

878517  
1  
2y

# UNIVERSIDAD DEL NUEVO MUNDO

ESCUELA DE INGENIERIA

CON ESTUDIOS INCORPORADOS A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



## APLICACION DE UN MODELO DE LINEAS DE ESPERA AL SERVICIO DE DOCUMENTACION EN EL AEROPUERTO DE LA CIUDAD DE MEXICO

### TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
AREA INDUSTRIAL  
PRESENTA

JAVIER CARDENAS CARRILLO

MEXICO, D. F.

1987

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## INDICE

### CAPITULO I. INTRODUCCION A LA INVESTIGACION DE OPERACIONES

I.1. Origen e Historia .....	1
I.2. Desarrollo Cronológico .....	2
I.3. La Definición .....	5
I.4. Finalidad .....	8
I.5. Aplicaciones .....	10

### CAPITULO II. MARCO TEORICO SOBRE LINEAS DE ESPERA

II.1. Importancia y Clasificación de los Modelos .....	13
II.2. Surgimiento de la Teoría .....	15
II.2.1. Sistemas Comunes de Colas .....	17
II.2.2. Elementos que Integra un Modelo de Espera ...	19
II.3. Estructuras Básicas .....	22
II.4. El Proceso de Poisson .....	24
II.4.1. Función de Probabilidad de Poisson .....	25
II.5. La Distribución Exponencial .....	32

### CAPITULO III. EL AEROPUERTO DE LA CAPITAL, PROBLEMATICA Y OPCIONES

III.1. Antecedentes .....	35
III.2. Ubicación, Generalidades e Infraestructura .....	37
III.3. Problemas que se Detectaron .....	42
III.4. Magnitud de los Elementos .....	43
III.5. Opciones Contempladas .....	46

CAPITULO IV. PLAN DE TRABAJO Y APORTACION DE LA INGENIERIA INDUSTRIAL

IV.1.	Idea Fundamental .....	49
IV.2.	Area a Estudiar .....	50
IV.3.	Importancia .....	52
IV.4.	Objetivos .....	53
IV.5.	Aportación de la Ingeniería Industrial .....	54

CAPITULO V. ANALISIS DE ARRIBO Y DE SERVICIO EN DOCUMENTACION

V.1.	Lineamientos .....	56
V.2.	Terminología .....	57
V.3.	Número de Aforos y de Pasajeros .....	58
V.4.	Distribución Tipo de Arribo .....	59
V.5.	Medición del Servicio .....	61

CAPITULO VI. NIVEL DE SERVICIO Y ALTERNATIVA DE DESARROLLO

VI.1.	Variables y Gráficas Comparativas .....	68
VI.1.1.	Compañías Nacionales .....	69
VI.1.2.	Compañías Extranjeras .....	71
VI.1.3.	Gráficas .....	73
VI.2.	Tasa de Servicio y Apreciación de Resultados .....	75
VI.3.	Rendimiento del Documentador .....	78
VI.4.	Tiempos de Espera y de Ocio .....	81
VI.5.	Capacidad y Demanda .....	83
VI.6.	Toma de Decisiones .....	88
VI.7.	Curso de Acción .....	91

CAPITULO VII. CONCLUSIONES GENERALES

APENDICES:

I	TASA OBSERVADA DE ARRIBOS .....	111
II	ANALISIS DE ARRIBO .....	114
III	PROBABILIDADES DE POISSON .....	117
IV	DISTRIBUCION DE $X^2$ .....	121
V	ANALISIS AL SERVICIO .....	123
VI	DEDUCCION DE FORMULAS .....	125

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	135
----------------------------------	-----

## I INTRODUCCION A LA INVESTIGACION DE OPERACIONES

### I.1. Origen e Historia.

Es difícil definir exactamente un año en el cual se considere -- que fue la iniciación de la Investigación de Operaciones, pues muchos primeros estudiosos llevaron a cabo trabajos que hoy se clasificarían como de este ramo; pero es posible afirmar que aunque sus orígenes se calculen como anteriores a la Primera Revolución Industrial, no fue sino hasta este período cuando empezaron a desarrollarse los problemas que iba a resolver la Investigación de Operaciones.

En efecto, durante la Revolución Industrial, el mundo fue partícipe de un gran crecimiento en cuanto al tamaño y complejidad de -- las organizaciones. Las pequeñas tiendas de los artesanos se convirtieron en gigantescas corporaciones. Una parte fundamental del cambio tan inmenso que se presentaba se debió al aumento en la división del trabajo, así como a la segmentación de responsabilidades -- en el aspecto administrativo.

Sin embargo, el crecimiento trajo consigo nuevos problemas. Uno de ellos fue la tendencia que siguieron las empresas a separarse en muchos pequeños departamentos autónomos, con sus propias metas y -- sistemas de evaluación. De tal forma se notaba cómo los objetivos -- de los distintos departamentos iban engranándose unos con otros a -- lo largo de toda la organización. Pero resultaba que, en ocasiones, lo que era bueno para alguna parte del sistema era perjudicial para otra y entonces se terminaba trabajando con diferentes fines.

Un problema real que se observó fue que, mientras la complejidad de la organización aumentaba, se volvía más difícil localizar recursos apropiados para la solución. Esta dificultad, junto con la necesidad de establecer un método que permitiera integrar a la organización como un "Todo", fue lo que poco a poco hizo que fueran surgiendo las bases de la Investigación de Operaciones.

Por otra parte, el hombre de negocios tenía cada vez mayor necesidad de información. Estando en la cima de una empresa cuya magnitud aumentaba velozmente, no podía mantener un control eficaz de la misma y requería de información sintética y rápida. Con respecto a esto, era necesario que el razonamiento científico tomara el lugar de la intuición y los cálculos someros. Esta nueva fase la constituyó la Investigación de Operaciones cuya primera manifestación puede encontrarse en algunos tratados que desde hace unos cuarenta y cinco años se hicieron con el objeto de estudiar a los fenómenos económicos dentro de un marco estrictamente definido y ayudándose de la herramienta matemática ó estadística.

El peligro de la guerra y el intentar dirigir inteligentemente las operaciones militares, ofrecieron a la Investigación de Operaciones las condiciones favorables para su desarrollo.

## I.2. Desarrollo Cronológico.

Como ya se ha mencionado, los orígenes de la Investigación de Operaciones se pueden rastrear muchas décadas atrás al hacer los primeros intentos por utilizar un método científico para manejar una organización. Sin embargo, el comienzo de esta actividad llama-

da Investigación de Operaciones, se puede atribuir a los servicios militares de la Segunda Guerra Mundial.

"Desde principios de 1937 se pidió a los científicos ingleses, - cada vez con más frecuencia, que ayudaran a los militares a descubrir la manera más eficaz de utilizar el radar para localizar aviones enemigos. En Septiembre de 1939, los científicos que trabajaban en diferentes aspectos del problema se reunieron en el Cuartel General del Mando de Aviones de Combate (Real Fuerza Aérea). Ese grupo, considerado como el núcleo de los primeros estudiosos de Investigación de Operaciones, ampliaba continuamente su área de actividades - hasta abarcar más allá del problema original del radar y de su integración con los observadores de tierra." (1)

Fue así como la Segunda Guerra Mundial originó la necesidad de - utilizar en forma óptima tanto los recursos humanos como los materiales, lo cual dió oportunidad a que la Investigación de Operaciones se estableciera como una disciplina independiente. Está claro - que las primeras aplicaciones fueron todas bélicas, tales como la - programación de vuelos para bombardear y obtener la máxima destrucción, la determinación de rutas de navegación para reducir el riesgo de ser torpedeado, ó la producción de barcos y aviones que minimizaran el tiempo requerido. En los años que siguieron y ya sin la presión del tiempo, se tuvo la oportunidad de analizar problemas y soluciones y de ahí surgió la Investigación de Operaciones.

Los resultados que lograron los equipos ingleses, motivaron a -- los científicos de Estados Unidos a iniciar actividades semejantes. "La primera técnica ampliamente aceptada en el ramo conocida como - el Método Simplex de Programación Lineal, fue desarrollada en 1947- por el matemático norteamericano George B. Dantzig." (2) Desde entonces, las nuevas técnicas se han desarrollado gracias a los es---

fuerzas y entusiasmo de aquellos individuos interesados tanto en --- las instituciones académicas como en la industria.

A principios de la década de 1950, la industria empezó a atraer - analistas de Investigación de Operaciones que abandonaron el ejército. Fue así que la Investigación empezó a diversificarse. El progreso logrado en el campo se debió, en su mayoría, al desarrollo paralelo de la computadora digital moderna con sus grandes aplicaciones- y capacidades de almacenamiento y recuperación de datos.

FECHA	ETAPA	CARACTERISTICAS
1939	Se utiliza por primera vez el nombre de Investigación de Operaciones.	Se le reconoce como disciplina científica.
1940	Se gestan los problemas que habría de resolver la Investigación de Operaciones.	Las empresas crecen ---- enormemente.
1945	Fin de la Segunda Guerra Mundial.	Surgen disciplinas y especialidades que hacen - posible nuevas formas de administración.
1947	Se fomenta el desarrollo de la Investigación de Operaciones.	Los países más interesados son Inglaterra y Estados Unidos.
1950	Aparecen en el mercado las computadoras electrónicas.	La computación contribuye a que la Investigación de Operaciones se extienda a los ámbitos académico y gubernamental.

TABLA I Desarrollo de la Investigación de Operaciones (3)

### I 3. La Definición .

Una vez presentados los antecedentes de la Investigación de Operaciones, la manera de darse una idea sobre la naturaleza de la misma, es analizando su definición. Sin embargo, existen numerosos análisis que han intentado describir, en forma precisa, el objeto y los campos de acción de los que se ocupa esta disciplina.

En sí, el tratar de definirla no es tarea fácil, y esto se debe básicamente a la gran cantidad de operaciones y de organizaciones en las que interviene. Citando un ejemplo, puede definirse como: "Un procedimiento científico para tomar decisiones que comprenden las operaciones de sistemas de organización". (4)

En este enfoque, la Investigación de Operaciones se aplica a problemas relacionados con la forma de coordinar las actividades en una organización, pero la clase de organización no se menciona, y puede sobrentenderse, como de hecho sucede, que se utilice en los negocios, la industria, la milicia, los departamentos gubernamentales y otras dependencias civiles. Por lo tanto, esta definición tal vez no sea lo suficientemente explícita.

Otro enfoque que se le ha dado, y que puede brindar una base útil para adquirir un conocimiento mayormente formal, es el siguiente: -- "La Investigación de Operaciones es la aplicación del Método Científico, por equipos interdisciplinarios, a problemas que comprenden el control de los sistemas organizados hombre-máquina, para dar soluciones que sirvan mejor a los propósitos de la organización como un todo". (5)

Tomando en cuenta los aspectos a que se refiere esta definición, se debe mencionar que, en efecto, la Investigación de Operaciones -

sigue el Método Científico. Pero al igual que en otras disciplinas, ésto se lleva a cabo con ciertas limitaciones, ya que los problemas de que trata son imposibles de ser controlados en el medio ambiente en el que se presentan; por lo cual, la manera en que se experimenta es mediante la realización de modelos matemáticos que sí pueden ser manipulados ó analizados.

Es importante también hacer notar que se utiliza el concepto de grupos interdisciplinarios y ésto se debe a que en los primeros --- años del desarrollo de la Investigación de Operaciones, dada la escasez que existía de científicos, se reunió a un grupo de especialistas de diferentes ramas y se observó que se originaban resultados muy valiosos pues existían un mayor número de caminos y posibilidades de resolver un problema; por lo que, desde entonces, quedó determinada como esencial la participación de estudiosos de diferentes ramas.

El enfoque que dan Morse y Kimball expresa: "La Investigación de Operaciones es un método científico para dar a los departamentos -- ejecutivos una base cuantitativa para las decisiones relacionadas -- con las operaciones que están bajo su control." (6)

Al examinar las definiciones anteriores surgen ideas que son comunes, tal como la aplicación del Método Científico, el análisis de relaciones y la necesidad de un criterio normalizador de decisiones. Todos estos factores son básicamente características de la definición. Como es posible percatarse, el tratar de definir cualquier rama del saber humano es casi imposible, ya que el intentar dar un enfoque que pudiera considerarse completo sería tan extenso que se -- perderían las ventajas de toda definición: Claridad y exactitud. -- Por lo tanto, la mejor manera de entender la esencia de un conocimiento es no aventurar definiciones, sino realizar un análisis.

En conclusión, la Investigación de Operaciones es una metodología que incluye:

- 1) La utilización del Método Científico.
- 2) Aportación de diversas disciplinas.
- 3) Resolución de problemas, en sistemas organizados, obteniéndose soluciones óptimas para los propósitos de la organización como una sola unidad.

Y cuyas características son:

- 1) Enfocada a sistemas hombre-máquina.
- 2) Aporta un punto de vista organizacional.
- 3) Requiere de especialistas de distinta formación.
- 4) Desarrolla soluciones para abarcar al sistema en su totalidad.

Según todo lo anterior, mi punto de vista se resume al de una disciplina interesada en decisiones óptimas, sobre sistemas de la vida real, y con aplicaciones regidas en gran parte por la necesidad de a signar recursos limitados. Esto se lleva a cabo a partir de un anál sis científico que comprende la abstracción de los elementos fund mentales, la búsqueda de soluciones y el desarrollo de los procedi mientos para obtenerlas.

La metodología y características mencionadas se pueden ilustrar en la siguiente figura:

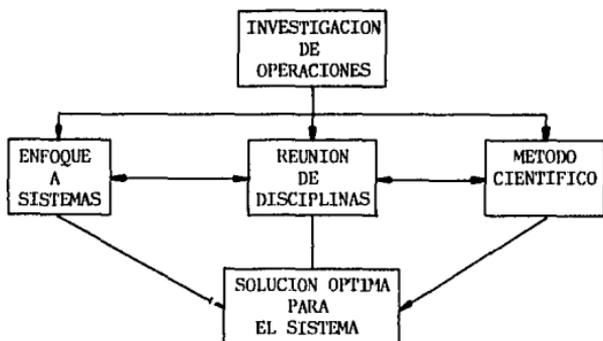


Figura I.1 Método y características de la Investigación de Operaciones.

#### I.4. Finalidad.

Se sabe que la Investigación de Operaciones no ha llegado aún a una madurez plena y que resulta difícil definir su verdadero carácter de ciencia ó metodología; sin embargo, sus características y propósitos son bastante claros y están bien definidos, por lo que es de primordial importancia su consideración al resolver una problemática empresarial.

La experiencia indica que muchos de los procedimientos de la Investigación de Operaciones se aplican con eficacia a la solución de problemas de muy diversa índole, pero se debe tomar en cuenta que en realidad, lo que sucede es que la mayoría de las veces todos los problemas se presentan en condiciones análogas y en todos los casos

se enfrenta uno por una parte a objetivos que alcanzar en condiciones óptimas, y por otra, a ciertas limitantes o restricciones.

No existen entonces problemas que sean económicos o militares, si no problemas que, en situaciones similares, deben ser tratados en ba se a una política específica y teniendo como finalidad lo siguiente:

- Proveer de información oportuna a quienes realizan la función ejecutiva, por medio de una búsqueda sistemática que enlace los parámetros significativos, dando la adecuada proporción de la empresa como un todo.
- Elaborar diferentes planes de acción, por parte de un grupo interdisciplinario, después de haber considerado y evaluado la mayor variedad posible de los aspectos del problema.
- Derivar soluciones óptimas, fundamentadas o estructuradas en el análisis matemático o en relaciones que indiquen el hecho de que algunas variables, o todas ellas, pueden modificarse dentro de ciertos límites.
- Probar que existe una correspondencia del modelo con el sistema real, sin olvidar que el primero nunca será una representación perfecta del sistema y por tanto, la solución óptima derivada nunca podrá ser "La mejor" para el sistema real.
- Poner en ejecución los resultados. Si éstos constituyen soluciones que formen reglas para emitir decisiones respectivas, o decisiones que se piensan aplicar durante cierto tiempo, dichos resultados deberán dirigirse y controlarse.

## I.5. Aplicaciones .

La Investigación de Operaciones va teniendo un impacto cada vez - más grande en cuanto a la organización y administración de las empre- sas. El número y la variedad de estudios que comprende esta discipli- na crece rápidamente y no se observa que el ritmo vaya en disminu- ción. Su utilización comprende una gama muy extensa de instituciones de servicios e industrias, y se ha visto que entre éstas se cuentan- la aeronáutica y de proyectiles, la automovilística, la alimentaria, la del transporte, los hospitales, las financieras y los organismos- gubernamentales entre otros.

Los procesos más importantes que son motivo de estudio abarcan a- aquellos relacionados con la determinación de la combinación óptima - de actividades y recursos disponibles. El tipo más sencillo compren- de la asignación de varias tareas al mismo número de recursos (Hom- bres). Este problema se complica si algunas de las tareas requieren- más de un recurso y si los recursos se pueden emplear en más de una- tarea. El modelo se aplica con éxito a la asignación de personal, la combinación de materiales y los problemas de transporte.

Otra clase de proceso es el que se ocupa de la llegada de unida- des, cuando éstas requieren de un determinado servicio o atención, - y la capacidad de brindar ése servicio es limitada.

La TEORIA DE LINEAS DE ESPERA se localiza en el ramo anterior, y- su enfoque va dirigido a problemas concernientes a los congestiona- mientos, el mantenimiento de la maquinaria, la operación de diversos organismos y muchas otras áreas, tal como se explicará en el siguien- te capítulo del estudio.

La Investigación de Operaciones también se ocupa de los Inventaa-

rios. Dos decisiones son relevantes: 1) Qué cantidad se debe ordenar por vez, y 2) Cuándo se debe pedir dicha cantidad para aminorar el-- costo total. Es evidente que esta teoría constituye una herramienta-- fundamental para el desarrollo de cualquier organización administra-- tiva.

El aspecto referente a los modelos de Competencia ofrece una es-- tructura dentro de la cual se pueden formular casi todos los proble-- mas que involucran el trabajo de estrategia. Los negocios lo utili-- zan para publicidad, políticas de precios e introducción de nuevos - productos.

Todas estas técnicas, aunque no son las únicas (pues de hecho --- existen bastantes más), son las más comunes y permiten a los tomadores de decisiones ser más objetivos al escoger un determinado curso-- de acción, de entre todas las alternativas propuestas.

"En 1972, Turban presentó una encuesta relativa a actividades de - Investigación de Operaciones (7), la cual proporcionó información in mediata de los trabajos en 1969. Las compañías seleccionadas compren-- dían a las 300 corporaciones consideradas como las más importantes, - encontrándose también las 25 mayores en categorías de servicios, ban cos, comercio, seguros y transporte. Casi la mitad de estas compa-- ñías respondió que tenía un departamento especial dedicado a activi-- dades de Investigación de Operaciones."

"En virtud del gran impacto de la Investigación de Operaciones, - se han fundado sociedades profesionales dedicadas a este campo y a - actividades relacionadas en un cierto número de países en todo el -- mundo. En los Estados Unidos, la Operations Research Society of ---- America (ORSA), establecida en 1952." (4)

Muchas personas han colocado al desarrollo de la Investigación de

Operaciones, entre los avances más destacados de la segunda mitad -- del siglo XX. En la actualidad ha ahorrado muchos millones de dóla-- res a compañías y negocios en los países industrializados. Se han es-- crito muchos artículos descriptivos de aplicaciones, y, de hecho, u-- na porción muy importante de todo el cálculo científico que se lleva a cabo en computadoras está dedicado al uso de técnicas que abarca -- la Investigación de Operaciones.

## II MARCO TEORICO SOBRE LINEAS DE ESPERA

### II.1. Importancia y Clasificación de los Modelos .

Cualquier estudio referente a Investigación de Operaciones involucra el uso de modelos. Un modelo es la representación simplificada - de un sistema real, que tiene por objetivo el analizar el comportamiento del sistema, a fin de mejorar el funcionamiento del mismo. Para que sea completo, el modelo debe de ser representativo de la situación real que se investiga.

Ahora es fácil comprender que los modelos se utilizan básicamente para predecir y comparar. Así, al valerse la Investigación de Operaciones del uso de ellos en el estudio de los sistemas, es simple predecir las reacciones de acuerdo a distintos cursos de acción y por consiguiente, hacer comparaciones que conduzcan a la determinación - de la mejor alternativa.

Dado lo anterior, se considera que uno de los elementos primordiales en la resolución de un problema, es la construcción de un modelo.

Existe una clasificación bastante amplia de los modelos, pero para los objetivos que se persiguen, bastará con mencionar solo a algunos de ellos:

1) Los MODELOS ANALOGICOS, son aquellos capaces de representar situaciones dinámicas, transformando unas propiedades en otras y fomentando la posibilidad de hacer cambios. Ejemplos de estos modelos son las distribuciones de frecuencias y los diagramas de flujo.

2) Los MODELOS SIMBOLICOS O MATEMATICOS, tal vez sean los más importantes de considerar, ya que gran parte de los estudiosos de Investigación de Operaciones relacionan este nombre con los modelos Matemáticos, y la razón es que tales modelos brindan la opción de encontrar la solución más factible a través de herramientas muy convenientes. Un tipo usado comúnmente es la ecuación, la cual es concisa y fácil de entender, su notación es más sencilla y se escribe más rápidamente que la palabra.

Entre otra de las varias categorías de los modelos Matemáticos se encuentran los PROBABILISTICOS O ESTOCASTICOS y los DETERMINISTICOS, siendo los primeros los que tienen sus fundamentos en la Probabilidad y Estadística y se ocupan de incertidumbres futuras, mientras que los segundos no hacen uso en forma alguna de la Probabilidad y su atención se enfoca a las situaciones en las que los factores críticos o determinantes son cantidades exactas. Ejemplo de un modelo Probabilístico es la TEORIA DE LINEAS DE ESPERA, y de un modelo Determinístico es la Ruta Crítica (Determinación de la secuencia óptima de actividades para una serie de eventos o tareas).

3) Los MODELOS ESTATICOS Y DINAMICOS se ocupan de dar respuesta a una serie de condiciones que pueden o no tener cambio significativo a corto plazo. La capacidad de producción y los requerimientos de tiempo de algún producto pueden variar, constituyendo un modelo Dinámico, mientras que la disponibilidad de las horas por turno a corto plazo, es una condición que debe integrarse a un modelo Estático.

