

Dentro de su Circular Obligatoria *CO AV-22/09. Procedimientos relacionados con la separación por turbulencia de estela*, publicada el 19 de noviembre de 2009 se establecen los mínimos de separación por estela turbulenta como sigue.

Aeronave Delantera	Aeronave Trasera	Mínimos de separación
Pesada (H)	Pesada	4 MN (7.4 km)
	Media	6 MN (11.1 km)
	Ligera	7 MN (13 km)
Media (M)	Ligera	6 MN (11.1 km)

Los valores que se muestran en la tabla corresponden a las distancias mínimas medidas sobre la trayectoria entre dos aeronaves consecutivas mostradas en la pantalla del radar, que representan las separaciones por turbulencia de estela entre aeronaves que se emplean oficialmente en el Espacio Aéreo Mexicano, y deberán mantenerse en todo momento durante una secuencia de aproximación al aeropuerto.

Bibliografía

BIBLIOGRAFÍA

AMAIT – Aeropuerto Internacional de la Ciudad de Toluca – Página Oficial,
<http://www.am-ait.com/>

Arca Juarena, Roberto. (2009) *Guía Para la Aplicación de una Metodología Común para el Cálculo de Capacidad de Aeropuerto y Sectores ATC para la Región SAM*.
Perú: Organización de Aviación Civil Internacional.

Ashford Norman, Wright Paul. (1992). *Airport Engineering*, 3a edición. USA: John Wiley & Sons. Inc.

Azpiri Charteris, Pablo. (2007). *Desarrollo de un programa preliminar de simulación para determinar la capacidad de pistas del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México*. Tesis de Ingeniería Aeronáutica. México. Instituto Politécnico Nacional.

De Neufville, Richard. (2003). *Airport systems, planning, design, and management*. USA: McGraw Hill,

Federal Aviation Administration. (1983). *Advisory circular 150-5060-5 Airport Capacity and Delay*. USA: Federal Aviation Administration.

Horonjeff, Roberto. (1994). *Planning and design of airports*, 4a edición. USA: McGraw Hill.

International Aviation Transport Association. (2004). *Airport development reference manual*, 9a edición. Montreal: International Air Transport Association.

Ley de Aeropuertos, Secretaría de comunicaciones y Transportes, Última reforma publicada DOF 21-01-2009

Organización de Aviación Civil Internacional. (2002). *Manual de planificación de Aeropuertos* Doc 9184 Parte I Planificación General, 2ª edición. Montreal: Organización de Aviación Civil Internacional.

Osio Granada, Linda Maribel. (2007). *Estudio de la capacidad del sistema pista-rodaje del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México*. Tesis de Ingeniería Aeronáutica. México. Instituto Politécnico Nacional.

Reglamento de la Ley de Aeropuertos, Secretaría de comunicaciones y Transportes, Última reforma publicada DOF 09-09-2003

World Aeronautical Database, <http://www.worldaerodata.com/>