4) Los MODELOS DE SIMULACION están formados por una gama de cálculos secuenciales muy numerosos, en donde se reproduce el funcionamiento de los sistemas de gran escala. En muchas ocasiones en la actualidad, ocurren relaciones sumamente complejas que pueden ser predecibles o son aleatorias, y es más fácil resolver una situación si-

mulando en una computadora, que empleando un modelo Matemático que - represente a todo el proceso que se estudia.

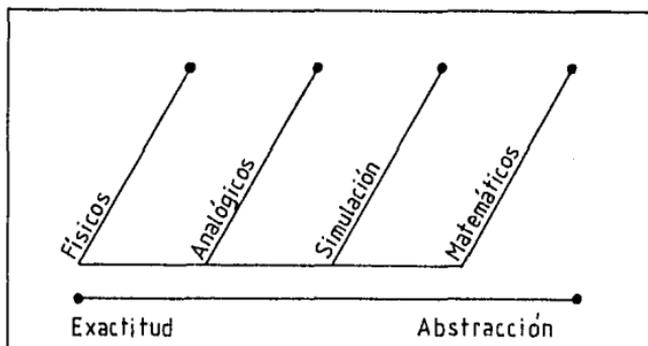


Figura II.1. Clasificación de los modelos.

## II.2. Surgimiento de la Teoría .

Es conveniente en principio, hacer referencia al surgimiento de - la Teoría de Colas, ya que de este modo se tendrá un panorama que -- permita entender con facilidad las aplicaciones posteriores.

Las primeras investigaciones en cuanto al tema, fueron desarrolla das en 1909 por el ingeniero Danés A. K. Erlang, sobre un problema - relacionado con el congestionamiento que se producía en la realiza-- ción de llamadas telefónicas.

Durante el tiempo de ocupación de línea, las personas que deseaban hacer llamadas sufrían demoras debido a que las operadoras eran incapaces de atender a las llamadas con la rapidez con que se efectuaban. El problema original de Erlang fue el cálculo de esa demora. El asumió que si existe una fuente limitada de  $N$  posibles usuarios, de los cuales un cierto número  $n$  se encuentra ocupando las líneas telefónicas, la probabilidad de que se sucite una nueva llamada en el intervalo comprendido del tiempo  $t$  al tiempo  $(t+dt)$ , es:  $(N-n) \lambda dt$ , en donde  $\lambda$  es el número de llamadas por unidad de tiempo.

Erlang también ensayó una serie de funciones de gran utilidad para la determinación de la frecuencia con la cual las llamadas ocurrían, así como el tiempo durante el cual eran atendidas. Hoy en día una de éstas tan importantes funciones lleva su nombre.

Su obra fué publicada en 1917, con el título de: "Solutions of -- Some Problems in the Theory of Probabilities of Significance in Automatic Telephone Exchanges" (1), y fue traducida al Alemán y al --- Francés.

Los trabajos de Erlang motivaron a científicos de diversos países a continuar con las investigaciones, uno de los cuales fue Thornton D. Fry. Más recientemente, F. Pollaczek desarrolló una teoría diseñada para un tipo especial de distribución de arribo de llamadas, con un tiempo de servicio arbitrario.

Aunque la labor de Erlang no se difundió sino hasta finales de la Segunda Guerra Mundial, su estudio fue un precursor esencial de la telefonía y hoy se sabe que existe una gran variedad de situaciones problemáticas que pueden ser descritas por el Modelo de Líneas de Espera.

### II.2.1. Sistemas Comunes de Colas.

En nuestra época, el ser partícipe de un sistema de colas es muy común y frecuentemente tratamos de pasarlo por alto debido a que es algo casi imposible de evitar. Desde temprana edad hemos aprendido a sentir disgusto por las colas, ya que representan una pérdida de libertad y un desperdicio de tiempo.

Un sistema de colas se presenta siempre que una población requiere de un trabajo ó servicio y la capacidad que se tiene para brindar lo es limitada.

Una clase muy usual de colas son las que encontramos en los servicios comerciales, en los que clientes del exterior del sistema reciben servicio de organismos comerciales. Muchos de ellos comprenden la atención de persona a persona en alguna ubicación fija como es el caso de la cola en una cafetería ó el servicio de cajas en un banco, mientras que otros ofrecen llevar el servicio hasta la ubicación del cliente, como en el caso de los automóviles de auxilio vial y el de los reparadores domésticos.

En otra categoría no menos importante se localizan los sistemas de transportación, en la cual los vehículos son considerados como -- clientes, pudiéndose citar como ejemplo a los automóviles ante una señal de tráfico, a las aeronaves en espera de instrucciones ó a los barcos que deben ser cargados ó descargados y en donde los servidores serían respectivamente la señal de tráfico, los controladores -- del tránsito aéreo y el grupo de operadores que se ocupa de la carga ó descarga del barco. Un ejemplo desacostumbrado de este tipo es un estacionamiento en donde los automóviles son los clientes y los lugares de estacionamiento son los servidores.

Una de las aplicaciones que mayor alcance ha tenido es sin duda - la de los sistemas de servicio interno, tanto comerciales como industriales, en los cuales el conjunto de clientes proviene del interior del sistema, como sucede en el mantenimiento, en el cual una máquina descompuesta es el cliente y el reparador el servidor, o bien, en -- donde la máquina es el servidor y los clientes son los trabajos que ésta debe realizar.

Ultimamente se ha venido reconociendo cada vez más, que la Teoría de Colas no solo se aplica a los sistemas anteriores, sino también a los de servicio social, como pueden ser los sistemas de salud pública, en donde los doctores, las ambulancias y las camas de un hospital son los servidores de sus propios sistemas de colas.

Las áreas anteriores no agotan en forma alguna las posibles aplicaciones de la Teoría de Líneas de Espera, pues pueden extenderse para incluir las operaciones de oficina, la producción, las propias tareas personales, o muchos otros aspectos, siendo indiscutible que -- las pérdidas provocadas por la espera tienen consecuencias muy graves, ya que debido a una cola, la gente puede optar por irse a otra parte, adquirir menos de lo que era su intención, o no regresar en el futuro, por lo que se puede afirmar que las colas tienen un efecto directo en la productividad.

El proceso de servicio a los clientes puede utilizar uno o varios medios, es decir que no es necesario que el servidor sea solamente una persona, sino que puede ser un grupo de ellas, como sucede con -- las brigadas de mantenimiento. Además, no necesariamente los servidores son personas, pues en muchos casos puede tratarse de una máquina. De la misma manera, no siempre los clientes son individuos, ya que es posible que éstos sean objetos en espera de cierta operación.

Cuando una instalación solamente puede atender a un cliente a la-

vez, se le denomina Punto de servicio. Si el servicio se realiza ---  
atendiendo a cada persona por secuencias, dichas secuencias reciben-  
el nombre de Línea. Cuando uno o varios Puntos dan servicio a varios  
clientes simultáneamente, se les llama Canales, pudiendo ofrecer el-  
mismo tipo de servicio o estar especializados.

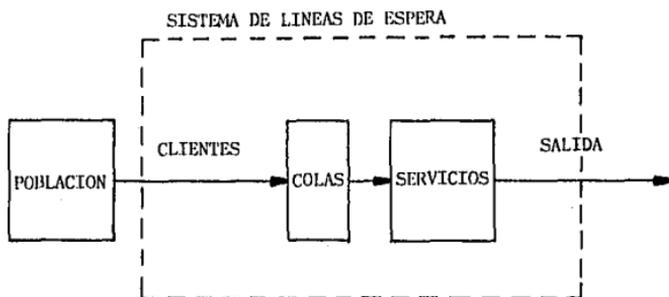


Figura II.2. Mecanismo elemental de un sistema de colas .

#### II.2.2. Elementos que Integra un Modelo de Espera .

Cualquier modelo de Líneas de Espera se encuentra conformado de -  
los siguientes elementos:

A) NUMERO DE CLIENTES EN LA COLA.

Es el número de unidades que van constituyendo a la línea de espe-  
ra. Puede suponerse que este número es infinito, con el objeto de fa

cilitar los cálculos, aunque en realidad solo existan cantidades finitas.

B) FUENTE DE ORIGEN.

Es aquella población generadora de clientes, pudiendo al igual -- que en el caso anterior, ser finita o infinita, siendo el caso finito analíticamente más complejo, en virtud de que el número de unidades en la cola repercute en el número de clientes que están fuera -- del sistema, y que pueden llegar a formar parte de él.

C) DISCIPLINA DE LA COLA.

Es una regla que se utiliza para seleccionar a los miembros de la cola para que reciban servicio. La forma más usual es la denominada: "Primero en llegar, primero en ser atendido", en donde los clientes reciben servicio exactamente en el orden de sus llegadas. Otras disciplinas son las denominadas como: "Ultimo en llegar, primero en ser atendido", "Al azar", y "De prioridades", siendo esta última la que ocurre cuando se concede primacía para el servicio, antes que a otros clientes que ya estaban en el sistema.

D) DISTRIBUCION DE LLEGADA DE LOS CLIENTES.

A menos que las llegadas de los clientes hayan sido programadas, es conveniente por razones matemáticas, suponer que son aleatorias, lo cual quiere decir que son equiprobables, en cuanto a su ocurrencia, en cualquier momento.

En el caso de las llegadas de clientes hasta una estación de servicio, la función de probabilidad que desde el punto de vista matemático se ajusta mejor al fenómeno, es la distribución de Poisson.

"La suposición de llegadas tipo Poisson, o la equivalente de que una llegada tiene una ocurrencia equiprobable en cualquier momento,-

se justifican con mayor frecuencia de lo que pudiera parecer a prime ra vista. Por ejemplo, los barcos que transportan mineral de Hierro, se programan para llegar a sus destinos en fechas determinadas, pero se ha observado que las fluctuaciones de tiempo y de las mareas ocasionan que los programas se alteren de tal manera que las llegadas reales tienen una distribución de Poisson. La misma distribución se ha observado en el arribo de los vuelos de un aeropuerto. En un aero puerto con mucho tráfico las llegadas pueden programarse en intervalos de unos cuantos minutos, pero debido a que los aviones a menudo llegan antes o después de la hora programada, con adelantos o atrasos no mayores que los intervalos programados entre llegadas, el modelo real es suficientemente similar al de la distribución de Poi---sson.

"En muchas otras situaciones resulta razonable suponer llegadas ti po Poisson, y aún cuando los datos puedan satisfacer otras suposiciones igualmente bien, con frecuencia no tienen una variación lo suficientemente grande con respecto a esta suposición como para ser desechadas". (5)

#### E) DISTRIBUCION DE SERVICIO A LOS CLIENTES.

La distribución del servicio se define en base al conjunto de pun tos del tiempo, comprendidos en el intervalo que marca el principio del servicio y su terminación. Al igual que con las llegadas, este intervalo puede referirse a una constante o una variable aleatoria.

El enfoque probabilístico ha brindado valiosos resultados, cuando el tiempo de servicio se encuentra definido por una constante, por u na distribución Exponencial, o por una distribución de Erlang. \*

Mientras que una distribución de tipo geométrico representa el nú

\* También conocida como distribución Gamma.

mero de veces que un experimento debe realizarse, antes de que ocurra un evento dado, la distribución Exponencial representa el tiempo que hay que esperar a que dicho evento (En este caso, la terminación de un servicio) se verifique.

La Tasa media de servicio ( $\mu$ ), es el número de clientes a los que se dá servicio por unidad de tiempo, mientras que el promedio de tiempo de servicio ( $1/\mu$ ) es el de las unidades de tiempo por cliente.

#### F) ESTADO DEL SISTEMA.

El estado del sistema se encuentra básicamente relacionado con el número de clientes del mismo. Cuando un sistema de colas acaba de empezar a funcionar, el estado se verá afectado en gran parte por el estado inicial y el tiempo transcurrido desde entonces. Se dice por lo tanto, que el sistema se encuentra en una condición transitoria. Sin embargo, después de que ha transcurrido bastante tiempo, el estado del sistema se vuelve esencialmente independiente del estado inicial y del tiempo transcurrido. Ahora el sistema ha alcanzado esencialmente una condición de Estado Estable.

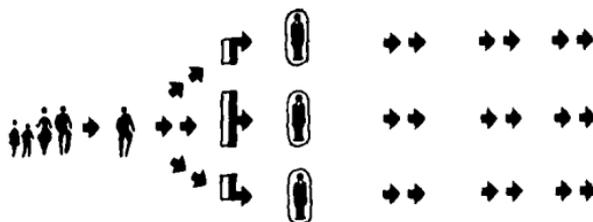
Los parámetros del sistema pueden no permitir la existencia de un Estado Estable, por lo que es necesario verificarlos.

### II.3. Estructuras Básicas .

La figura II.3., en la siguiente hoja, describe las cuatro estructuras básicas de colas. Cuando un solo servidor hace todo el trabajo para atender a un cliente, y solamente existe un punto de servicio,-



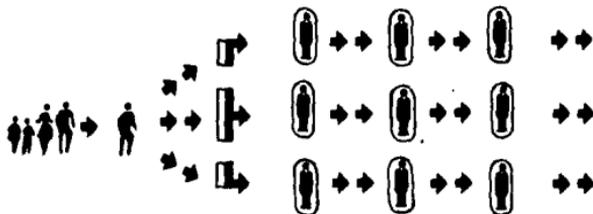
(a) Canal Simple, fase simple .



(b) Canales varios, fase simple .



(c) Canal simple, fases varias .



(d) Canales varios, fases varias .

Figura II.3. Las cuatro estructuras básicas de colas .

se trata de un caso de canal simple, fase simple.

Si se aumenta el número de servidores con distintos puntos de -- servicio, se tiene entonces una estructura de canales varios, fase-simple.

La figura II.3., asume una disciplina de servicio de prioridades por orden de llegada, pero pueden emplearse también otras disciplinas. Asimismo, existen otras posibles estructuras, como las de los sistemas mixtos, en donde una fase simple podría estar seguida por un canal simple y una nueva fase, por ejemplo.

La mayoría de los modelos de colas establecen la hipótesis de -- que tanto las llegadas como las salidas de los clientes ocurren en un proceso denominado Nacimiento y Muerte, en donde el término nacimiento se refiere a la llegada de un nuevo cliente al sistema de colas y la muerte se refiere a la salida de un cliente servido.

Se pueden imaginar algunos modelos de colas más complicados, como por ejemplo, cuando la longitud de la línea de espera tiene un efecto sobre la tasa de llegadas ó de servicio, teniéndose entonces un fenómeno al que se conoce como "retroalimentación", es decir, un fenómeno en el cual el efecto reacciona sobre la causa, pero el presente estudio no considerará ese tipo de situaciones.

#### II.4. El Proceso de Poisson.

Antes de describir al Proceso de Poisson, es conveniente definir una variable aleatoria.

Una variable aleatoria es una forma de representar los resultados de un experimento, cuando a estos resultados se les puede asignar un número real. Por ejemplo, en el experimento de tirar un dado, la variable aleatoria está constituida por el conjunto  $\{1,2,3,4,5,6\}$ . Considerándolo así, la variable aleatoria es una función real que de termina un cierto espacio de la línea real.

Ahora bien, una distribución de Poisson se encuentra definida en base a una variable aleatoria y a lo que se conoce como un evento -- discreto en un intervalo de tiempo continuo. Para entender este tipo de eventos, se puede observar la llegada de aeronaves a un aeropuerto entre las 10 y las 11 A. M. de un día determinado. Dicha llegada es un punto en el período continuo de 1 hora. Existen muchos ejemplos que se pueden considerar como procesos de Poisson, siempre y cuando se satisfaga la siguiente definición:

DEFINICION: Los eventos discretos se generan en un proceso de Poisson con parámetro  $\lambda$  en la siguiente forma: (A) Se puede tomar un intervalo suficientemente corto de longitud  $h$ , tal que, i) la probabilidad de exactamente  $i$  ocurrencia es  $\lambda h$  y ii) la probabilidad de 2 o más ocurrencias es aproximadamente 0. (B) La ocurrencia de un evento en un intervalo de longitud  $h$  no tiene efecto en la ocurrencia de otro intervalo no traslapado de longitud  $h$ . (Las ocurrencias son estadísticamente independientes entre sí). (8)

#### II.4.1. Función de Probabilidad de Poisson .

Para encontrar la función descriptiva de un proceso de Poisson, supóngase que se efectúan  $n$  experimentos independientes, tales que -

el resultado de cada uno es E (Exito), ó F (Fracaso), que la probabilidad de E es p y la de F es q, siendo  $p + q = 1$ . En tal caso se dice que se tienen n pruebas de Bernoulli, con probabilidad p de éxito.

Si se determina la probabilidad de obtener x éxitos consecutivos, seguidos de (n-x) fracasos también consecutivos, esta probabilidad será:

$$\overbrace{ppp \dots p}^x \underbrace{qqq \dots q}_{(n-x)} = p^x q^{n-x}$$

Para obtener el número de combinaciones posibles de n elementos, de los cuales x son iguales a p, y el resto iguales a q, se utiliza por definición:

$$\binom{n}{x} = \frac{n!}{x! (n-x)!} = \frac{n (n-1) (n-2) \dots (n-x+1)}{x!} \dots (I)$$

Por otra parte, la probabilidad de que se verifique alguno de los eventos de un conjunto de eventos mutuamente excluyentes \*, es igual a la suma de todas aquellas probabilidades de verificar cada uno de los eventos del conjunto. Consecuentemente, es necesario su-

\* Si los conjuntos correspondientes a dos sucesos A y B son disjuntos, es decir que  $A \cap B = \emptyset$ , frecuentemente se dice que los sucesos son mutuamente excluyentes. Esto significa que no pueden ocurrir ambos.

mar  $p^x q^{n-x}$  un número de veces igual al total de formas en que podría presentarse el resultado deseado. De esta manera, la probabilidad de obtener  $x$  éxitos se conseguirá multiplicando  $p^x q^{n-x}$  por la cantidad dada en (I), ésto es:

$$p_X(x) = \binom{n}{x} p^x q^{n-x}, \quad x = 0, 1, 2, 3, \dots, n.$$

Considérese ahora un proceso de Poisson con parámetro  $\lambda$  durante  $t$  unidades de tiempo y en donde  $X$  es el número de eventos que ocurren. Con el fin de obtener la función de probabilidad para  $X$ , se supone que el intervalo se divide en  $n = t/h$  intervalos que no se traslapan, cada uno de longitud  $h$  ( $h$  es muy pequeña), entonces, a partir de la definición dada anteriormente, es razonable suponer que ocurra 0 ó 1 evento en cada uno de esos pequeños intervalos y que la probabilidad de que ocurra exactamente 1 evento es  $\lambda h$  para cada uno. De esta manera se ha dividido el intervalo de tiempo de longitud  $t$ , en  $n$  pruebas repetidas de Bernoulli. Entonces, si  $p = \lambda h$ , y  $p + q = 1$ , :

$$q = 1 - p,$$

$$q = 1 - \lambda h, \quad \text{de modo que:}$$

$$p_X(x) = \binom{n}{x} (\lambda h)^x (1 - \lambda h)^{n-x}, \quad \text{y ya que } h = t/n,$$

$$\begin{aligned}
 p_X(x) &= \binom{n}{x} (\lambda t/n)^x (1 - \lambda t/n)^{n-x} = \\
 &= \frac{n(n-1)(n-2) \dots (n-x+1)}{x! n^x} (\lambda t)^x (1 - \lambda t/n)^{n-x} \\
 &= \frac{(1 - 1/n)(1 - 2/n) \dots [1 - (x-1)/n]}{x!} (\lambda t)^x (1 - \lambda t/n)^{n-x}
 \end{aligned}$$

Tomando el límite cuando  $n \rightarrow \infty$ , para que los intervalos sean cada vez más pequeños:

$$(1 - 1/n)(1 - 2/n) \dots [1 - (x-1)/n] \rightarrow 1$$

en tanto que :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(\lambda t)^x}{x!} = \frac{(\lambda t)^x}{x!}, \quad \text{y también :}$$

$$(1 - \lambda t/n)^{n-x} = (1 - \lambda t/n)^n (1 - \lambda t/n)^{-x}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (1 - \lambda t/n)^n (1 - \lambda t/n)^{-x} = (e^{-\lambda t}) (1) ,$$

empleando el resultado conocido del Cálculo :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (1 - u/n)^n = e^{-u} , \text{ y considerando que :}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \text{constante} / \infty = 0 ,$$

Por lo que la función de probabilidad para X es :

$$p_X(x) = \frac{(\lambda t)^x}{x!} e^{-\lambda t} , \quad x = 0, 1, 2, \dots$$

Hay que notar que el parámetro del proceso de Poisson ( $\lambda$ ) se multiplica por el tiempo durante el que se observa el proceso ( $t$ ), para dar el parámetro de  $X$ . Si se espera que en un promedio ocurran  $\lambda$  eventos en un intervalo de longitud unitaria, entonces se espera ría que también en promedio ocurrieran  $\lambda t$  eventos en un intervalo de longitud  $t$ .

"Algunas de las propiedades importantes de la distribución de Poisson se presentan a continuación: (8)

$$\text{Media : } \mu = \lambda$$

$$\text{Varianza : } \sigma^2 = \lambda$$

$$\text{Desv. Típica : } \sigma = \sqrt{\lambda}$$

$$\text{Sesgo : } a_3 = 1/\sqrt{\lambda}$$

$$\text{Curtosis : } a_4 = 3 + (1/\lambda)''$$

Es posible comprobar que  $p_X(x)$  es una función de probabilidad, dado que  $p_X(x) \geq 0$  para todos los valores de  $x$ , y por otra parte :

$$\sum_{x=0}^{\infty} p_X(x) = 1$$

Al final del estudio, en las tablas del Apéndice III, se encuentran los valores de las probabilidades para una distribución acumi-

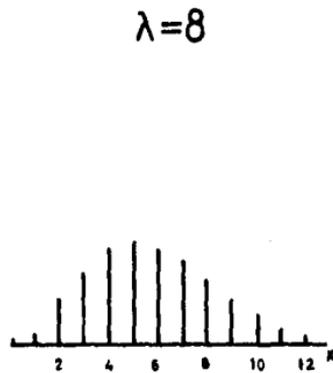
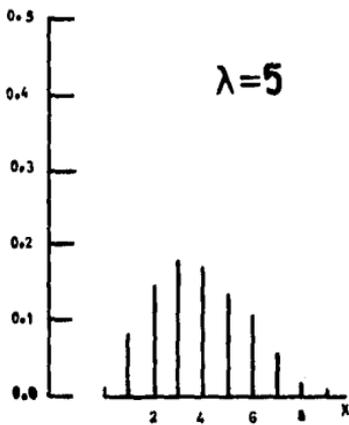
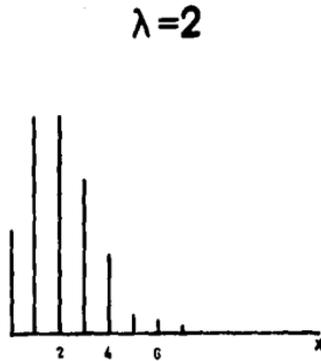
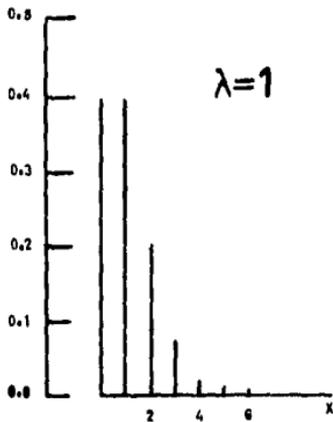


Figura II.4. Distribución de Poisson para valores escogidos de  $\lambda$ . (9)

lada de Poisson, con un número  $x$  de ocurrencias y una Media  $\lambda t = m$ . Asimismo, la figura II.4. muestra cuatro diagramas de la distribución para una  $\lambda$  correspondiente a 1, 2, 5 y 8 unidades.

### II.5. La Distribución Exponencial.

Cuando la duración del servicio a los clientes se encuentra determinada por una variable aleatoria, la ley de probabilidad que se presenta frecuentemente, tiene la forma de una Distribución Exponencial (que muchos autores llaman Exponencial Negativa).

"Una variable aleatoria continua (es decir, que toma cualquier valor sobre un intervalo continuo de la línea real), cuya función de densidad está dada por:

$$f_X(y) = \begin{cases} \frac{1}{\theta} e^{-y/\theta}, & \text{para } y \geq 0 \\ 0, & \text{para } y < 0 \end{cases}$$

se define como una variable aleatoria Exponencialmente distribuida. La Distribución Exponencial es una función del único parámetro  $\theta$ , en donde  $\theta$  es cualquier constante positiva." (8)

Se puede escribir la función de Distribución Acumulada para una variable aleatoria continua,  $F_X(t)$  como:

$$F_X(t) = \int_{-\infty}^t f_X(y) dy ,$$

en donde  $f_X(y)$  es la función de densidad de la variable aleatoria  $X$ . Desde un punto de vista de notación, se usa el subíndice  $X$  para indicar la variable aleatoria que se tiene bajo consideración. Cuando no existe ambigüedad, puede eliminarse este subíndice y  $f_X(y)$  se denota como  $f(y)$ .

Nótese que es posible calcular todo tipo de probabilidades, por ejemplo:

$$P \{ a \leq X \leq b \} = F(b) - F(a) = \int_a^b f_X(y) dy .$$

En términos estrictos, el símbolo  $P \{ a \leq X \leq b \}$  se relaciona con la probabilidad de que el resultado  $w$  de un experimento pertenezca a un evento particular del espacio muestral, a saber, ese evento tal que  $X(w)$  está entre  $a$  y  $b$  siempre que  $w$  pertenezca al evento.

Considerando lo anterior, la función de Distribución Acumulada para una variable aleatoria exponencialmente distribuida está dada por:

$$\begin{aligned} F_X(t) &= \int_0^t \frac{1}{\theta} e^{-y/\theta} dy = \\ &= \frac{1}{\theta} \int_0^t e^{-y/\theta} dy = - \int_0^t e^{-y/\theta} - \left( \frac{dy}{\theta} \right) = - e^{-y/\theta} \Big|_0^t = \end{aligned}$$

$$= -e^{-t/\theta} + (e^{-0/\theta}) = 1 - e^{-t/\theta}, \text{ es decir:}$$

$$F_X(t) = \begin{cases} 0, & \text{para } t < 0 \\ 1 - e^{-t/\theta}, & \text{para } t \geq 0 \end{cases}$$

Así,  $f(\text{mayor o igual a } t \text{ unidades de tiempo}) = n(1 - e^{-t/\theta})$ , en donde  $n$  es el número de observaciones y  $\theta$  es el promedio de ocurrencias por intervalo.

Una gráfica de la Función de Densidad se indica a la derecha y -- hacia abajo como señal de que la desviación con respecto a  $\theta$  es mayor para servicios de mayor duración que para servicios breves.

A continuación se muestra la gráfica:

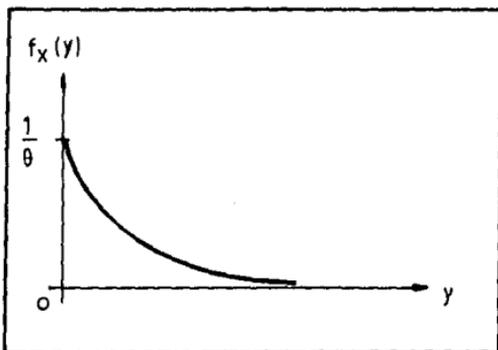


Figura II.5. Función de Densidad de la Distribución Exponencial.



## UNIVERSIDAD NUEVO MUNDO

### ACUSE DE RECIBIDO DE EJEMPLARES DE TESIS EN LA BIBLIOTECA CENTRAL

NOMBRE DEL ALUMNO:

JAVIER CARDENAS CARRILLO

NOMBRE DE LA TESIS O SEMINARIO APLICACION DE UN MODELO DE LINEAS DE -  
ESPERA AL SERVICIO DE DOCUMENTACION EN EL AEROPUERTO DE LA CIU -  
DAD DE MEXICO.

ESCUELA O UNIVERSIDAD

UNIVERSIDAD NUEVO MUNDO

CARRERA

INGENIERIA MECANICA ELECTRICA

FECHA

DIA

MES

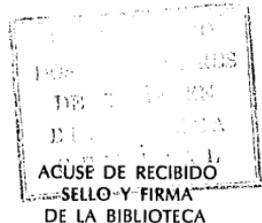
AÑO

04

DICIEMBRE

1987

- \* Favor de llenar por triplicado con letra de molde.
- \* Entregar dos ejemplares de la Tesis en la biblioteca Central-UNAM.
- \* Exigir que le sellen y le firmen las dos copias.



### III. EL AEROPUERTO DE LA CAPITAL, PROBLEMÁTICA Y OPCIONES

#### III.1. Antecedentes

La terminal aérea de la Ciudad de México tiene más de sesenta --- años de existencia, ya que se reconoce como tal a unos llanos en un rancho de Balbuena, "cercaños a la capital", que fueron utilizados-- para efectuar, el ocho de enero de 1910, el primer vuelo, con un --- frágil biplano perteneciente al Sr. Alberto Braniff.

Hasta 1918 se creó el primer departamento de aviación civil (co-- conocido hoy en día como la Dirección General de Aeronáutica Civil),-- quedando prohibido por las autoridades en ese año, la utilización de los campos de Balbuena, por motivos de diverso origen.

El primer aeropuerto nació entonces, en la capital de México, --- en el año de 1929. Tenía un edificio terminal de moderna y atrevida construcción, estacionamiento para vehículos terrestres y lugares es-- pecíficos para los servicios de las compañías, sala de pasajeros, -- restaurantes y dos pistas de aterrizaje asfaltadas.

Desafortunadamente, un temblor dejó sensiblemente dañado al edifi-- cio terminal, por lo que fue demolido y sustituido por otro, emplea-- do en nuestros días para comisariato y otros servicios de la compa-- ñía Aeroméxico.

Las instalaciones de aquel momentáneo edificio, se limitaban a -- una sala de escasa medida y capacidad, y una rudimentaria torre de -- control, suficientes para los aviones y el movimiento de la época.

Fue en la década de los treinta cuando se consolidó nuestra -----

aviación comercial. Apareció una compañía de gran tradición y permanencia en nuestro aerotransporte: Aeronaves de México, que unía a la capital de la República con el puerto de Acapulco. Las exigencias fueron en aumento y el aeropuerto pudo contar con más plataformas y con algunos hangares.

La incorporación del legendario DC-3, hizo rentable a la aviación comercial y el transporte aéreo comenzó su carrera de progreso. En 1948, se hizo indispensable construir un nuevo aeropuerto, ya que el antiguo se había ampliado varias veces y ya carecía de funcionalidad para las necesidades planteadas. Este aeropuerto se inauguró el 20 de Noviembre de 1952.

Desde aquella fecha, en el aeropuerto cada día hubo más movimiento de pasajeros y las operaciones fueron en aumento permanente. Periódicamente se tuvieron que reforzar las pistas, agrandar las plataformas, alargar el edificio terminal e incrementar los servicios. El gobierno federal se vio en la necesidad de establecer un organismo que se encargara de la administración de los aeropuertos. Dicho organismo se denominó ASA (Aeropuertos y Servicios Auxiliares).

A lo largo de los primeros días de la aviación comercial, el desarrollo de los aeropuertos fue rodeado de muchos menos problemas de los que existen en la actualidad. Había terrenos vacíos circundando a las ciudades, y éstos eran relativamente baratos. La gente rara vez se preocupaba del ruido de los aviones, no existían retrasos de vuelos, ni la necesidad de un control estricto del tráfico aéreo, y ya que la tierra podía ser adquirida fácilmente, los diseñadores de aeropuertos pusieron muy poca atención, o más bien ninguna, al futuro.

El resultado fue que, por ejemplo, en el aeropuerto capitalino, al mismo tiempo del florecimiento, las construcciones se extendie--

ron hacia el mismo, gradualmente se apoderaron del edificio, y hoy este hecho representa una fuerte limitante para el progreso.

### III.2. Ubicación, Generalidades e Infraestructura .

En cuanto a la ubicación del aeropuerto (Indicada en la Figura - III.1.), se encuentra localizado en una región al Este del centro - del Distrito Federal, sobre la Delegación Venustiano Carranza y con la vecindad de las colonias San Juan de Aragón, Caracol, El Sol y - la 2a. Sección de la Moctezuma. Asimismo, muy próximo a él se encuentran los terrenos del ex-Lago de Texcoco.

En lo que respecta a generalidades e infraestructura, se pueden mencionar:

#### A) Generalidades.

Nombre:	Aeropuerto Benito Juárez de la Ciudad de México.
Categoría por equipo y servicio de salvamento:	sexta.
Tipo:	internacional.
Clasificación por distancia:	largo alcance.
Ubicación Geográfica:	Latitud: 19° 26' 13" N. Longitud: 99° 04' 10" W.
Altitud:	2237 m sobre el nivel del mar.
Superficie que ocupa:	746.3 Ha.

DELEGACION V. CARRANZA

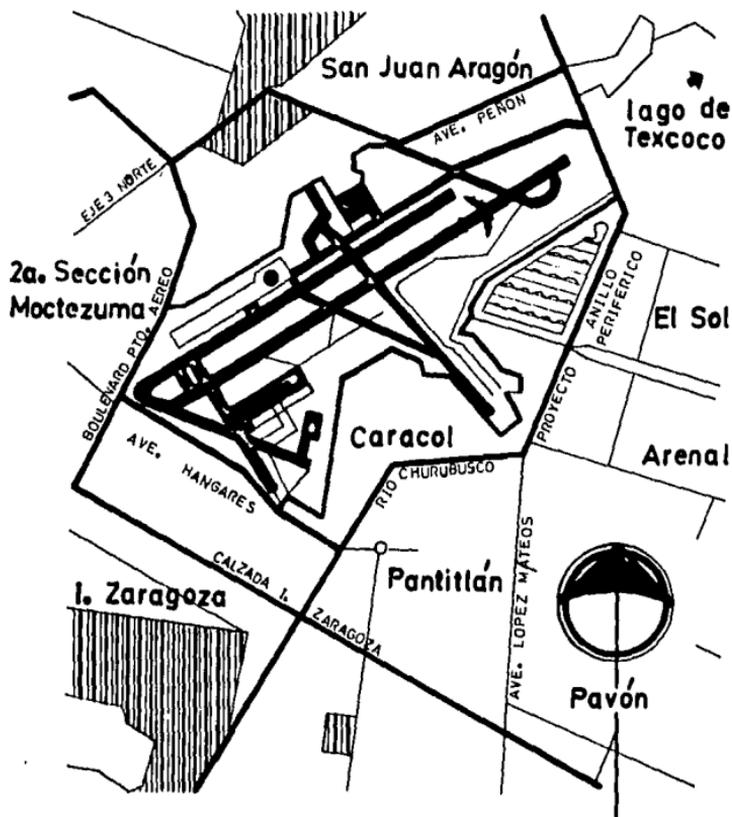


Figura III.1. Ubicación del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.

B) Infraestructura.

-Zona operacional:

- 1) ayudas visuales: Sistema VASIS en ambas pistas.\*  
Faro giratorio (localizado en el cerro del Peñón).  
Conos de vientos.  
Luces de aproximación.  
Luces de destello.  
Plantas de emergencia.
- 2) ayudas a la navegación: Controlador VOR. \*\*  
Radar ASR.  
Marcadores.
- 3) pistas: 5D-23I de 3900 m x 45 m.  
5I-23D de 3846 m x 45 m.  
13-31 de 2300 m x 40 m (fuera de servicio).  
Todas de concreto asfáltico.
- 4) plataforma de aviación comercial: Area de 347 000 m<sup>2</sup>.  
de concreto asfáltico e hidráulico.  
con suministro de combustible.
- 5) plataforma de aviación general: Area de 100 000 m<sup>2</sup>.  
de concreto asfáltico.  
con suministro de combustible.

\* El Sistema VASIS (VISUAL APPROACH SLOPE INDICATOR SYSTEM, sistema visual indicador de pendiente de acercamiento), está constituido por juegos de tres luces, al final de la pista, para facilitar el acercamiento.

\*\* El Controlador VOR (VERY HIGH FRECUENCY, OMNIDIRECTIONAL RANGE, -muy alta frecuencia, alcance en todas direcciones), es un receptor de señales para establecer la posición de un avión, en cierto rango de altura y distancia.

6) plataforma de carga aérea:

Area de 54 000 m<sup>2</sup>  
de concreto asfáltico.

-Zona terminal de pasajeros de aviación comercial:

1) edificio terminal:

Area de 69 000 m<sup>2</sup>, que comprende:  
4 800 m<sup>2</sup> en documentación de compañías nacionales.  
6 000 m<sup>2</sup> en documentación de compañías extranjeras.  
10 200 m<sup>2</sup> en salas de espera para vuelos nacionales.  
3 200 m<sup>2</sup> en salas de espera para vuelos internacionales.  
9 200 m<sup>2</sup> en reclamo de equipaje nacional.  
7 000 m<sup>2</sup> en reclamo de equipaje internacional.  
28 600 m<sup>2</sup> en servicios de apoyo.

2) estacionamiento para autos:

Edificio vertical #1, en una superficie de 61 200 m<sup>2</sup>, con capacidad para 1 900 cajones. Estacionamiento #2, #3, y #4 para 340, 282 y 514 cajones respectivamente.

-Zona terminal de pasajeros de aviación general:

Edificio terminal, en una superficie de 1 350 m<sup>2</sup>  
Estacionamiento en un área de 3 100 m<sup>2</sup>, para 103 cajones.  
90 hangares en una superficie de 38 Ha.

-Zona de manejo de carga:	Terminal de carga internacional, en una superficie de 11.1 Ha. -- Bodegas en 1.72 Ha. Correo, 6 300 m <sup>2</sup> .
-Zona de apoyo a la operación:	Torre de control: Altura de 33 m. Edificio anexo, en 880 m <sup>2</sup> , que -- aloja: Laboratorio, Radar, sub-- estación, oficinas.
-Zona de Combustibles:	Superficie: 8.2 Ha. con capacidad para almacenar 10.4 M litros de combustible 5 tanques de almacenamiento de -- turbosina. 2 tanques de almacenamiento de -- gas-avión.
-Cuerpo de Rescate y extinción de incendios:	Superficie: 1.7 Ha. Equipo operacional: Vehículos de rescate, de ataque, de apoyo, de evacuación y de limpieza.
-Zona de mantenimiento de aviones:	Aeronéxico: 7.9 Ha. Mexicana: 20.2 Ha.
Fuerza aérea Mexicana:	Superficie: 14.5 Ha.
Zona Presidencial:	Superficie: 17.2 Ha. *

\* Los datos fueron proporcionados en tablas de la DIRECCION GENERAL DE AEROPUERTOS, Depto. de Planeación, oficina de Estadística y Aforos.

### III.3. Problemas que se Detectaron.

Durante el período de recopilación de datos para el presente estudio, se detectaron muchos problemas tanto en los sistemas como en la ubicación del aeropuerto. A continuación se mencionan algunos:

Con referencia a los sistemas de pasajeros y equipajes:

- El edificio terminal, en todos sus servicios, está saturado.
- Los vestíbulos y circulaciones se bloquean.
- Las salas de pasajeros se congestionan.
- Faltan mostradores para aerolíneas, por lo que se han tomado espacios destinados a otros fines.
- La circulación en las zonas de manejo de equipaje es muy conflictiva.
- No existen señales adecuadas que indiquen hacia donde dirigirse.
- Los sistemas de transporte a la ciudad no ofrecen un servicio adecuado.
- Los estacionamientos se encuentran saturados y obligan a caminar grandes distancias.

Con referencia a los sistemas para aeronaves:

- El tránsito aéreo continúa teniendo una sola vía de entrada y salida al noroeste, en condiciones de vuelo por instrumentos.
- Los sistemas de comunicación presentan congestionamientos en sus frecuencias.
- Las plataformas sufren de numerosos períodos de saturación y son insuficientes, lo cual obliga a colocar las naves sin distancias de protección entre una y otra y a ocupar espacios muy lejanos -- del área terminal.

- Los sistemas de pistas y rodaje son inadecuados por sus numerosos cruces, que obligan a retrasos innecesarios.
- El mantenimiento de pistas, debido a su hundimiento ya crítico es incosteable, sin embargo, es indispensable.
- Las plataformas se han fundido con la calle de rodaje creándose una mezcla peligrosa de circulación y estacionamiento de aviones.

Con referencia a la ubicación:

- Los niveles de ruido para la ciudad están arriba de lo recomendable, en función de intensidad y frecuencia.
- La contaminación sobrepasa los límites de lo nocivo.
- El riesgo de accidentes, al estar rodeado de zonas habitadas, es muy alto.
- Sus posibilidades de expansión son muy limitadas.

Además, se dá servicio deficientemente a la aviación comercial, oficial y militar, así como a la escuela y la aerocarga, generando una de las zonas más conflictivas de la ciudad.

#### III.4. Magnitud de los Elementos.

La base para determinar la magnitud de los elementos que conforman al aeropuerto, de tal manera que pueda prestar un nivel de servicio adecuado durante su desarrollo, son las concentraciones de la demanda y sus proyecciones. Mediante un análisis operativo particular de los diferentes elementos, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en conjunto con la Secretaría de Desarrollo Urbano y -- Ecología han establecido parámetros que, aplicados a los valores --

específicos de la demanda concentrada, permiten obtener la magnitud buscada.

Cabe mencionar que existen elementos cuya magnitud es determinante para el desarrollo ordenado y armónico. Se encuentran en esta -- clasificación: Los edificios terminales de pasajeros, el área de -- operaciones constituida por pistas y calles de rodaje, las plataformas, los estacionamientos para automóviles, zonas de carga y áreas para el almacenamiento de combustibles.

El resto de los elementos, aún cuando son indispensables para la operación del aeropuerto, dado que su magnitud es relativamente pequeña comparada con los anteriores, pueden ser localizados sin mayor problema y, por lo mismo, no requieren análisis exhaustivo para definir sus dimensiones ya que no afectan la extensión final del -- aeropuerto.

Del análisis operativo particular para los diferentes elementos, se derivaron los siguientes parámetros que corresponden a la magnitud unitaria para un adecuado nivel de servicio:

- 13.7 m<sup>2</sup> en edificios para pasajeros de aviación comercial/pasajero en hora crítica de compañías Nacionales y Extranjeras.
- 60 operaciones en hora crítica como capacidad máxima de la configuración actual de las pistas con sistema de salidas de alta velocidad.
- 6500 m<sup>2</sup> de plataforma de operaciones/avión en posición simultánea para aviación comercial de compañías Nacionales.
- 8500 m<sup>2</sup> de plataforma de operaciones/avión en posición simultánea para aviación comercial de compañías Extranjeras.
- 2 cajones de estacionamiento de aviación comercial/pasajero en hora crítica.

- 5 cajones de estacionamiento de autos oficiales/ $\bar{M}$  pasajeros anuales.
- 20 cajones de estacionamiento para transportación terrestre/ $\bar{M}$  pasajeros anuales.
- 23 cajones de estacionamiento de autos en renta/ $\bar{M}$  pasajeros anuales.
- 500 cajones de estacionamiento de empleados/ $\bar{M}$  pasajeros anuales.
- $30 \text{ m}^2$  de estacionamiento para pasajeros, oficial, empleado/cajón.
- $50 \text{ m}^2$  de estacionamiento para transportación terrestre/cajón.
- $40 \text{ m}^2$  de estacionamiento para autos en renta/cajón.
- $0.15 \text{ m}^2$  de almacén/tonelada anual de carga nacional.
- $1.2 \text{ m}^2$  de almacén/tonelada anual de carga internacional.
- $1 \bar{M}$  litros de combustible en almacén/16 000 operaciones anuales comerciales.
- $6 500 \text{ m}^2$  de zona de mantenimiento para compañías aéreas/avión en pernocta.
- $300 \text{ m}^2$  de oficina de autoridades aeroportuarias con actividad directa a la operación/ $\bar{M}$  pasajeros anuales.
- 0.8 Ha. de oficina de autoridades aeroportuarias con actividad de apoyo a la operación/ $\bar{M}$  pasajeros anuales.
- $100 \text{ m}^2$  de edificio de servicios a plataforma/2000 operaciones anuales de compañías Extranjeras.

Es importante precisar que los indicadores anteriores fueron establecidos tomando en cuenta las características únicas de operación del aeropuerto, tales como mezcla de aeronaves, frecuencia de la demanda, tipo de servicio, etc., y permiten únicamente sentar criterios generales para la planeación.

### III.5. Opciones Contempladas.

Hoy en día, la posibilidad de establecer una nueva base aérea, -- fuera de los límites del Distrito Federal, es muy remota. Según algunas consideraciones del Departamento de Proyectos de Aeropuertos y - Servicios Auxiliares, se estima que la construcción de una nueva terminal, de llegar a realizarse, se hará únicamente dentro de unos --- veinte o veinticinco años.

Por otra parte, no deben descartarse los problemas técnicos, legales y económicos existentes en la creación de un nuevo aeródromo, -- entre las que se cuentan: Los factores climatológicos y orográficos del lugar, la consistencia y resistencia del suelo, la implantación- de redes de infraestructura y líneas de alta tensión, la afectación- a terrenos, la tendencia del crecimiento de la ciudad y el monto de- la inversión.

Del mismo modo, no debe tampoco perderse de vista que una nueva - ubicación implica estar lo suficientemente cerca de la ciudad a la - que se presta servicio para que el funcionamiento sea eficiente, y - lo bastante lejos, para no ser una molestia o un peligro para los habitantes de las cercanías. Esta decisión obliga a un cambio en las - costumbres de los usuarios, en su forma y medio de traslado, lo cual puede llegar a complicar aún más la organización de la ciudad, si no se maneja en forma adecuada.

La distancia desde los centros en donde se generan los pasajeros- al aeropuerto, requiere de un enfoque especial, ya que en la actualidad, debido al congestionamiento de tránsito que existe en la ciudad, es más importante medir el traslado entre ésta y el aeropuerto en -- términos de tiempo, más que de distancias.

La adquisición de una conciencia que sea capaz de analizar la --- problemática aeroportuaria de la capital es reciente y las soluciones siguen aún en desarrollo. Al parecer, se contó con un proyecto --- capaz de conformar el futuro de la terminal. Varias fuentes lo dieron a conocer y, entre ellas, un diario capitalino citó lo siguiente:

"En el límite de saturación, el Aeropuerto Internacional de la -- Ciudad de México, que sirve actualmente a diez millones de pasajeros será ampliado sobre terrenos del ex-Lago de Texcoco, con -- una primera pista de cuatro kilómetros de longitud, a seis kilómetros de la actual terminal y salas de última espera, a las que en el futuro se llegará a bordo de unos vehículos silenciosos.

Así lo anunció ayer el Secretario de Comunicaciones y Transportes, Rodolfo Félix Valdés, ... . El funcionario dió a conocer -- los detalles del proyecto que en su primera etapa estará terminando en 1987 para atender a 14 millones de pasajeros." (10)

Sin embargo, a últimas fechas apareció en el mismo diario:

"La red aeroportuaria nacional de 57 terminales aéreas movilizará a 40 millones de pasajeros durante el presente año --tan sólo 15 millones moverá el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México-- mientras se decide se se amplía éste, afirmó ayer Jorge de -- la Madrid Virgen, director de aeropuertos de la SCT ...

... Categóricamente afirmó que "La solución al actual Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, para construir una tercera pista para Jets y nuevas salas para pasajeros de llegada y salida, se canceló en 1985 por la crisis económica y porque el país tiene otras prioridades y hasta la fecha ignoramos cuándo pueda ser posible la ampliación del actual." De la Madrid Virgen dijo que "No habrá necesidad de ampliar el actual aeropuerto capitalino hasta 1992, cuando podría llegar a la saturación." (11)

Aún cuando la finalidad del presente estudio no es precisamente el optar por la creación de una nueva base aérea, es notorio que de quedar implantado el proyecto anterior, el desarrollo de la terminal sería lento y gradual, en contraposición a las necesidades ya urgentes del aeropuerto.

Por otra parte, cabe mencionar que dicho proyecto comprende una serie de pormenores, entre los que se encuentran:

- 1) Los pasajeros serían recibidos y documentados en las actuales -- salas de recepción y tendrían que ser trasladados, por algún medio, a las salas de última espera, situadas a seis kilómetros.
- 2) Habría que cruzar la Vía Tapo (que forma parte del periférico) y la vía del ferrocarril.
- 3) El aeropuerto se mantiene adyacente a la mancha urbana, en zonas densamente pobladas.
- 4) Persiste la mala calidad de los suelos y la imposibilidad de desalojo de aguas pluviales.
- 5) Las instalaciones funcionarían siempre bajo saturación, ya que el nuevo complejo sería terminado en su totalidad, hasta el año 2005.

De acuerdo a las circunstancias anteriores y considerando la falta de un programa establecido, la mejor utilización de los recursos actuales, así como un nivel de servicio óptimo deberán ponerse en -- práctica, tan pronto como sea posible.

#### IV. PLAN DE TRABAJO Y APORTACION DE LA INGENIERIA INDUSTRIAL

##### IV.1. Idea Fundamental.

La transportación aérea, a partir de 1985 y durante los próximos años, se caracterizará por contener volúmenes de tráfico mucho mayores a los que se han prestado con anterioridad.

"El número de usuarios del transporte aéreo mundial se incrementará unas cuatro veces los volúmenes actuales para 1990. Los programas de carga se elaborarán calculando una cantidad seis veces mayor y en los países industrializados continuará predominando el pasaje aéreo." (12)

Debido al dinámico progreso de la tecnología, los servicios terrestres generalmente englobados en un aeropuerto, han quedado muchas veces por debajo de las exigencias del usuario. Este fenómeno se va agudizando conforme las ciudades se convierten en metrópolis y continúan creciendo y complicándose.

Todos los países hacen esfuerzos encaminados a la resolución de problemas planteados a los servicios terrestres por la transportación aérea. México no ha sido la excepción, pues se ha visto en la necesidad de ir actualizando sus instalaciones mediante una serie de cambios que van en aumento de número y costo. El solucionar dichos problemas le es de trascendental importancia ya que, de no hacerlo, su participación en las grandes rutas comerciales quedará marginada, en detrimento de su economía, tanto a nivel nacional como internacional.

#### IV.2. Area a Estudiar.

Derivado de los problemas de saturación que se han venido agudizando en los últimos años, la presente investigación propone reformar un aspecto relevante del nivel de servicio en el aeropuerto capitalino, incorporando una estrategia que sea aplicable a la demanda actual y la de los próximos años, de modo de constituir un apoyo a la decisión que se ha tomado con respecto a este organismo, considerado como entidad fundamental y preponderante de la economía nacional.

El caso que es motivo de estudio abarca una zona que origina confusión y desorden, sobre todo en las temporadas altas, siendo esta la de los mostradores de recepción de boletos.

Se ha determinado estudiar esta parte reconocida como "Documentación", por ser el lugar en donde se efectúa la actividad principal del edificio y constituir la entrada formal del pasajero al edificio terminal.

Bajo el contexto anterior y por medio de la aplicación de un modelo de LINEAS DE ESPERA el estudio demostrará la factibilidad y conveniencia de realizar el análisis, en función de la gran demanda existente en dicha área, considerada como elemento crítico y de suma trascendencia para el aeropuerto de la Ciudad de México.

Al ser analizadas las instalaciones y el nivel de servicio, se consideran las actividades no regulares. Los volúmenes de pasajeros, las frecuencias de arribo y los tiempos de despacho, entre otros elementos, demandan una capacidad muy superior en las temporadas altas, por lo que se estiman los requerimientos en estos períodos.

El número de controles de documentación, se indica en función del tiempo para despachar a un pasajero. Este número suele ser determinado por las líneas aéreas, conforme a sus criterios y normas internas. Algunas de las variables que influyen en el establecimiento de estos puntos, se basan en los siguientes parámetros:

1) Número de embarque: Esta cifra es obtenida proyectando la hora pico de un día promedio, en el mes pico de embarques, considerando la capacidad de asientos por aeronave, que los controles pueden atender.

2) Factor de utilización: Indica la relación existente entre el número de pasajeros que utilizan los servicios de los agentes en los filtros, y el número de pasajeros embarcados o listos para hacerlo.

3) Distribución de los pasajeros de llegada: Es la forma como los pasajeros llegan a los mostradores de documentación, y se obtiene formando tablas que indiquen el porcentaje de pasajeros que se presentan acumulativamente en períodos cortos de tiempo, a partir de un lapso considerable, antes que el vuelo es abierto, hasta su cierre.

4) Ritmo de despacho: Es el tiempo medio de servicio necesario para atender a un pasajero en una instalación concreta. Depende de la naturaleza de los procedimientos, y es obtenido a través de levantamientos de estudios de tiempo en la operación de documentación.

Con el uso adecuado de los filtros de documentación, el aeropuerto logrará reducir en gran medida los costos de operación, y los pasajeros podrán gozar de una mayor comodidad, en cuanto más sean ágiles los trámites que deben efectuar.

#### IV.3. Importancia.

Al aeropuerto de la Ciudad de México generalmente se le ha considerado como un conjunto de instalaciones que permiten el aterrizaje y despegue de aeronaves. Seguramente ésta es la función para los usuarios regulares del servicio. Sin embargo, para los diseñadores y planificadores, es un fenómeno de gran relevancia, además de ser un reflejo de la marcha de la economía y de las perspectivas de progreso nacional.

La terminal tiene en potencia un amplio margen para desarrollar diferentes iniciativas. El análisis al nivel de servicio comprende la estimación de la demanda y recursos con que se cuenta, así como la interpretación de los pronósticos, para prevenir un crecimiento adecuado. El valor de éstos es fácil de apreciar, si se examinan las decisiones que de ellos dependen. Una interpretación tomada a la ligera, puede llegar a repercutir ampliamente en el funcionamiento del sistema, tal y como sucedió en los años setentas, cuando las proporciones en el incremento de la transportación aérea fueron sub-estimadas, provocando hoy en día, un nivel muy inferior al apropiado.

Efectivamente, en la actualidad, el costo social del aeropuerto es alto, ya que los viajeros sufren la carencia de una organización que controle el flujo en los distintos movimientos, así como un diseño que sea capaz de determinar la secuencia de operaciones requerida.

Ahora bien, ya que el proyecto que se había planteado ostenta graves inconvenientes, y dado que las soluciones se calculan para un período muy largo de tiempo, es posible considerar que lo que se está realizando es únicamente un paliativo más, para mantener de algún modo las operaciones, aún cuando no se cuente con la infraestructura adecuada.

Por otro lado, existen en el aeropuerto una gran cantidad de problemas, en su mayoría de saturación, que afectan a zonas sumamente importantes, tales como el sistema de pistas y rodajes, o los estacionamientos, los cuales podrían tener solución si se aplicara la Teoría de Líneas de Espera, o alguna otra técnica, de las muchas que ofrece la Investigación de Operaciones.

Dado lo anterior, el presente estudio no solo contribuye a satisfacer la demanda actual, sino que es capaz de abrir nuevas puertas, y trascender hacia la realización de posteriores análisis, que serían de gran utilidad. Además, es pertinente mencionar que a través de investigaciones previas, efectuadas en la Universidad Nacional Autónoma de México, así como en otras instituciones académicas de prestigio, se pudo constatar que existen muy pocos tratados referentes a la Teoría de la Espera, y los que han sido elaborados, abarcan casi en su totalidad al aspecto productivo, y no al de servicios.

#### IV.4. Objetivos.

En general, el análisis plantea la técnica que ha de utilizarse con el fin de obtener medidas de rendimiento que son funciones de los tiempos de espera, los cuales a su vez, dependen de variables controlables, tales como el número de servidores, la intensidad de tráfico, el número promedio de llegadas, etc.

Como fin primordial, el estudio persigue la obtención de un modelo matemático de Líneas de Espera, aplicable a una situación real de congestionamiento, de modo que se tengan posibilidades de contrarrestar los tiempos de espera, y los castigos asociados con ésta.

Se pueden señalar como objetivos a los siguientes:

- 1) Reconocer cualitativa y cuantitativamente a cada una de las variables que intervienen en el caso que es motivo de análisis.
- 2) Establecer las condiciones apropiadas y aplicar las distribuciones de probabilidad que se ajustan mejor a los procesos.
- 3) Estimar las proporciones de la demanda tanto actual como futura, el número de servidores que se requieren y la eficiencia de tales -- servidores.
- 4) Determinar la capacidad requerida en instalaciones, para satisfacer las necesidades y ofrecer un nivel de servicio adecuado.
- 5) Ayudar a un mejor funcionamiento, incorporando una alternativa -- que logre agilizar los trámites en los mostradores de documentación.

#### IV.5. Aportación de la Ingeniería Industrial .

Como ya se ha dicho, son muchos los problemas que existen en el aeropuerto capitalino, siendo visible que representan un mal peligro so en la vida de la terminal y que resulta indispensable el proveer una configuración y un nivel de servicio más equilibrado.

La inquietud por mejorar la situación prevaleciente es la estructura que ha fundamentado y fundamentará a la Ingeniería Industrial.

Originalmente esta disciplina poseía la característica de ser dinámica, pero de alcance corto, asociado más bien al control y medida de los movimientos y al estudio de tiempos; sin embargo, más adelante ha desarrollado diversas técnicas que la han hecho más poderosa - pudiendo predecir y evaluar resultados de un modo muy eficiente.

La Ingeniería Industrial adquiere un papel muy importante al servir a la administración aeroportuaria para fijar políticas, metas y objetivos, diseñando los procedimientos para alcanzarlos y recomendando recursos y la forma de utilizarlos, además de otorgar sistemas de control para los mismos.

Aunque el aeropuerto capitalino ha sufrido modificaciones considerables, éstas nunca fueron proyectadas pensando en el futuro y en ningún caso se realizaron bajo una planeación general, por lo que -- ahora, una vez que se requiere de un funcionamiento óptimo, la Ingeniería Industrial es necesaria para una ejecución efectiva.

## V. ANALISIS DE ARRIBO Y DE SERVICIO EN DOCUMENTACION

### V.1. Lineamientos.

El presente capítulo abarca la investigación de las características de llegada y atención de pasajeros en el área de documentación del Aeropuerto de la Ciudad de México. La determinación de los parámetros fundamentales se llevó a cabo durante el año de 1985 y fue posible gracias a la cooperación de las autoridades del aeropuerto.

El estudio es desarrollado mediante la aplicación de un modelo de Teoría de Colas, que tiene como base a los siguientes lineamientos:

Los pasajeros que han de ser documentados representan a los ---- clientes del sistema, mientras que los empleados en cada mostrador son los servidores.

El tiempo requerido para dar atención a un pasajero representa al tiempo de servicio y el hecho de que existan dos ó cuatro servidores, ya sea que se trate de una compañía Nacional ó una Extranjera, señala un problema de canales varios y fase simple. Una característica que ha de observarse es que aún cuando la fuente de entrada ó potencial y la cola sean cantidades finitas, se considerarán como infinitas con el objeto de facilitar los cálculos.

"Dado que los cálculos son bastante más fáciles para el caso infinito, a menudo se hace esta suposición, aún cuando el tamaño real sea cierto número finito relativamente grande y debe tomarse como -

hipótesis implícita para cualquier modelo de colas en el que no se afirme lo contrario." (4)

El estado del sistema se considerará como estacionario ó estable, y la disciplina del servicio será la conocida como FIFO (First in, - First out, Primero en entrar, Primero en salir.)

## V.2. Terminología.

Es conveniente aclarar que a partir de este momento, algunos términos tomarán relevancia con respecto a otros:

### Filtros:

Al hacer mención de la palabra "Filtro", se está haciendo referencia a aquel mostrador en donde el pasajero realiza sus trámites iniciales para viajar, estableciendo contacto con el personal de la línea aérea en la que se transporta. Estos trámites incluyen la verificación del boleto, el peso y la contraseña del equipaje, la entrega del cupón de abordar y la asignación de asiento.

### Aforo de un vuelo:

Cada vuelo se toma en cuenta desde que es abierto para proceder con la documentación, hasta su cierre. Cuando se han obtenido todos los datos importantes en relación a la forma como se han ido acumulando los pasajeros ante el filtro, se dice que el vuelo ha sido "Aforado", para hacer posible así el análisis al nivel de servicio ofrecido.

V.3. Número de Aforos y de Pasajeros.

A continuación se indica el número de aforos que fueron levantados en cada una de las compañías de aviación. Sin embargo, para efectos prácticos y debido a la alta semejanza en las operaciones, los cálculos referentes a las distribuciones de probabilidad asociadas serán llevados a cabo exclusivamente para una compañía nacional y -- una extranjera, representativas de las demás, y a las que se denominará Compañía Nacional A y Compañía Extranjera #1.

COMPañIA	AFOROS	PAS. EN VUELO	NO. PAS
Nacional A	10	155	1550
Nacional B	10	155	1550
Extranjera #1	10	315	3150
Extranjera #2	10	315	3150
Extranjera #3	<u>10</u>	315	<u>3150</u>
TOTAL	50		12550

Tabla II. Total de Aforos levantados y número de pasajeros.

Dado que las compañías Nacionales utilizan con suma frecuencia al Boeing 727, con capacidad de 155 pasajeros, y que las Extranjeras -- utilizan del mismo modo al DC-10 con capacidad de 315 pasajeros, en la realización de sus operaciones, el análisis se desarrollará tomando en cuenta ésta consideración.

#### V.4. Distribución Tipo de Arribo .

Con objeto de determinar el tipo de distribución seguida por los pasajeros en su arribo a Documentación, se procedió de la siguiente manera:

En el momento en que los pasajeros empezaron a llegar a los filtros se fué anotando el número de los que presentaban documentos en base a intervalos de cinco ó cuatro minutos según el vuelo fuera al interior o al extranjero. Esta tasa observada de arribos por intervalo de tiempo se muestra en las tablas del Apéndice I.

Los tiempos equivalentes a setenta y cinco y ciento cuatro minutos indican para las Compañías Nacional A y Extranjera # 1 respectivamente, los tiempos durante los cuales se efectuó la documentación. Aunque existieron ocasiones en que la salida de un vuelo tuvo que ser demorada debido a factores como el mal tiempo o el retraso desde el lugar de procedencia, los períodos de operación de los filtros en las tablas no toman en cuenta la ocurrencia de dichos factores.

La figura V.1. muestra la forma utilizada en el levantamiento de arribo de pasajeros a las compañías nacionales. Una forma similar -- fué usada para las extranjeras.

El siguiente paso consistió en calcular las frecuencias correspondientes a los valores observados. Este resultado aparece en las columnas 1 y 2 de las tablas del Apéndice II. En la columna 3 se escribió la multiplicación del número de arribos por la frecuencia observada y así se pudo obtener la media del conjunto de datos.

LEVANTAMIENTO DE ARRIBO				
DOCUMENTACION: NACIONAL			FECHA: _____	
LINEA AEREA		DESTINO		NUMERO DE VUELO
No. PAS. : _____		HORA SAL. : _____		# FILTROS: _____
APERTURA : _____		CIERRE : _____		TPO
INTERVALOS		NUMERO DE PASAJEROS		
#	5 min	TOTAL	ACUM.	% ACUM.
1	00-05			
2	05-10			
3	10-15			
4	15-20			
5	20-25			
6	25-30			
7	30-35			
8	35-40			
9	40-45			
10	45-50			
11	50-55			
12	55-60			
13	60-65			
14	65-70			
15	70-75			
16	75-80			
17	80-85			
18	85-90			
19	90-95			
TOTAL :				
ANTICIPACION <input type="checkbox"/>		CAUSA : _____		
RETRASO <input type="checkbox"/>		_____		
OBSERVACIONES : _____				
_____				

Figura V.1. Forma utilizada en el levantamiento de arribo a Documentación para compañías Nacionales.

La columna 4 de las tablas anteriores consta de los valores teóricos de una distribución de Poisson, los cuales se obtuvieron a su vez, con ayuda de las probabilidades mostradas en el Apéndice III.

A continuación se multiplicaron los valores teóricos de la distribución, por el total de frecuencias observadas (Columna 5), y se verificó mediante una prueba de bondad de ajuste de  $X^2$  (Columna 6), si era posible considerar a la muestra de datos como representativa de una distribución de Poisson, encontrándose que el resultado era satisfactorio (Apéndice IV), y en el cual el valor de la media (  $\lambda$  ), fué de 2.07 PAS/MIN para la Compañía Nacional A y 3.03 PAS/MIN, para la Compañía Extranjera # 1.

Las gráficas correspondientes a las distribuciones de arriba, son las indicadas en la figura V.2.

#### V.5. Medición del Servicio.

El análisis al servicio abarcó dos aspectos: El primero referente a un estudio de tiempos y el segundo relacionado con el tipo de distribución asociada al servicio.

Para el primer aspecto del estudio de tiempos, se diseñó una forma práctica que permitiera anotar aquellos datos relevantes con exactitud y de manera ordenada. La forma debía contener espacio suficiente para recopilar información tal como: Fecha, zona, operación, número de elementos, unidades por elemento, número de observaciones, - total de recuento, tiempo promedio, factor de actuación, tolerancias

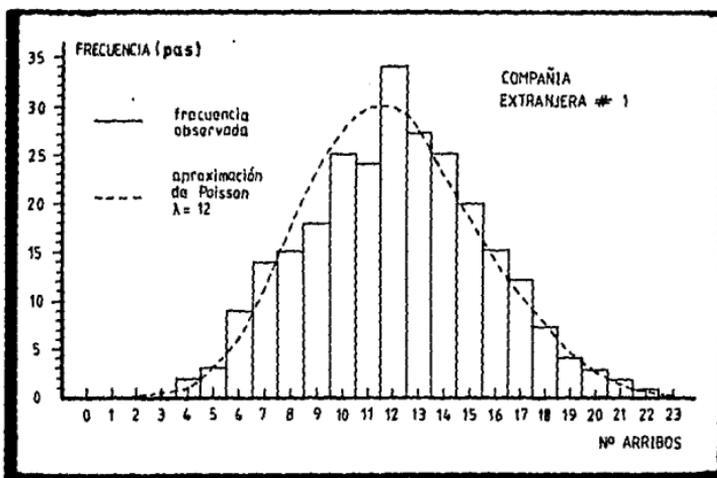
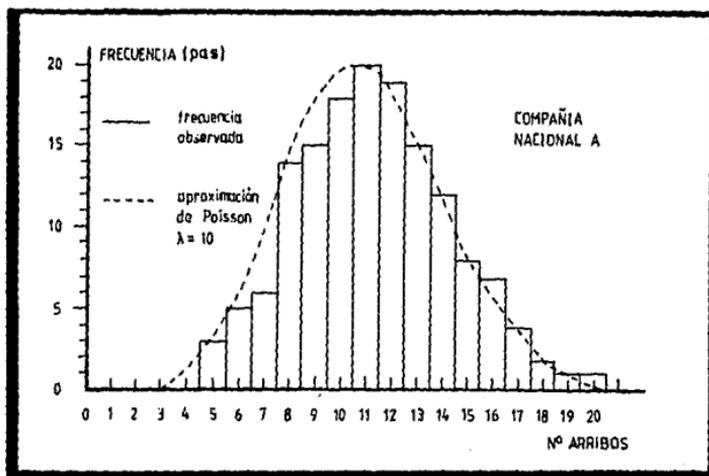


Figura V.2. Gráficas de las distribuciones de arribo para las compañías Nacional A y Extranjera # 1 .

elementos extraños y tiempos estándar. (El diseño de la forma se -- muestra en la figura V.3.)

Por medio del estudio fue posible determinar el tiempo estándar en el que un servidor revisa el boleto de salida y entrega el cupón de abordar a 1 pasajero. Para ello, se llevaron a cabo levantamientos de tiempo individuales, de los cuales se descartaron aquellos - en los que había intervenido algún elemento extraño. El análisis se realizó por separado para las compañías Nacional A y Extranjera #1.

Para tener un número confiable de observaciones, este número fue extraído de los tamaños de muestra dictaminados por la General ---- Electric Co., y del mismo modo el factor de actuación y las tolerancias se determinaron teniendo como patrones al Sistema Westinghouse de calificación y a los márgenes ó tolerancias establecidas por la Oficina Internacional del Trabajo (OIT). (13) y (14)

El factor de actuación comprendió a cuatro elementos fundamentales que son: Destreza, empeño, condiciones y consistencia; mientras que para las tolerancias se consideró a: La básica por fatiga, la - de atención estricta (minuciosa), el alto nivel de ruido y la monotonía.

El tiempo estándar se evaluó multiplicando el tiempo elemental - medio transcurrido por el factor de actuación y por la suma de la - unidad con el margen ó tolerancia, obteniéndose así un valor medio-igual a 55 segundos para la compañía Nacional A, y 72 segundos para la compañía Extranjera # 1.

Para el segundo aspecto de la distribución asociada al servicio, el procedimiento fue como sigue: Una vez que se fijaron los tiempos estándares de revisión de un boleto, éstos fueron utilizados en la elaboración de un número conveniente de intervalos, de tal modo que

HOJA DE TIEMPOS		FECHA :			
ELEMENTO	OBSERV. :	J. CARDENAS C.			
1) Checar boleto y entregar cupón.	HOJA DE HOJAS				
	OPER. :	REVISION DE BOLETO			
TOTAL OBSERV	ZONA :	DOCUMENTACION			
# OBSERV. :	TIEMPOS				
T PROMEDIO :	1	2	3	4	5
ACTUACION					
DESTREZA: _____					
EMPEÑO: _____					
CONDICIONES: _____					
CONSISTENCIA: _____					
SUMA Y FACT.: _____					
TOLERANCIAS .		Unidades utilizadas: _____			
FATIGA: _____ %		TIEMPO ESTANDAR :			
ATENCIÓN: _____					
RUIDO: _____					
MONOTONIA: _____					
TOTAL: _____ %		ELEMENTOS EXTRAÑOS :			
OBSERVACIONES : _____					

Figura V.3. Forma utilizada para la medición del tiempo de servicio.

fuera posible anotar en ellos la duración de cualquier tiempo de -- servicio.

El problema de la designación de un tiempo para los clientes que entregaban a revisión otros boletos además del propio, fue resuelto marcando con una raya el intervalo correspondiente a la duración to tal del servicio y escribiendo en el primer intervalo un número de rayas igual al resto de los boletos servidos en el mismo lapso. Lo anterior implica que las rayas del primer intervalo no se encuen-- tran necesariamente relacionadas con el número de boletos revisados estrictamente en forma individual.

Los tiempos de servicio con una duración mayor a 330 y 504 segun dos para las compañías Nacional A y Extranjera #1 respectivamente, fueron eliminados dado que rara vez se presentaban y, por tanto, la forma de considerar a los servicios de tiempos superiores a los men cionados fue como si se tratara de dos o más servicios diferentes.

Aunque el conteo se realizó tantas veces como el número de Afo-- ros, en la Figura V.4. se muestra solo un ejemplo de un vuelo elegi do al azar para cada una de las compañías estudiadas. Los valores de la totalidad de Aforos se encuentran en la columna 3 del análi-- sis efectuado al servicio en el Apéndice V, mientras que en la co-- luma 4 se localizan los valores de la función Exponencial:  $(1 - e^{-t/\theta})$ , los cuales constituyen una ley teórica de comparación y en donde  $\theta$  representa el tiempo estándar de revisión de un boleto.

Una prueba de  $\chi^2$ , utilizada esta vez también (Columna 5 del Apén dice anterior), demostró que el ajuste de los datos a una distribu-- ción Exponencial era satisfactorio. Las gráficas de la Fig. V.5. -- ejemplifican las distribuciones de servicio.

COMPañA: NACIONAL A

INTERVALO	CONTEO	TOTAL
00-55	IIIIII IIIIIII IIIIIII IIIIIII IIIIIII IIIIIII IIIIIII	—
	IIIIII IIIIIII IIIIIII	96
55-110	IIIIIIII IIIIIIIII IIIIIII III	33
110-165	IIIIIIII II	12
165-220	IIII	5
220-275	II	2
275-330	II	2
TOTAL DE PASAJEROS:		155

COMPañA: EXTRANSERA # 1

INTERVALO	CONTEO	TOTAL
00-72	IIIIIIII IIIIIIIII IIIIIIIII IIIIIIIII IIIIIIIII IIIIIIIII IIIIIIIII	—
	IIIIIIII IIIIIIIII IIIIIIIII IIIIIIIII IIIIIIIII IIIIIIIII IIIIIIIII	—
	IIIIIIII IIIIIIIII IIIIIIIII IIIIIIIII IIIIIIIII IIIIIIIII IIIIIIIII	197
72-144	IIIIIIII IIIIIIIII IIIIIIIII IIIIIIIII IIIIIIIII IIIIIIIII	—
	IIIIIIII IIIIIIIII	73
144-216	IIIIIIII IIIIIIIII IIIIIIIII	27
216-288	IIIIIIII III	14
288-360	II	2
360-432	I	1
432-504	I	1
TOTAL DE PASAJEROS:		315

Figura V.4. Conteo efectuado para estimar las distribuciones de servicio de las compañías.

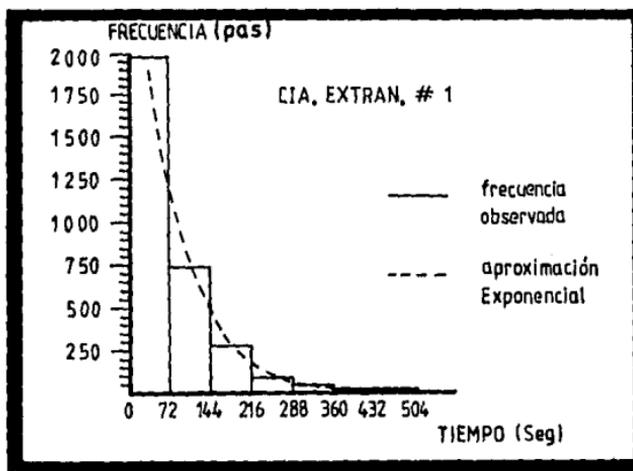
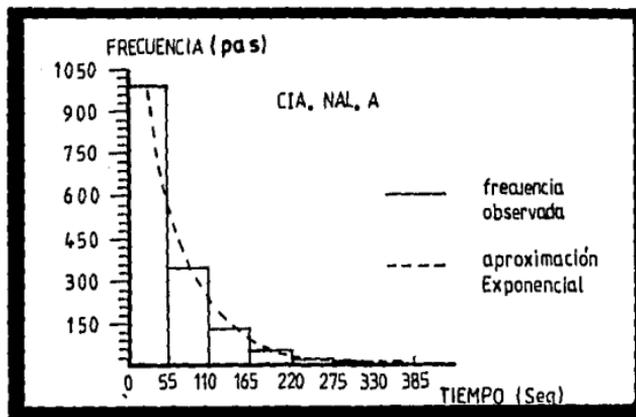


Figura V.5. Gráficas de las distribuciones de -  
servicio de la Cía. Nacional A y Extranjera # 1 .

## VI. NIVEL DE SERVICIO Y ALTERNATIVA DE DESARROLLO

### VI.1. Variables y Gráficas Comparativas.

Con objeto de lograr que los resultados representen de un modo más eficaz a la situación real, es adecuado emplear en las fórmulas los valores promedios de las tasas de arribo y de servicios. Una vez realizado ésto, es posible proceder a la utilización de las fórmulas deducidas en el Apéndice VI.

La tabla III a continuación, muestra los promedios para las compañías Nacionales:

COMPañIA	$\lambda$ (PAS/MIN)	T DE SER- VICIO (Seg)	$\mu$ (PAS/MIN)
NACIONAL A	2.07	55	1.09
NACIONAL B	2.93	40	1.50
Promedio	2.50		1.30

Tabla III. Valor promedio de las tasas de arribos y servicios en las compañías Nacionales.

VI.1.1. Compañías Nacionales.

Factor de utilización:  $F_u = \lambda / S \mu$  , (S = 2),

$$F_u = 2.50/2(1.30) = 0.96, \quad \text{y también:}$$

$$\rho = \lambda / \mu = 1.92 < 2. \quad \text{De este modo:}$$

1. Probabilidad de cero clientes en el sistema (ecuación X):

$$P_0 = \left\{ \frac{1.92^0}{0!} + \frac{1.92^1}{1!} + \frac{1.92^2}{2!} \frac{1}{[1 - (1.92/2)]} \right\}^{-1}$$

$P_0 = 0.020$ , lo que implica que existe un 2.0 % de probabilidades de que al llegar un cliente al servicio de documentación nacional, en un tiempo t dado, los dos puntos de servicio se encuentren vacíos y no exista ningún cliente esperando a ser servido.

2. Promedio de clientes que esperan servicio o promedio de longitud de la línea de espera (ecuación XI):

$$L = \left\{ \frac{2.5(1.30)(1.92)^2}{1! [1.30(2) - 2.50]^2} \right\} (0.020) = \frac{0.240}{0.010} = 24 \text{ clientes.}$$

3. Promedio de clientes en el sistema (ecuación XII):

$$W = L + (\lambda / \mu) = 24 + 1.92 = 25.92 \quad 26 \text{ clientes.}$$

4. Promedio del tiempo que espera un cliente antes de ser servido (ecuación XIII):

$$T_e = L / \lambda = 24 / 2.50 = 9.60 \text{ minutos.}$$

5. Promedio del tiempo que un cliente pasa en el sistema (ecuación XIV):

$$T_w = T_e + (1 / \mu) = 9.60 + (1 / 1.30) = 10.37 \text{ minutos.}$$

6. Número esperado de servidores desocupados. A fin de calcular -- este número, es necesario referirse a la fórmula VII desarrollada en el Apéndice VI. Así:

$$P_n = \frac{\rho^n}{n!} P_0 ,$$

$$P_1 = \frac{1.92}{1!} (0.020) = 0.0384 ,$$

El número promedio esperado de servidores desocupados ( $E_s$ ) es:

$$E_s = 2P_0 + 1P_1 = 2(0.020) + 0.0384 ,$$

$$E_s = 0.040 + 0.0384 = 0.0784 \text{ servidores.}$$

Esta respuesta significa que probablemente nunca habrá un servidor desocupado. El valor puede comprobarse refiriéndose a las respuestas obtenidas previamente. El número de clientes en el sistema-- (25.92) menos el promedio de longitud de la línea de espera (24), es igual al promedio de los que reciben servicio. (1.92 clientes). Dos servidores menos 1.92 clientes que reciben servicio, son iguales a - 0.078 de servidor desocupado.

#### VI.1.2. Compañías Extranjeras.

COMPAÑIA	$\lambda$ (PAS/MIN)	T DE SER- VICIO (Seg)	$\mu$ (PAS/MIN)
EXTRANJERA # 1	3.03	72	0.83
EXTRANJERA # 2	3.00	78	0.77
EXTRANJERA # 3	3.10	75	0.80
Promedio:	3.04		0.80

TABLA IV. Valores promedio de las tasas de arribos y servicios en las compañías Extranjeras.

Factor de utilización:  $F_{II} = 0.95$  ( $S = 4$ ),

$$\rho = 3.80 < 4$$

1. Probabilidad de cero clientes:

$$P_0 = 0.005$$

2. Longitud promedio de la línea de espera:

$$L = 16.46 \approx 16 \text{ clientes}$$

3. Promedio de clientes en el sistema:

$$W = 20.26 \approx 20 \text{ clientes}$$

4. Promedio de espera de un cliente antes de ser servido:

$$T_e = 5.41 \text{ minutos}$$

5. Promedio de espera de un cliente en el sistema:

$$T_w = 6.66 \text{ minutos}$$

6. Promedio esperado de servidores desocupados:

$$P_1 = 0.0190$$

$$P_2 = 0.0361$$

$$E_s = 3P_0 + 2P_1 + 1P_2$$

$$E_s = 0.0891$$

### VI.1.3. Gráficas

Las gráficas siguientes muestran como varían  $P_0$  y  $L$  con respecto a diversos valores de  $S$ . En ellas es posible verificar con bastante aproximación el resultado obtenido para ambas cantidades.

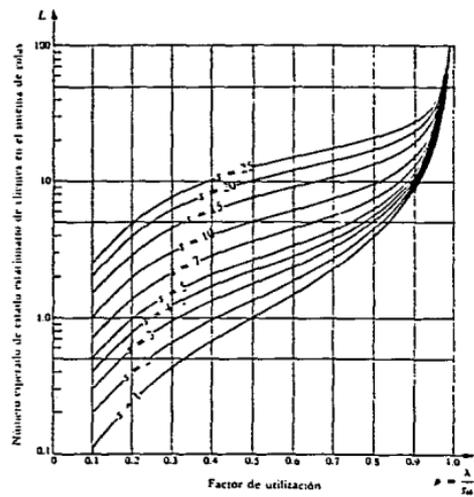
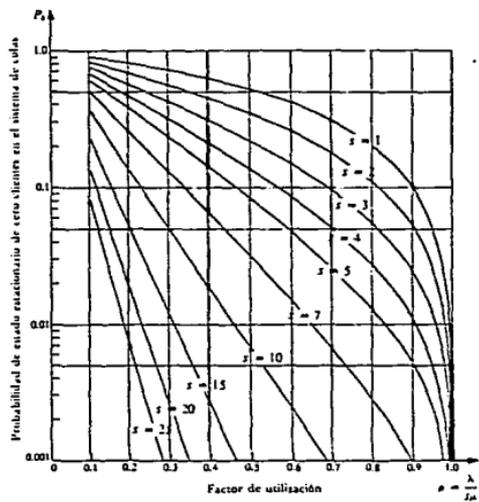


Figura VI.1. Variación de  $P_o$  y  $L$  con  $\rho$  para diversos valores de  $S$ .

## VI.2. Tasa de Servicio y Apreciación de Resultados.

Es claro que la tasa de servicio varía si la documentación se -- refiere a vuelos nacionales ó al extranjero, debido principalmente a la presentación de otros documentos, además del boleto de viaje, -- que las compañías extranjeras exigen, como es el caso de pasaportes y visas en regla. También se observó mayor confusión y nerviosismo de los pasajeros, cuando el vuelo se realizaba al exterior del país.

La Tasa de servicio de documentación ( $T_s$ ), se obtuvo por medio de levantamientos de estudios de tiempo en la operación de documentos. Los resultados obtenidos de los estudios fueron:

$$T_s \text{ (vuelos nacionales)} = 1.30 \text{ PAS/MIN,}$$

$$T_s \text{ (vuelos internac.)} = 0.80 \text{ PAS/MIN.}$$

La Tasa de servicio considerada para el Aeropuerto de la Ciudad de México, se obtiene por un promedio simple de Tasas para vuelos -- nacionales y al extranjero. Así:

$$T_s = \text{(Aeropuerto de la Ciudad de México)} = 1.05 \text{ PAS/MIN.}$$

Algunos aeropuertos extranjeros cuentan con estatutos bien definidos sobre la calidad del servicio ofrecido a los pasajeros, ya que han elaborado manuales que sirven de guía en el diseño y construcción de un aeropuerto como una unidad integral de los elementos que lo conforman. Dichos manuales contienen distintos puntos de vista - que van desde considerar al aeropuerto como una sola unidad funcional, hasta el cuidado del confort de los pasajeros en lugares específicos del edificio e incluso en el avión. Sin embargo, no se indica cómo cuantificar el servicio ofrecido al pasajero en el aeropuerto, o en algún otro elemento del mismo.

Si se analiza el valor obtenido para la Tasa de servicio del aeropuerto, y se observan los resultados de las fórmulas así como las distribuciones del capítulo anterior, es posible apreciar el nivel de servicio, sobre todo si se toman en cuenta los siguientes aspectos:

- El número de llegadas por minuto al aeropuerto de la capital es de 2.77, en promedio, para las compañías Nacionales y Extranjeras. Los filtros han alcanzado su nivel de saturación ya que un factor de utilización del 96 % para las compañías Nacionales, y uno de 95 % para las Extranjeras, significa una intensidad de tráfico sumamente elevada.

- De acuerdo a como se está operando en la actualidad, se ocupa una cantidad justa de agentes en los filtros. Esto se puede comprobar por la proximidad del valor de  $\rho$  al número de empleados de las compañías. Al adquirir  $\rho$  un valor mayor al número de servidores, la cola tiende a crecer ilimitadamente. "Si la tasa de llegadas por canal es igual a la de servicio, la cola crecerá indefinidamente, a medida que las llegadas se espacien de una manera regular al tiempo me-

dio de servicio. Este resultado es una consecuencia del hecho de que el tiempo de servicio no usado no se puede liberar o recobrar". (5)

- Como consecuencia del empleo justo de servidores, la probabilidad de encontrar al sistema vacío, en el caso de la compañía Nacional A, es prácticamente nula (2.0 %), mientras que dicha probabilidad no -- existe para la compañía Extranjera # 1, lo cual indica la imposibilidad de recibir el servicio en el momento de arribo a documentación.

- Por lo que respecta al número de clientes en la cola, las fórmulas determinaron un total de 24 y 16 pasajeros para las compañías Nacional A y Extranjera # 1 respectivamente. Esta cantidad es relevante, -- sobre todo si se toma en cuenta que permanece a lo largo de todo el proceso, es decir, desde la apertura del filtro hasta su cierre.

- Aún cuando se forme una sola línea de espera, ordinariamente esta línea se descompone en otras más cortas frente a cada una de las estaciones de servicio. Tratándose de las compañías Nacionales, únicamente son dos las estaciones que cubren la capacidad total del vue lo, mientras que en las Extranjeras, son cuatro (de acuerdo a los ca sos analizados), por lo que es más notorio para las primeras el nú mero de clientes en la cola, sin dejar de ser para ambas compañías una cantidad considerable.

- Para estimar el efecto de aumentar el número de puntos de servicio, es útil observar la figura VI.2. La gráfica muestra las longitudes de línea cuando operan desde uno hasta veinticinco servidores. En el actual estudio, el factor de utilización del sistema en la compañía Nacional A es de 0.96, y en la compañía Extranjera # 1, es de 0.95; entonces, L es aproximadamente 20, como se ve en la figura. La adición de otro canal reduce el factor a 0.64 para las compañías Nacio-

nales, y a 0.76 para las Extranjeras, lo cual dá como resultado: ---  
 $L = 2$ , y  $L = 5$ , respectivamente. Los efectos son sorprendentemente grandes. Es decir, se pueden obtener ganancias desproporcionadas en el tiempo de espera aumentando el número de canales. Un aumento más bien pequeño en la capacidad del sistema, para cargas grandes, puede producir una disminución grande en la longitud de la línea y en el tiempo de espera.

- El tiempo promedio de operación de los filtros, así como el rendimiento del documentador afectan directamente el funcionamiento de -- las compañías, por lo que su consideración (en el apartado siguiente) es de suma importancia al hacer una evaluación integral al nivel de servicio.

### VI.3. Rendimiento del Documentador.

Existe una forma bastante sencilla para conocer el rendimiento de un documentador, y consiste en dividir el número de pasajeros en espera de ser atendidos ( $P_e$ ), entre el total que puede atenderse durante la documentación.

Para calcular el total de los que pueden atenderse, es necesario multiplicar el tiempo promedio de operación de los filtros (TPO), -- por el número de pasajeros atendidos en la unidad de tiempo ( $\mu$ ).

El tiempo promedio de operación de un conjunto de "n" vuelos se obtiene como un promedio simple, de la siguiente forma:

$$TPO = \frac{\sum_{i=1}^n TPO}{n}$$

Este tiempo indica la anticipación de la apertura de los filtros, respecto a la hora de itinerario de salida del vuelo, considerándose las demoras por factores como son el mal tiempo, ó el retraso desde el lugar de procedencia.

El tiempo Promedio de Operación, obtenido con la fórmula anterior para las compañías Nacionales, es equivalente a 95 minutos (1.58 horas), mientras que para las compañías Extranjeras este tiempo es de 110 minutos (1.83 horas).

El rendimiento de un documentador es entonces:

$$E = \frac{P_e}{(TPO)(\mu)} \quad \text{Así:}$$

$$E (\text{servidor nacional}) = \frac{78}{95(1.30)} = 0.63 \text{ ó } 63 \%$$

$$E (\text{servidor extranjero}) = \frac{78}{110(0.80)} = 0.89 \text{ ó } 89 \%$$

tomando en cuenta que cada servidor es capaz de atender una cantidad de clientes (78), proporcional al número de servidores.

De este modo, el rendimiento del documentador en el aeropuerto de la Ciudad de México es de 76 %.

La similitud que existe entre los tiempos de operación para vuelos al interior del país y vuelos al extranjero, es un aspecto importante de resaltar, como también lo es el bajo rendimiento de los servidores nacionales.

En las compañías Nacionales, la cola máxima de pasajeros tiene lugar en el momento de apertura de los filtros; es decir, cuando se empieza a atender a los pasajeros. Dicha cola va disminuyendo paulatinamente, dando oportunidad al documentador de tener más holgura en el servicio y provocando que su rendimiento decaiga en buena medida.

Si bien es cierto que los pasajeros muchas veces originan retardos debido a que no presentan la documentación en forma adecuada, -- también es cierto que el rendimiento de los servidores es notoriamente bajo; sin embargo, como se mencionó anteriormente, algunos aeropuertos y compañías aéreas tienen bien definidos sus estatutos y políticas de servicio y prefieren ofrecer el mejor servicio posible sacrificando el porcentaje de utilización de sus empleados a cambio de satisfacer a los pasajeros.

Existen dos maneras para hacer que el documentador tenga un mejor aprovechamiento de su tiempo. La primera consiste en disminuir el -- Tiempo Promedio de Operación de los filtros. Esto queda a criterio -- de las compañías, pues las colas aumentarían considerablemente, creando confusión y desorden en perjuicio de la calidad del servicio -- ofrecido.

La otra alternativa es bajar la Tasa de servicio, dando alguna -- operación adicional al documentador, ya que su rendimiento actual lo permitiría.

#### VI.4. Tiempos de Espera y de Ocio.

Al igual que con las longitudes promedio de la cola, los tiempos de espera encontrados con las fórmulas son solo un valor aproximado al período de espera real del cliente en el sistema, ya que con frecuencia los documentadores se ven obligados a interrumpir su trabajo por diversos motivos que son, en gran cantidad de veces, ajenos a su labor.

Haciendo referencia a los resultados obtenidos, se observa que en el caso de los vuelos al extranjero, el tiempo de espera en la línea (5.41 minutos) es bastante menor al de los vuelos nacionales (9.60 - minutos), aún cuando el trámite en estos últimos sea más sencillo de realizar.

Como ya se había mencionado, el hecho de aumentar en uno el número de puntos de servicio puede producir ganancias enormes en el tiempo de espera, sin embargo, esto no es tan simple como pudiera pensarse, puesto que abrir un canal más origina tiempos de ocio muy considerables por parte de los servidores, como se explica a continuación:

Si se calcula el número medio de clientes en una jornada de ocho horas, éste número es:

$$\text{Compañías Nacionales} = \lambda \times 60 \times 8 = 1200.00$$

$$\text{Compañías Extranjeras} = \lambda \times 60 \times 8 = 1459.20$$

Para este número de llegadas harán falta, con un tiempo medio de servicio de  $1/\mu$  :

$$\frac{1200.00}{\mu} = \frac{1200.00}{1.30} = 923.08 \text{ minutos de servicio por día,}$$

$$\frac{1459.20}{\mu} = \frac{1459.20}{0.80} = 1824.0 \text{ minutos de servicio por día,}$$

lo que equivale a 15.38 y 30.40 horas respectivamente, y por lo tanto:

$$2 \text{ servidores tienen: } 2 \times 8 - 15.38 = 0.62 \text{ horas de inactividad --} \\ \text{diariamente,}$$

$$3 \text{ servidores tendrían: } 3 \times 8 - 15.38 = 8.62 \text{ horas de inactividad--} \\ \text{diariamente,}$$

y para las compañías Extranjeras:

$$4 \text{ servidores tienen: } 4 \times 8 - 30.40 = 1.60 \text{ horas de inactividad -} \\ \text{diariamente,}$$

$$5 \text{ servidores tendrían: } 5 \times 8 - 30.40 = 9.60 \text{ horas de inactividad} \\ \text{diariamente.}$$

De acuerdo a los resultados anteriores, el aumento de un filtro - en la operación de servicio reduciría efectivamente la longitud promedio de la cola, sin embargo, el tiempo de inactividad de los servidores durante una jornada de ocho horas, se incrementaría notablemente, teniendo por consecuencia que los costos de operación se incre--menten en demasía, con lo que se pone muy en duda la conveniencia de esta medida.

Es pertinente hacer notar que para vuelos de una capacidad mayor-- a la estudiada, la situación del servicio se agrava, debido princi--

palmente a la similitud de condiciones que existe en cuanto a tiempos de operación y número de empleados, con respecto a los vuelos -- que se analizaron, lo cual ocasiona un conglomerado mucho mayor de -- clientes en espera por el servicio.

#### VI.5. Capacidad y Demanda.

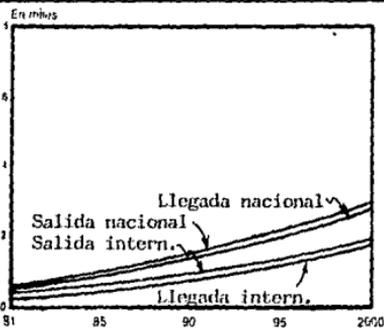
Para determinar la capacidad actual y futura con que debe operar el servicio de documentación en cuanto a número de mostradores, es -- útil observar las figuras VI.2. y VI.3.. que constan de gráficas y -- tablas de demanda de las compañías tanto Nacionales como Extranjeras y que fueron elaboradas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (15)

Si se divide al número de pasajeros por unidad de tiempo (  $\lambda$  ), -- entre el tiempo empleado en servir a un pasajero (  $\mu$  ), el resultado no debe exceder nunca al número de servidores (  $S$  ) que se encuentra atendiendo, pues de otro modo la cola tiende a crecer ilimitadamente, tal y como se especificó en el apartado VI.2.

$$\rho = \lambda / S \mu , \quad \rho < 1, \quad \text{ó bien:} \quad \lambda / \mu < S .$$

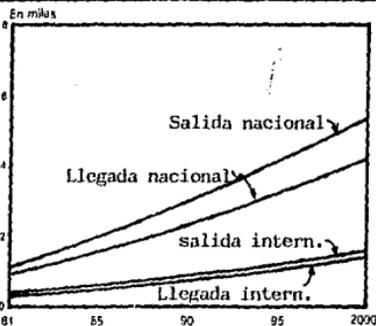
Lo anterior implica que si se divide al número de pasajeros por -- hora crítica, indicado en las tablas, entre el tiempo de servicio a -- un pasajero (  $\mu$  ), el resultado establecerá al número mínimo de -- servidores (ó estaciones de servicio) que deben operar.

**Pasajeros en hora crítica  
AMSA**



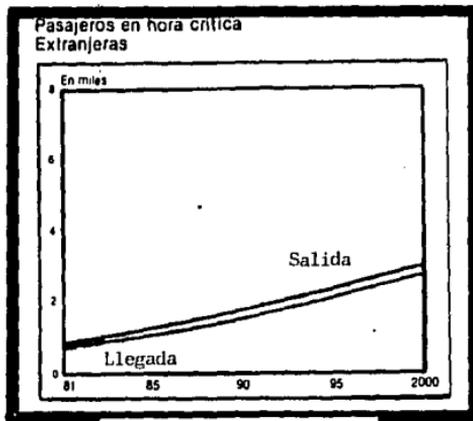
Año	Nacional		Internacional	
	Llegada	Salida	Llegada	Salida
1985	1.423	625	590	635
1990	1.420	1.400	900	947
1995	2.083	1.950	1.267	1.300
2000	2.300	2.700	1.700	1.800

**Pasajeros en hora crítica  
CMA**



Año	Nacional		Internacional	
	Llegada	Salida	Llegada	Salida
1985	1.550	1.000	485	550
1990	2.300	2.933	760	813
1995	3.117	4.050	1.067	1.117
2000	4.200	5.300	1.400	1.500

Figura VI.2. Gráfica y pronóstico de pasajeros en la hora crítica, para las dos Compañías Nacionales.



Año	Llegada	Salida
1985	1,000	1,150
1990	1,500	1,733
1995	2,017	2,317
2000	2,600	2,900

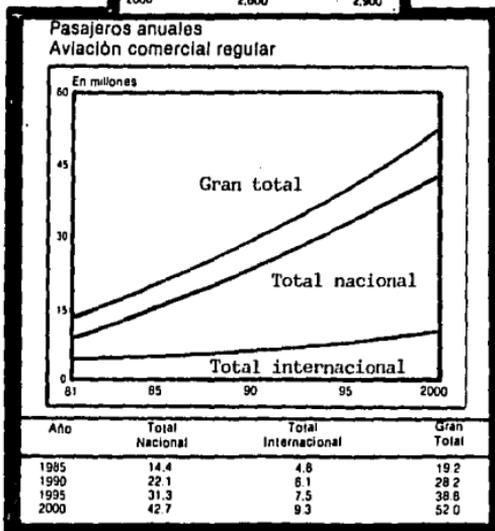


Figura VI.3. Gráfica y pronóstico de pasajeros en hora crítica para las Compañías Extranjeras y total de pasajeros anuales de la aviación Comercial regular .

Así por ejemplo, considerando el número de pasajeros de salida al interior del país, para las dos compañías Nacionales en 1985, y dividiendo este número entre el tiempo antes citado, el resultado será:

$$\frac{\lambda}{\mu} = \frac{2825 \text{ PAS/HR}}{1.30 \text{ PAS/MIN}} = \frac{47.08 \text{ PAS/MIN}}{1.30 \text{ PAS/MIN}} = 36.22 < S,$$

que significa un requerimiento de por lo menos 36.22 mostradores, para atender a la demanda de pasajeros de salida en 1985.

Procediendo en la misma forma para las compañías Extranjeras:

$$\frac{1150 \text{ PAS/HR}}{0.80 \text{ PAS/MIN}} = \frac{19.17 \text{ PAS/MIN}}{0.80 \text{ PAS/MIN}} = 23.96 < S,$$

resultado que señala un requerimiento de 24 mostradores por hora -- crítica, para atender a los pasajeros de salida de las compañías Extranjeras, en 1985.

Es conveniente aclarar que en la actualidad solo funcionan en las compañías Nacionales un total de 28 mostradores para salidas con las características anteriores, motivo por el que se originan grandes retrasos que alteran la programación de vuelos de hasta un día ó más, y con ello el correcto desenvolvimiento de otras instalaciones.

En lo referente a las compañías Extranjeras, éstas trabajan en la actualidad con aproximadamente 20 mostradores por hora crítica, y -- con esta capacidad logran satisfacer en buena manera la demanda existente.

Continuando con la misma metodología, para el año de 1990, las compañías Nacionales necesitarán de una cantidad igual a 56 controles de documentación, mientras que las compañías Extranjeras precisarán de 37 controles.

Para el año dos mil, la demanda de filtros será de 103 para las compañías Nacionales y de 61 para las Extranjeras.

Hasta aquí el estudio ha determinado la necesidad de modificar varios aspectos del nivel de servicio, así como la urgencia de establecer un número suficiente de estaciones, sin embargo, un problema más grave aún, y que afecta directamente a la documentación, requiriendo de una solución inmediata, es la falta de espacio destinado tanto a mostradores como a otras áreas de servicio que se encuentran ya saturadas.

La fecha límite, en la que se estimaba que la terminal empezaría a operar ineficientemente, era el año de 1985, pero el edificio fue ampliado en uno de sus extremos y se incrementó su capacidad; no obstante, a últimas fechas se advierte que la demanda precisa de nuevas y mayores superficies, capaces de prestar un servicio adecuado.

El edificio para pasajeros es una instalación que cuenta actualmente con  $69\ 000\ m^2$ , incluyendo en ellos  $11\ 000\ m^2$  de ampliación de reclamos y salas de espera nacionales, con los cuales es posible procesar del orden de 5 160 pasajeros de salida, siendo la demanda, según pronósticos de la propia Secretaría de Comunicaciones y Transportes, una cantidad igual a  $72\ 610\ m^2$ . (15)

La figura VI.4. muestra un cuadro objetivo que compara la magnitud actual de las instalaciones con la requerida por la demanda en años futuros. Mientras la capacidad actual de la instalación que se-

analiza resulte mayor a la requerida en el futuro, la instalación -- puede continuar prestando un servicio adecuado y en el momento en -- que es sobrepasada se establece el límite o fecha de saturación.

En el cuadro, este límite de saturación se ha marcado mediante -- una línea vertical para cada elemento en la fecha correspondiente. -- El resultado es una línea quebrada que muestra claramente el estado del aeropuerto en sus condiciones actuales.

#### VI.6. Toma de Decisiones.

La situación analizada abarcó tres determinaciones fundamentales, que son:

- A) Evaluación cuantitativa de la línea de espera,
- B) Eficiencia de los documentadores,
- C) Número de medios de servicio.

Estas tres determinaciones específicas comprenden la cuestión general del nivel de servicio apropiado que debe proporcionarse en el sistema de colas.

En general, las decisiones referentes al monto de la capacidad de servicio que debe suministrarse se basan principalmente en dos consideraciones: i) El costo en que se incurre al dar el servicio, y --- ii) La magnitud de la espera para ese servicio. Estas dos consideraciones crean presiones conflictivas sobre quien debe tomar una decisión. El objetivo de reducir los costos de servicio recomienda un nivel mínimo del mismo. Por otra parte, los largos tiempos de espera -

### MAGNITUD REQUERIDA PARA LOS ELEMENTOS PRINCIPALES

Elemento	Unidad	Capacidad actual	1982	1984	1986	1988	1990	1992	1994	1996	1998	2000
Pistas - Rodajes	oper/hora	60	74	86	101	117	134	152	170	192	217	242
Plataforma:												
Aviación comercial	ha.	34.7	33.7	41.2	48.7	57.0	65.2	73.5	81.7	92.2	103.5	114.7
Aviación general	ha.	10.0 d	9.9	10.5	11.3	12.5	13.3	14.5	15.7	16.7	17.8	18.7
carga	ha.	5.4	4.0	5.0	5.0	6.0	6.0	7.0	8.0	10.0	13.0	16.0
Edificio terminal de pasajeros												
Aviación comercial	m²	69000	52060	65760	79460	93160	107778	122382	137000	156769	176552	196321
Aviación general	m²	1350 d	1080	1250	1440	1650	1880	2110	2370	2640	2920	3220
Estacionamiento para autos												
Aviación comercial	ha.	15.2	12.5	15.8	19.1	22.4	26.0	29.5	33.0	37.8	42.5	47.3
Aviación general	m²	3100 d	4800	5625	6480	7425	8460	9495	10665	11880	13140	14490
Oficial	1800		2190	2670	3150	3690	4230	4860	5520	6210	7020	7800
Renta	m²	18000	13350	10350	19320	22640	25960	29800	33760	38080	42960	47840
Empleados	ha.	1.2	21.7	26.7	31.5	36.9	42.3	48.6	55.0	62.1	70.0	78.0
Transportación y taxis	m²	8640	14500	17800	21000	24600	28200	32400	38700	41400	46700	52000
Bodega y almacén fiscal	ha.	11.1	7.9	9.0	11.0	13.9	16.8	22.0	27.4	36.7	50.2	63.8
Bodega en el aeropuerto para manejo de carga nacional AM y MX	ha.	.68	1.3	1.9	2.7	3.7	4.7	6.7	8.7	11.8	15.8	19.8
Bodega para tramitadores de carga	ha.	1.04	1.6	1.9	2.3	2.9	3.5	4.6	5.7	7.6	10.5	13.2
Correo	m²	6300	5038	5607	6241	6946	7731	8523	9397	10360	11422	12593

Figura VI.4. Cuadro objetivo que compara la magnitud actual de las instalaciones con la magnitud requerida en años futuros.

son indeseables, lo cual recomienda un nivel alto de servicio. Por lo tanto, es necesario hacer lo posible por lograr cierto tipo de equilibrio. El problema se reduce a seleccionar el punto que dé el mejor balance entre el retraso promedio en ser servido, y el costo de proporcionar ese servicio.

Desafortunadamente, lo anterior es demasiado sencillo como para terminar un análisis y hacer un juicio rápido. En realidad es necesaria una parte decisiva. Es posible decidir inteligentemente acerca del balance apropiado entre los retrasos y costos del servicio sólo si se establece la seriedad de tales retrasos y tales costos. Por lo tanto, a fin de comparar los costos del servicio y los tiempos de espera, es necesario adoptar una medida común de importancia. La elección natural de esta medida común es el "costo" de la espera.

En la situación actual el costo de la espera es demasiado intangible como para ser manejable para los fines de la estimación; en consecuencia, la decisión deberá ser tomada por las compañías aéreas con base en criterios más tangibles, aún cuando sean menos fundamentales, tales como el tiempo esperado de permanencia que se desea ó las consecuencias de la espera para los individuos que intervienen, ó para la sociedad en general, tratándo de atribuir un valor monetario con el fin de evitar esas consecuencias.

Para concluir con el nivel de servicio, se infiere que la evaluación del aeropuerto viene a ser un promedio de los análisis realizados, en donde las compañías Nacionales se comportan de un modo similar, diferenciándose de las Extranjeras, en donde la cola y el rendimiento del documentador son bastante distintos. Al final del capítulo, se muestra un cuadro resumen con los resultados para el nivel de servicio de las diferentes compañías y para el aeropuerto de la Ciudad de México.

#### VI.7. Curso de Acción.

Con objeto de proveer una solución para la terminal de pasajeros-- dado que la capacidad límite fué sobrepasada hace ya tiempo, el presente inciso propone un curso de acción consistente en el desarrollo de un nuevo edificio y establece la configuración más adecuada a las necesidades actuales y de un futuro próximo.

La propuesta se realiza tomando en cuenta que la construcción estaría ubicada sobre terrenos del ex-Lago de Texcoco, formando parte de una expansión general del aeropuerto hacia los mismos, por lo que se acatan las recomendaciones dictadas por ASA (Aeropuertos y Servicios Auxiliares) al respecto.

Entre estas recomendaciones hay una muy importante que ha sido -- formulada con base en la práctica y que señala el no llegar a tener-- grandes edificios centralizados cuya magnitud provoca fuertes problemas operativos y soluciones difíciles en cuanto a crecimiento por -- etapas.

Ahora bien, para definir el tipo de configuración conveniente se-- deben contemplar los siguientes aspectos:

- 1) Demanda esperada de pasajeros,
- 2) División por grupos de las compañías, y
- 3) Localización de la terminal.

Las concentraciones horarias de movimiento en los períodos de mayor actividad así como la proyección de tales concentraciones son el fundamento para precisar la magnitud que se requiere. La demanda del año dos mil, correspondiente a 52 millones de pasajeros de llegada y

salida (Según el Gran Total de la figura VI.3. anterior), representa el horizonte de planeación bajo el cual ha de decidirse la capacidad a instalar.

Un factor decisivo en la estrategia consiste en efectuar un desglose de las compañías operadoras, por lo que se les integra en grupos, de forma que las dos compañías nacionales constituyan cada una un grupo y las compañías Extranjeras un tercer grupo. Obrando de este modo, se llega al año dos mil a presentar como solución para Aero México un total de tres terminales descentralizadas, para Mexicana de Aviación el mismo número y para las compañías Extranjeras se considera que con un solo módulo se puede atender a la demanda esperada.

El volumen máximo de pasajeros que podría manejar cada módulo sería de 8 millones, dependiendo del tipo de configuración del edificio terminal.

Por otra parte, las nuevas instalaciones estarían localizadas en un espacio de 2 100 m de ancho, entre una prolongación de la actual pista 5D-23I y una nueva pista al Este. Esta superficie permitiría la construcción de un área terminal capaz de manejar alrededor de 50 millones de pasajeros anuales.

Con los antecedentes mencionados, los esquemas representativos de una posible solución corresponden a las configuraciones siguientes : "Tipo Lineal, tipo Vehicular, tipo Muelle y tipo Satélite" (12), y cuyo diagrama respectivo se muestra en la figura VI.5., ilustraciones I a IV.

A continuación se presentan las características y comentarios de las configuraciones:

## I TIPO LINEAL .

- Constituida por un edificio frente al cual se estacionan directamente los aviones.
- El edificio no es necesariamente lineal, sino que incluye ciertos quiebres en forma de planta piramidal o semicircular.
- La solución podría calificarse como rígida en lo que se refiere a un crecimiento futuro por etapas, por tener que crecer simultáneamente edificio y posiciones de aviones.
- La distancia a recorrer por los pasajeros en este tipo de terminal resulta muy baja si se logra una buena ubicación de los estacionamientos de automóviles. Los flujos de los pasajeros resultan cortos, sencillos y evidentes. El equipaje, por su parte, tiene las mismas características en su proceso.
- La conexión entre terminal y aviones normalmente se hace mediante el uso de pasillos ó puentes telescópicos y el grado de mecanización interna del edificio resulta bajo.
- La terminal permite soluciones de vialidad frontal a doble nivel, en caso de ser necesario.

## II TIPO VEHICULAR .

- Edificio frente al cual se estacionan vehículos terrestres que realizan el traslado de los pasajeros del edificio al avión y viceversa.

- Con este tipo de solución, las maniobras y recorridos de los - aviones en plataforma se simplifican al máximo.
- Los servicios al pasajero se centralizan, lo que permite tener una solución de edificio más compacta. Como consecuencia, las - distancias a recorrer por los pasajeros son mínimas.
- Por lo que se refiere al flujo de pasajeros y equipaje, en este tipo de terminal resulta simplificado en alto grado.
- El esquema tiene flexibilidad para aceptar el incremento de la demanda; sin embargo, su funcionamiento depende de la operación del sistema vehicular, lo que la hace un tipo de terminal altamente mecanizada.

### III TIPO MUELLE .

- Edificio central con pasillos o dedos hacia la plataforma, frente a los cuales se estacionan las aeronaves.
- Cada módulo está constituido por un edificio central y un pasillo a plataforma, con longitud adecuada para estacionar de 6 a 8 aviones medianos.
- En general este tipo de solución tiene flexibilidad para adaptarse a crecimientos futuros por etapas y puede hacerse en forma independiente, o sea para dar capacidad al edificio ó a la - plataforma, mediante la expansión de los pasillos ó dedos.
- Las distancias a recorrer por los pasajeros en esta terminal se consideran dentro de los criterios convencionales de recorridos

aunque en ocasiones resulta necesario recurrir a bandas de ---- transporte.

- Por su parte, los flujos de pasajeros son sencillos, e igualmente los flujos de equipaje.
- La conexión de la terminal a los aviones normalmente se hace mediante puentes mecánicos.
- El grado de mecanización que requiere el edificio en estos casos no es muy elevado.
- Las maniobras de los aviones se interfieren si no se deja espacio suficiente entre los dedos o pasillos.

#### IV TIPO SATELITE .

- El edificio central tiene construcciones independientes intercomunicadas por medio de un túnel o pasillo. El estacionamiento de aviones se realiza alrededor de estas construcciones independientes.
- Esta solución se utiliza para atender a cualquier magnitud de demanda y en caso de satélites circulares, cada módulo está --- constituido por un edificio central y un satélite capaz de alojar de 8 a 10 aeronaves medianas.
- Las maniobras de los aviones en la plataforma resultan bastante sencillas y el aprovechamiento del área de la misma puede decirse que es aceptable, dependiendo del tipo de satélite.

- Las posibilidades de desarrollo por etapas, aunque no son tan amplias como en el tipo Muelle, son ventajosas.
- Las distancias a recorrer por los pasajeros resultan razonables y frecuentemente se utilizan bandas móviles para su traslado.
- En cuanto a los flujos de pasajeros y equipaje, éstos tienen un buen grado de simplicidad.
- El grado de mecanización del edificio puede considerarse ligeramente mayor en relación a los tipos Lineal y Muelle.

Para cada uno de los tipos de terminal se realizaron los esquemas más representativos, en los que se tomó en cuenta la ubicación de la nueva pista, los requisitos básicos que fundamentan la estrategia de desarrollo del aeropuerto, la demanda por servir, así como los siguientes factores:

- 1) Posibilidad de desarrollo modular de los elementos.
- 2) Forma y dimensiones de las terminales.
- 3) Facilidades para la circulación de aeronaves.
- 4) Distancias de recorrido a pie de los pasajeros.
- 5) Facilidad de organizar los servicios en plataforma.
- 6) Sencillez y evidencia del flujo de pasajeros.
- 7) Facilidad de flujo de equipaje y proceso del mismo.
- 8) Grado de mecanización interna del edificio.

Del análisis efectuado a las diferentes configuraciones, resulta-

como la más adecuada una combinación de los tipos Satélite y Lineal, con conexión al edificio central por medio de túneles y cuyo diagrama aparece al final de las ilustraciones, en la figura V.6.

El Satélite, con longitud suficiente para permitir el estacionamiento de hasta 14 aeronaves en contacto, puede manejar anualmente de 6 a 8 millones de pasajeros. Adicionalmente, este tipo de solución presenta las siguientes ventajas:

- Se adapta perfectamente a la demanda que se estima necesario atender en el futuro.
- Se adapta a los crecimientos por etapas y a los independientes en cuanto a posiciones en plataforma y al propio edificio.
- Los recorridos de los pasajeros, aunque mayores que en terminales de tipo Lineal o Vehicular, son razonablemente cortos.
- Es el tipo de terminal que presenta mayor simplicidad para los flujos de pasajeros y equipaje.
- El tipo de conexión de terminal-avión, mediante puentes telescópicos, proporciona un buen grado de servicio al pasajero.
- El grado de mecanización interna del edificio es relativamente bajo.
- Las posibilidades de solución para la vialidad frontal son amplias y sencillas, así como la ubicación de estacionamientos a corta distancia.

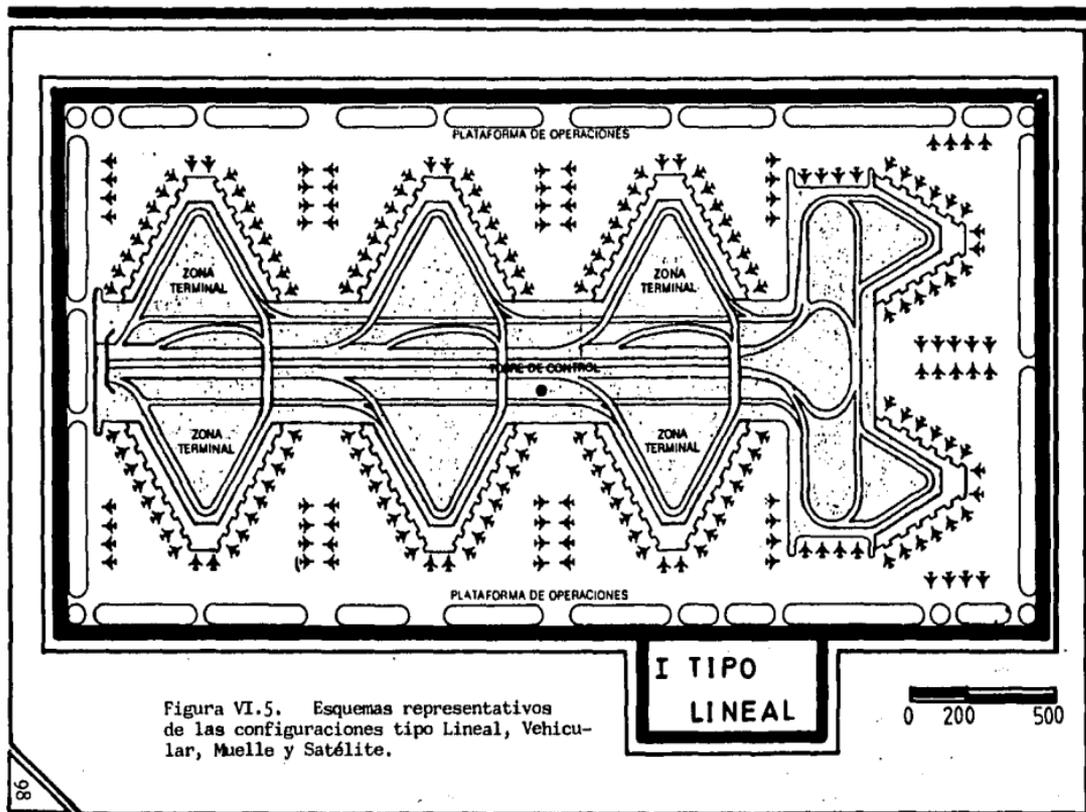
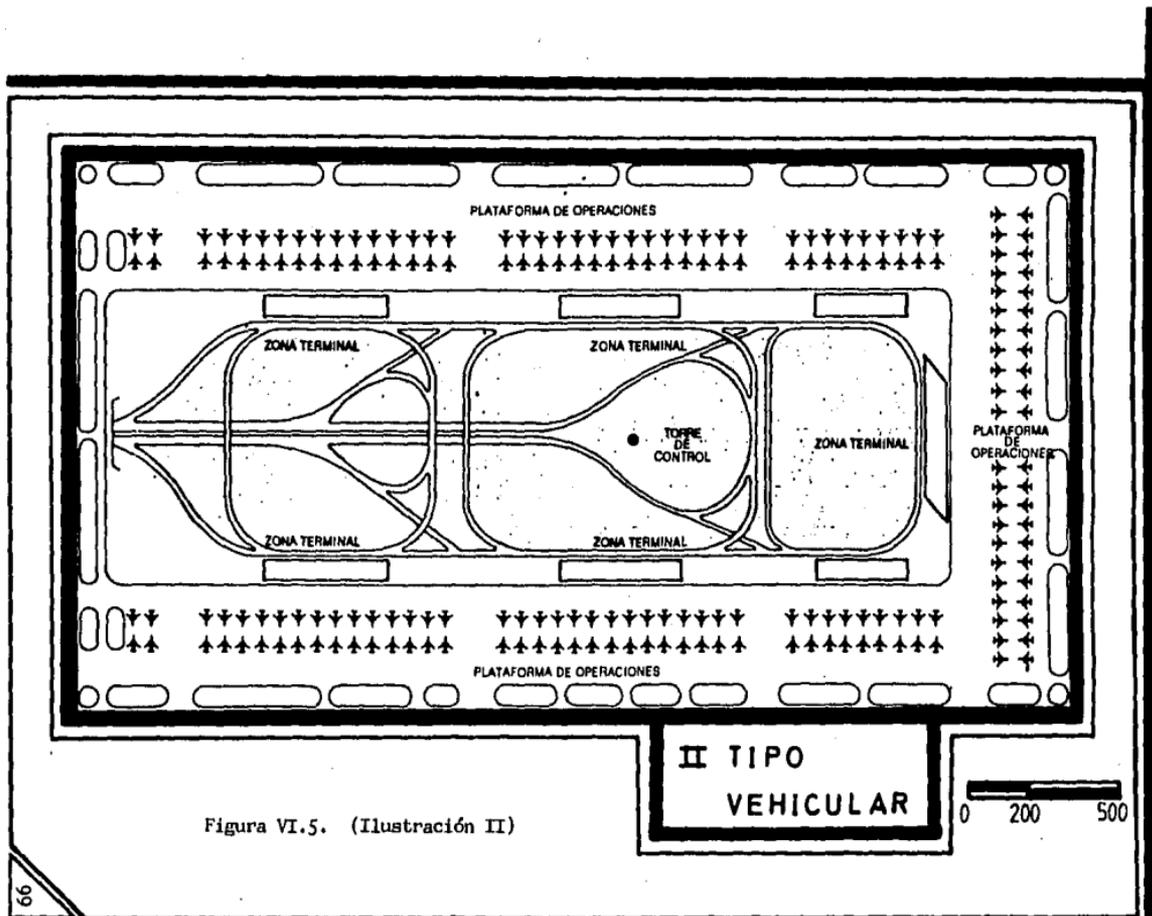


Figura VI.5. Esquemas representativos de las configuraciones tipo Lineal, Vehicular, Muelle y Satélite.

I TIPO  
LINEAL

0 200 500



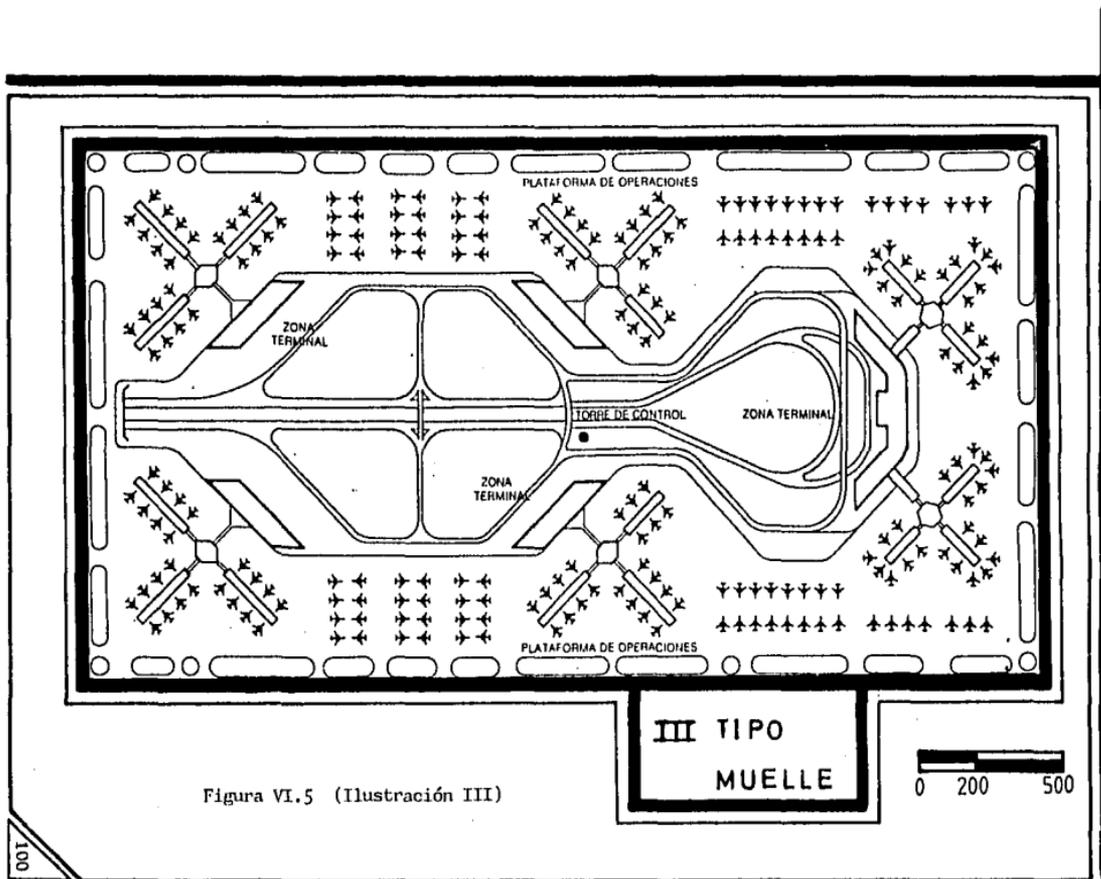


Figura VI.5 (Ilustración III)

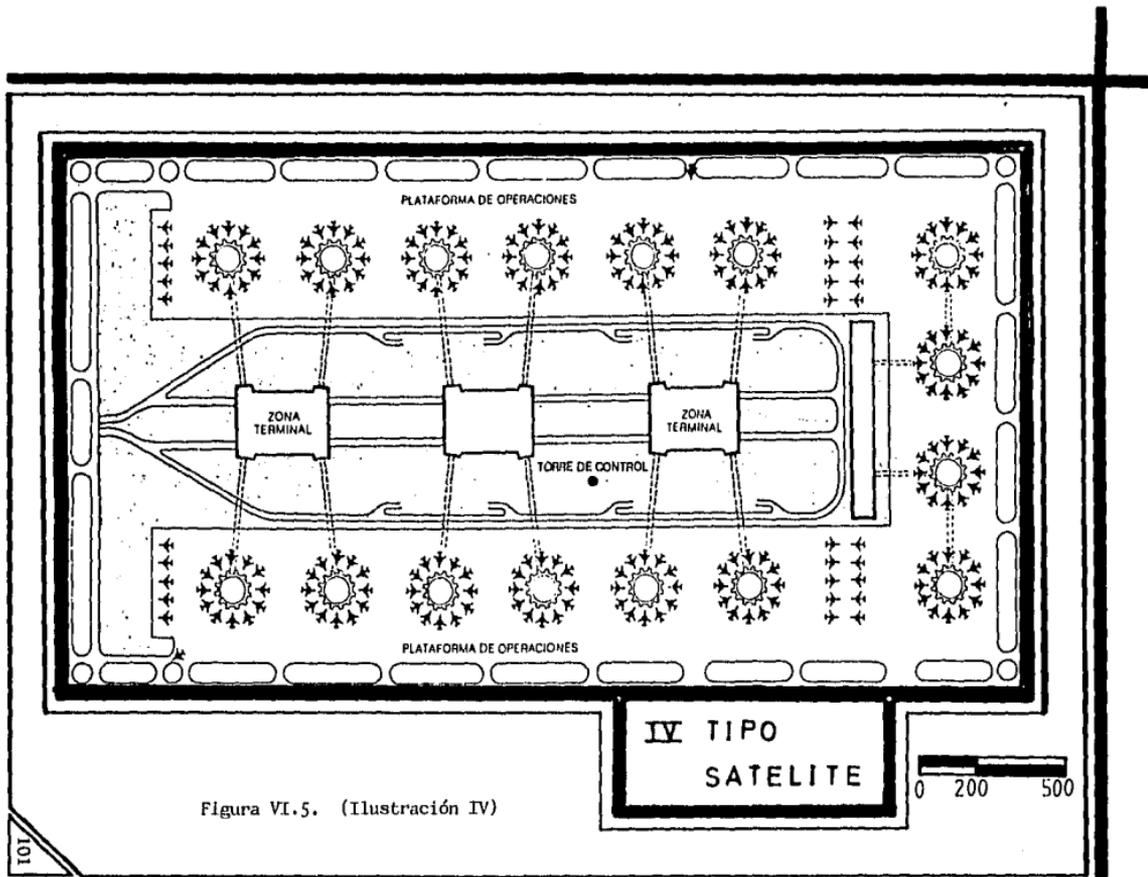
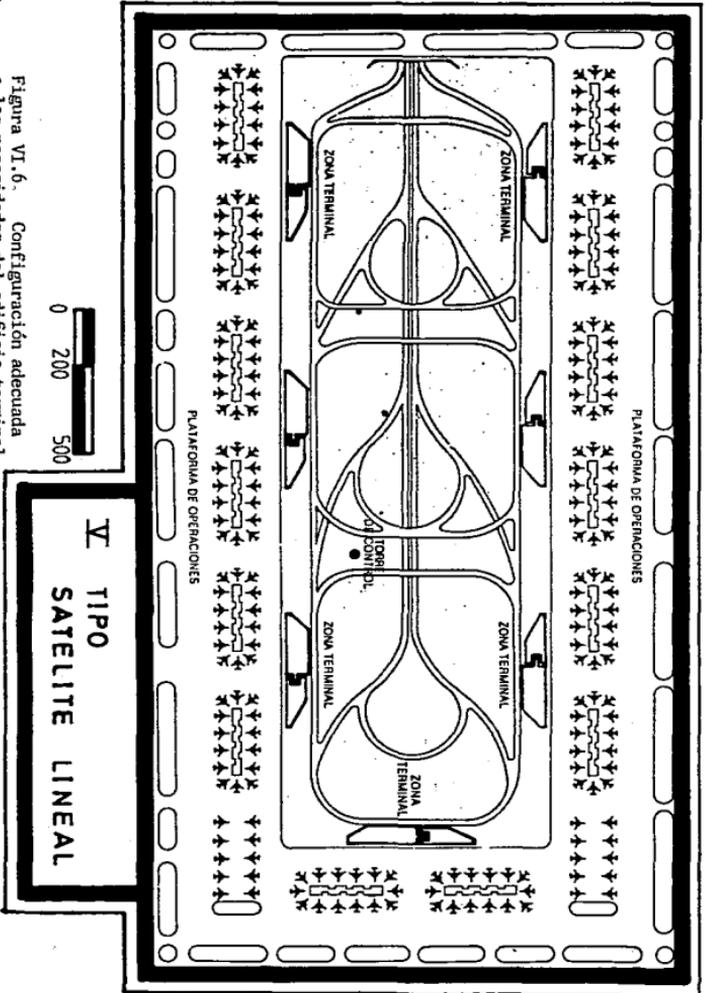


Figura VI.5. (Ilustración IV)

Figura VI.6. Configuración adecuada a las necesidades del edificio terminal.



V TIPO SATELITE LINEAL

CUADRO RESUMEN  
NIVEL DE SERVICIO EN DOCUMENTACION

PARAMETROS	COMPAÑIAS NACIONALES	COMPAÑIAS EXTRANJERAS	AEROPUERTO DE MEXICO D. F.
$\lambda$ (PAS/MIN)	2.50	3.04	2.77
$\mu$ (PAS/MIN)	1.30	0.80	1.05
$F_u$ (%)	96	95	95.50
$P_o$ (%)	2.0	0.50	1.25
L (Clientes)	24	16	20
W (Clientes)	26	20	23
$T_e$ (MIN)	9.60	5.41	7.51
$T_w$ (MIN)	10.37	6.66	8.52
$E_s$ (agentes)	0.08	0.09	0.09
$T_s$ (PAS/MIN)	1.30	0.80	1.05
TPO (MIN)	95	110	102.50
E (%)	63	89	76

Figura VI-7. Resumen del nivel de servicio en documentación para las compañías nacionales y Extranjeras y para el Aeropuerto de la Ciudad de México .

## VII. CONCLUSIONES GENERALES.

La actividad singularmente creciente que ha tenido el Aeropuerto-Internacional de la Ciudad de México, que de acuerdo a las estadísticas duplica cada seis años su movimiento de pasajeros, ha provocado que a treinta y cinco años de la iniciación de los servicios la terminal se encuentre en el límite de su desarrollo físico, ocasionando problemas graves por falta de capacidad.

Ante tal circunstancia, las autoridades del sub-sector Transporte Aéreo han establecido como solución definitiva el desarrollo de nuevas instalaciones sobre terrenos ubicados en el ex-Lago de Texcoco; sin embargo, el proyecto ha sido calculado para un período muy largo de tiempo y ha sufrido numerosas detenciones originadas fundamentalmente por el recorte presupuestario por lo que resulta indispensable proveer, tan pronto como sea posible, un sistema eficiente de servicio capaz de responder a las necesidades actuales.

En base a los capítulos expuestos, se puede señalar al edificio terminal de pasajeros como un elemento clave en la transportación aérea, cuyo adecuado funcionamiento no proporcionará demoras ni confusión a los que hagan uso del mismo.

Uno de los medios para lograr la funcionalidad apropiada radica en el nivel de servicio que se ofrece a los usuarios, el cual puede ser descrito a través de diversas medidas de rendimiento en los puntos que controlan el flujo de salida ó llegada de pasajeros, tomando en cuenta principalmente al número de personas que manejen estos puntos.

Se determinó estudiar la zona de filtros ó mostradores de revisión de boletos a los que se denominó "Mostradores de Documentación" por las características únicas que presentan y entre las que sobresalen:

- 1) Representan la entrada formal de los pasajeros al edificio terminal,
- 2) El nivel alcanzado de saturación es visiblemente claro y
- 3) Están constituidos en cuanto a número por criterios y normas internas de las compañías aéreas.

Al ser analizado el servicio se consideraron las actividades no regulares ya que los volúmenes de pasajeros, las frecuencias de arribo y los tiempos de despacho, entre otros factores, demandan una capacidad muy superior en las temporadas altas.

El procedimiento abarcó una introducción al tema de Investigación de Operaciones, dado que la TEORIA DE LINEAS DE ESPERA que sustenta a todo el estudio, se integra como parte de dicha disciplina. A continuación se instituyeron los lineamientos que rigen a los modelos de Colas para después mencionar las particularidades y problemática del aeropuerto.

Una vez efectuado lo anterior, se trazó un plan de trabajo en donde se marcaron los objetivos a seguir y se indicó la aportación de la Ingeniería Industrial, quien recomienda recursos y la forma de utilizarlos, además de otorgar un sistema de control para los mismos.

Entre las partes más relevantes se encuentra la que comprende la búsqueda y verificación de las distribuciones asociadas al arribo y al servicio de pasajeros y que deben ser, como apunta la Teoría, curvas del tipo Poisson y Exponencial Negativa, respectivamente.

Posteriormente, se llevó a cabo una evaluación cuantitativa del servicio en la que se realizaron una serie de Aforos ó levantamientos que sirvieron para el cálculo de cantidades como el total de pasajeros en vuelo, número de filtros, factor de utilización del sistema, longitud promedio de la línea de espera, tiempo de permanencia y otros más con los que se pudo reconocer la magnitud de la demanda y la capacidad proporcionada por las compañías operadoras.

Las conclusiones que se derivan del modelo pueden resumirse, en general, bajo los siguientes aspectos:

1) El número de llegadas por minuto al aeropuerto se estimó de -- 2.7 pasajeros en promedio. La saturación de los mostradores puede observarse por la magnitud del factor de utilización, que revela una intensidad de tráfico sumamente elevada.

2) Un parámetro estrechamente relacionado con el nivel de servicio es el que se conoce como "Tasa de servicio", cuyo valor promedio fue de 1.05 PAS/MIN y se encontró mediante estudios de tiempo que se levantaron durante la documentación.

3) De acuerdo a los resultados obtenidos, un aumento más bien pequeño en cuanto al número de mostradores, reduce efectivamente la longitud de la línea de espera; sin embargo, el tiempo inactivo de los servidores durante una jornada de ocho horas se incrementa notablemente poniéndose muy en duda la conveniencia de esta medida.

4) El tiempo promedio de operación de los filtros (TPO) fue de 95 minutos para las compañías nacionales y de 110 minutos para las extranjeras. La similitud entre ambos tiempos es un hecho que necesariamente se debe resaltar.

5) La cola máxima tiene lugar en el momento de apertura de filtros, es decir, cuando se empieza a atender a los pasajeros. Dicha cola va disminuyendo paulatinamente y aún cuando no desaparece, da oportunidad al documentador de tener más holgura en el servicio y origina que su rendimiento decaiga.

El rendimiento de los agentes fué apreciado con un valor del 63 % para los nacionales y 89 % para los extranjeros.

Existen dos formas para hacer que un documentador aproveche mejor su tiempo. La primera consiste en disminuir el tiempo promedio de operación de los filtros, lo cual queda a criterio de las compañías, pues las colas aumentarían considerablemente creando confusión y desorden en perjuicio de la calidad ofrecida.

La segunda opción es bajar la Tasa de servicio, lo que podría hacerse, por ejemplo, dando alguna operación adicional al servidor, ya que su rendimiento actual (por lo menos en el caso de los nacionales) lo permitiría.

6) La demanda de mostradores para vuelos de la capacidad estudiada (Boeing 727 y DC-10) asciende en 1985 a un total de 36 para las compañías nacionales y 24 para las extranjeras, habiendo en la actualidad una cifra equivalente a 28 para las nacionales y 20 para las extranjeras.

En el año de 1990, la demanda de controles será de 56 y 37 respectivamente.

7) Si bien es cierto que se distingue la necesidad de incrementar el rendimiento de los servidores así como la urgencia de contar con

un número suficiente de estaciones de servicio, un problema más grave aún y que requiere de una solución inmediata es la falta de espacio destinado tanto a mostradores como a otras áreas de servicio --- también ya saturadas.

8) Una alternativa de configuración conveniente a los requerimientos del edificio terminal corresponde a una combinación de los tipos Satélite y Lineal, con longitud suficiente para permitir el estacionamiento de 20 aeronaves en contacto y con capacidad de manejar de 6 a 8 millones de pasajeros anualmente.

9) El significado del trabajo desarrollado estriba en la posibilidad de estudiar al filtro de documentación en su contexto total, es decir, que no tiene que realizarse la toma de datos siempre en el --- mismo lugar para el mismo vuelo y a la misma hora. Estos factores --- pueden y deben variarse para obtener resultados mucho más reales. --- Por esta razón, la gama de posibilidades se extiende enormemente de acuerdo a las situaciones que uno desee manejar.

10) Una peculiaridad importante es que aún cuando la investigación sólo se dedicó a los mostradores de documentación, subsisten --- en el aeropuerto capitalino una gran cantidad de problemas que afectan a zonas tales como las pistas y calles de rodaje, las bandas --- transportadoras de equipaje ó los estacionamientos que podrían tener solución si se aplicara la TEORIA DE LINEAS DE ESPERA ó alguna otra técnica de las muchas que ofrece la Investigación de Operaciones.

Para las líneas aéreas comerciales el modelo es de mucha valía, --- pues les ayuda a definir sus políticas con respecto al servicio de --- pasajeros. Pueden tener información de operaciones clasificadas por las mañanas, tardes ó noches, información sobre uno ó más vuelos en determinada fecha, destinos por tipo de avión y muchas combinaciones más.

Es necesario enfatizar que no se pretenden resolver los problemas de las compañías operadoras, sino solamente brindar los cimientos para el análisis de los sistemas de procesamiento particulares, ya que en sí cada compañía deberá evaluar la capacidad con la que cuenta para poder lograr sus objetivos, siendo a la vez labor de éstas el determinar las ventajas que esperan obtener con el seguimiento de la metodología.

El presente estudio aspira a utilizar los recursos que ofrece la Ingeniería Industrial hacia un mejor desempeño de los servicios de documentación en el Aeropuerto de la Ciudad de México, puesto que la estructura aeroportuaria debe tener una capacidad de respuesta tan rápida como lo exige el crecimiento, a veces explosivo, del desarrollo tecnológico que avanza a gran velocidad y que ha convertido al transporte aéreo en una de las vías de comunicación más eficientes y de mayor demanda.

APENDICES

I TASA OBSERVADA  
DE ARRIBOS

TASA OBSERVADA DE ARRIBOS A DOCUMENTACION  
 COMPAÑIA NACIONAL A

INTERVALO DE TIEMPO	AFOROS									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0										
5	7	4	7	8	9	8	5	7	9	9
10	9	11	10	7	11	10	10	11	7	12
15	13	14	13	12	14	10	9	9	11	13
20	14	12	13	12	13	13	11	12	14	16
25	16	15	19	14	14	15	13	15	17	15
30	12	16	15	15	17	16	18	13	14	11
35	13	12	13	15	10	12	13	13	12	11
40	10	11	12	11	11	9	14	12	10	10
45	11	9	9	10	10	12	11	10	12	11
50	10	8	10	11	12	9	12	11	8	8
55	11	11	8	10	9	11	10	10	10	10
60	7	10	9	8	8	8	7	9	9	11
65	9	9	8	6	7	10	8	8	9	7
70	6	7	5	9	4	5	8	8	8	5
75	7	6	4	7	6	7	6	7	5	6

TASA OBSERVADA DE ARRIBOS A DOCUMENTACION  
 COMPAÑIA EXTRANJERA # 1

INTERVALO  
 DE TIEMPO

AFOROS

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	7	8	5	10	7	6	7	9	6	8
8	9	12	11	9	10	5	14	12	12	7
12	13	14	12	15	14	14	15	16	9	13
16	15	16	14	16	17	16	15	16	13	17
20	17	18	15	17	17	19	13	17	15	18
24	19	17	19	18	22	20	17	21	18	20
28	16	15	21	19	14	15	18	17	20	16
32	15	16	16	15	16	18	18	14	17	15
36	16	15	17	15	15	16	14	14	16	17
40	14	15	15	12	13	14	16	13	14	14
44	15	14	12	15	15	13	13	14	15	12
48	14	13	15	13	14	14	13	12	14	14
52	12	12	13	14	14	13	14	13	13	12
56	13	13	11	12	13	14	11	11	12	13
60	12	13	11	10	11	12	9	10	11	12
64	12	12	13	12	12	13	12	10	11	13
68	13	11	12	10	11	10	12	11	14	11
72	12	11	10	12	9	11	13	12	11	12
76	10	12	11	13	10	12	11	11	12	10
80	11	12	9	11	13	11	11	9	12	10
84	10	10	10	7	9	8	10	11	10	9
88	11	8	10	9	7	10	8	12	10	12
92	9	7	8	10	8	10	9	10	9	10
96	8	7	9	7	8	9	8	8	6	7
100	6	4	7	6	9	4	6	7	9	6
104	6	10	8	8	7	8	8	5	6	7

II ANALISIS DE  
ARRIBO

ANALISIS DE ARRIPO A DOCUMENTACION

COMPANIA NACIONAL A

NO. ARRI- BOS (X)	FRECUEN- CIA OBSER- VADA (N <sub>x</sub> )	XN <sub>x</sub>	p(x) λ = 10	Np(x)	$\frac{[N_x - Np(x)]^2}{Np(x)}$
0	0	0	0.000	0	
1	0	0	0.000	0	
2	0	0	0.002	0	
3	0	0	0.008	1	} 10 0.40
4	3	12	0.019	3	
5	5	25	0.038	6	
6	6	36	0.063	10	1.60
7	14	98	0.090	13	0.08
8	15	120	0.113	17	0.24
9	18	162	0.125	19	0.05
10	20	200	0.125	19	0.05
11	19	209	0.114	17	0.24
12	15	180	0.095	14	0.07
13	12	156	0.073	11	0.09
14	8	112	0.052	8	0.00
15	7	105	0.035	5	0.80
16	4	64	0.022	3	
17	2	34	0.013	2	} 7 0.14
18	1	18	0.007	1	
19	1	19	0.004	1	
20	0	0	0.002	0	
	150	1550	1.000	150	3.76

$$\lambda = \frac{\sum XN_x}{\sum N_x} = \frac{1550}{150} = 10.33 \text{ Unidades} = 2.07 \text{ PAS/MIN}$$

$$v = 12 - 1 - 1 = 10 ,$$

$$\chi^2_{0.05} = 3.94 > 3.76 , \text{ los datos son satisfactorios.}$$

ANALISIS DE ARRIBO A DOCUMENTACION

COMPANIA EXTRANJERA # 1

NO. ARRI- BOS (X)	FRECUE- CIA OBSER- VADA ( $N_x$ )	$XN_x$	$p(x)$ $\lambda = 12$	$Np(x)$	$\frac{[N_x - Np(x)]^2}{Np(x)}$	
0	0	0	0.000	0	} 5 0.00	
1	0	0	0.000	0		
2	0	0	0.000	0		
3	0	0	0.002	1		
4	2	8	0.005	1		
5	3	15	0.013	3	} 10 0.00	
6	9	54	0.025	6		1.50
7	14	98	0.044	11		0.82
8	15	120	0.066	17		0.24
9	18	162	0.087	23		1.09
10	25	250	0.105	27		0.15
11	24	264	0.114	30		1.20
12	34	408	0.114	30		0.53
13	27	351	0.106	28		0.04
14	25	350	0.090	23		0.17
15	20	300	0.072	19	0.05	
16	15	240	0.054	14	0.07	
17	12	204	0.038	10	0.40	
18	7	126	0.026	7	0.00	
19	4	76	0.016	4	} 10 0.00	
20	3	60	0.010	3		
21	2	42	0.006	2		
22	1	22	0.003	1		
23	0	0	0.002	0		
	<u>260</u>	<u>3150</u>	<u>0.998</u>	<u>260</u>	<u>6.26</u>	

$$\lambda = \frac{\sum XN_x}{\sum N_x} = \frac{3150}{260} = 12.12 \text{ Unidades} = 3.03 \text{ PAS/MIN.}$$

$$v = 15 - 1 - 1 = 13 ,$$

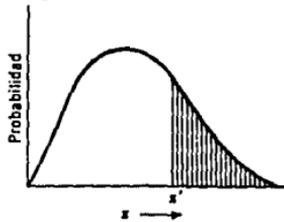
$\chi^2_{0.10} = 7.04 > 6.26$  , los datos son satisfactorios.

I.II    PROBABILIDADES  
DE POISSON

APÉNDICES

TABLA V. Distribución acumulativa de Poisson para valores escogidos de la media,  $m$ \*

$$\sum_{x=x'}^{x=m} \frac{e^{-m} m^x}{x!}$$



Area sombreada =  $P(x \geq x')$

$x$	$m = .001$	$m = .005$	$m = .010$	$m = .05$	$m = .10$
0	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000
1	.0009995	.0049875	.0099502	.0487706	.0951626
2	.0000005	.0000125	.0000497	.0012091	.0046788
3			.0000002	.0000201	.0001547
4				.0000003	.0000038
$x$	$m = .5$	$m = 1.0$	$m = 1.5$	$m = 2.0$	$m = 2.5$
0	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
1	.393469	.632121	.776870	.864665	.917915
2	.090204	.264241	.442175	.593994	.712703
3	.014388	.080301	.191153	.323324	.456187
4	.001752	.018988	.065642	.142877	.242424
5	.000172	.003660	.018576	.052653	.108822
6	.000014	.000594	.004456	.016564	.042021
7	.000001	.000083	.000926	.004534	.014187
8		.000010	.000170	.001097	.004247
9		.000001	.000028	.000237	.001140
10			.000004	.000046	.000277
11			.000001	.000008	.000062
12				.000001	.000013
13					.000002

\* Tabla de E. C. Molina, Poisson's Exponential Binomial Limit, D. Van Nostrand, Inc., Nueva York, 1942, con el permiso de los Bell Laboratories.

TABLAS

TABLA V. (Continuación)

$x$	$m = 3.0$	$m = 3.5$	$m = 4.0$	$m = 4.5$	$m = 5.0$
0	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
1	.950213	.969803	.981684	.988891	.993262
2	.800852	.864112	.908422	.938901	.959572
3	.576810	.679153	.761897	.826423	.875348
4	.352768	.463367	.566530	.657704	.734974
5	.184737	.274555	.371163	.467896	.559507
6	.083918	.142386	.214870	.297070	.384039
7	.033509	.065288	.110674	.168949	.237817
8	.011905	.026739	.051134	.086588	.133372
9	.003803	.009874	.021363	.040257	.068094
10	.001102	.003315	.008132	.017093	.031828
11	.000292	.001019	.002840	.006609	.013695
12	.000071	.000289	.000915	.002404	.005453
13	.000016	.000076	.000274	.000805	.002019
14	.000003	.000019	.000076	.000252	.000698
15	.000001	.000004	.000020	.000074	.000226
16		.000001	.000005	.000020	.000069
17			.000001	.000005	.000020
18				.000001	.000005
19					.000001
$x$	$m = 5.5$	$m = 6.0$	$m = 6.5$	$m = 7.0$	$m = 7.5$
0	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
1	.995913	.997521	.998497	.999088	.999447
2	.973436	.982649	.988724	.992705	.995299
3	.911624	.938031	.956964	.970364	.979743
4	.798301	.848796	.888150	.918235	.940855
5	.642482	.714943	.776328	.827008	.867938
6	.471081	.554320	.630959	.699292	.758564
7	.313964	.393697	.473476	.550289	.621845
8	.190515	.250020	.327242	.401286	.475361
9	.105643	.152763	.208427	.270909	.338033
10	.053777	.083924	.122616	.169504	.223592
11	.025251	.042621	.066839	.098521	.137762
12	.010988	.020092	.033880	.053350	.079241
13	.004451	.008827	.016027	.027000	.042666
14	.001685	.003628	.007100	.012811	.021565

APÉNDICES

TABLA V. (Continuación)

$x$	$m = 5.5$	$m = 6.0$	$m = 6.5$	$m = 7.0$	$m = 7.5$
15	.000599	.001400	.002956	.005717	.010260
16	.000200	.000509	.001160	.002407	.004608
17	.000063	.000175	.000430	.000958	.001959
18	.000019	.000057	.000151	.000362	.000790
19	.000005	.000018	.000051	.000130	.000303
20	.000001	.000005	.000016	.000044	.000111
21		.000001	.000005	.000014	.000039
22			.000001	.000005	.000013
23				.000001	.000004
24					.000001
$x$	$m = 8.0$	$m = 9.0$	$m = 10.0$	$m = 11.0$	$m = 12.0$
0	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
1	.999665	.999877	.999955	.999983	.999994
2	.996981	.998766	.999501	.999800	.999920
3	.986246	.993768	.997231	.998789	.999478
4	.957620	.978774	.989664	.995084	.997708
5	.900368	.945036	.970747	.984895	.992400
6	.808764	.884309	.932914	.962480	.979659
7	.686626	.793819	.869859	.921386	.954178
8	.547039	.676103	.779779	.856808	.910496
9	.407453	.544347	.667180	.768015	.844972
10	.283376	.412592	.542070	.659489	.757608
11	.184114	.294012	.416960	.540111	.652771
12	.111924	.196992	.303224	.420733	.538403
13	.063797	.124227	.208444	.311303	.424035
14	.034181	.073851	.135536	.218709	.318464
15	.017257	.041466	.083458	.145956	.227975
16	.008231	.022036	.048740	.092604	.155584
17	.003718	.011106	.027042	.055924	.101291
18	.001594	.005320	.014278	.032191	.062966
19	.000650	.002426	.007187	.017687	.037417
20	.000253	.001056	.003454	.009289	.021280
21	.000094	.000439	.001588	.004671	.011598
22	.000033	.000175	.000700	.002252	.006065
23	.000011	.000067	.000296	.001042	.003047
24	.000004	.000025	.000120	.000464	.001473

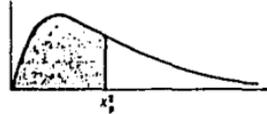
IV DISTRIBUCION

DE  $\chi^2$

APENDICES

**Apéndice IV**

**PERCENTILES ( $\chi^2$ )  
DE LA  
DISTRIBUCION CHI-CUADRADO  
CON  $v$  GRADOS DE LIBERTAD  
(AREA SOMBRADA =  $p$ )**



$v$	$\chi^2_{0.995}$	$\chi^2_{0.99}$	$\chi^2_{0.975}$	$\chi^2_{0.95}$	$\chi^2_{0.90}$	$\chi^2_{0.85}$	$\chi^2_{0.80}$	$\chi^2_{0.75}$	$\chi^2_{0.70}$	$\chi^2_{0.65}$	$\chi^2_{0.60}$	$\chi^2_{0.55}$	$\chi^2_{0.50}$	$\chi^2_{0.45}$	$\chi^2_{0.40}$	$\chi^2_{0.35}$	$\chi^2_{0.30}$	$\chi^2_{0.25}$	$\chi^2_{0.20}$	$\chi^2_{0.15}$	$\chi^2_{0.10}$	$\chi^2_{0.05}$	$\chi^2_{0.025}$	$\chi^2_{0.01}$	$\chi^2_{0.005}$	
1	7.88	6.63	5.02	3.84	2.71	1.32	0.455	0.102	0.0158	0.0039	0.0010	0.0002	0.0000													
2	10.6	9.21	7.38	5.99	4.61	2.77	1.39	0.575	0.211	0.103	0.0506	0.0201	0.0100													
3	12.8	11.3	9.35	7.81	6.25	4.11	2.37	1.21	0.584	0.352	0.216	0.115	0.072													
4	14.9	13.3	11.1	9.49	7.78	5.39	3.36	1.92	1.06	0.711	0.484	0.297	0.207													
5	16.7	15.1	12.8	11.1	9.24	6.63	4.35	2.67	1.61	1.15	0.831	0.554	0.412													
6	18.5	16.8	14.4	12.6	10.6	7.84	5.35	3.45	2.20	1.64	1.24	0.872	0.676													
7	20.3	18.5	16.0	14.1	12.0	9.04	6.35	4.25	2.83	2.17	1.69	1.24	0.989													
8	22.0	20.1	17.5	15.5	13.4	10.2	7.34	5.07	3.49	2.73	2.18	1.65	1.34													
9	23.6	21.7	19.0	16.9	14.7	11.4	8.34	5.90	4.17	3.33	2.70	2.09	1.73													
10	25.2	23.2	20.5	18.3	16.0	12.5	9.34	6.74	4.87	3.94	3.25	2.56	2.16													
11	26.8	24.7	21.9	19.7	17.3	13.7	10.3	7.58	5.58	4.57	3.82	3.05	2.60													
12	28.3	26.2	23.3	21.0	18.5	14.8	11.3	8.44	6.30	5.23	4.40	3.57	3.07													
13	29.8	27.7	24.7	22.4	19.8	16.0	12.3	9.30	7.04	5.89	5.01	4.11	3.57													
14	31.3	29.1	26.1	23.7	21.1	17.1	13.3	10.2	7.79	6.57	5.63	4.66	4.07													
15	32.8	30.6	27.5	25.0	22.3	18.2	14.3	11.0	8.55	7.26	6.26	5.23	4.60													
16	34.3	32.0	28.8	26.3	23.5	19.4	15.3	11.9	9.31	7.96	6.91	5.81	5.14													
17	35.7	33.4	30.2	27.6	24.8	20.5	16.3	12.8	10.1	8.67	7.56	6.41	5.70													
18	37.2	34.8	31.5	28.9	26.0	21.6	17.3	13.7	10.9	9.39	8.23	7.01	6.26													
19	38.6	36.2	32.9	30.1	27.2	22.7	18.3	14.6	11.7	10.1	8.91	7.63	6.84													
20	40.0	37.6	34.2	31.4	28.4	23.8	19.3	15.5	12.4	10.9	9.59	8.26	7.43													
21	41.4	38.9	35.5	32.7	29.6	24.9	20.3	16.3	13.2	11.6	10.3	8.90	8.03													
22	42.8	40.3	36.8	33.9	30.8	26.0	21.3	17.2	14.0	12.3	11.0	9.54	8.64													
23	44.2	41.6	38.1	35.2	32.0	27.1	22.3	18.1	14.8	13.1	11.7	10.2	9.26													
24	45.6	43.0	39.4	36.4	33.2	28.2	23.3	19.0	15.7	13.8	12.4	10.9	9.89													
25	46.9	44.3	40.6	37.7	34.4	29.3	24.3	19.9	16.5	14.6	13.1	11.5	10.5													
26	48.3	45.6	41.9	38.9	35.6	30.4	25.3	20.8	17.3	15.4	13.8	12.2	11.2													
27	49.6	47.0	43.2	40.1	36.7	31.5	26.3	21.7	18.1	16.2	14.6	12.9	11.8													
28	51.0	48.3	44.5	41.3	37.9	32.6	27.3	22.7	18.9	16.9	15.3	13.6	12.5													
29	52.3	49.6	45.7	42.6	39.1	33.7	28.3	23.6	19.8	17.7	16.0	14.3	13.1													
30	53.7	50.9	47.0	43.8	40.3	34.8	29.3	24.5	20.6	18.5	16.8	15.0	13.8													
40	66.8	63.7	59.3	55.8	51.8	45.6	39.3	33.7	29.1	26.5	24.4	22.2	20.7													
50	79.5	76.2	71.4	67.5	63.2	56.3	49.3	42.9	37.7	34.8	32.4	29.7	28.0													
60	92.0	88.4	83.3	79.1	74.4	67.0	59.3	52.3	46.5	43.2	40.5	37.5	35.5													
70	104.2	100.4	95.0	90.5	85.5	77.6	69.3	61.7	55.3	51.7	48.8	45.4	43.3													
80	166.3	162.3	156.6	151.9	146.6	138.1	129.3	121.1	112.9	106.4	101.2	96.2	91.2													
90	128.3	124.1	118.1	113.1	107.6	98.6	89.3	80.6	73.3	69.1	65.6	61.8	59.2													
100	140.2	135.8	129.6	124.3	118.5	109.1	99.3	90.1	82.4	77.9	74.2	70.1	67.3													

Precedencia: Catherine M. Thompson, *Table of percentage points of the  $\chi^2$  distribution*, *Biometrika*, Vol. 32 (1941), con permiso de los autores y editores.

V ANALISIS AL  
SERVICIO

ANALISIS AL SERVICIO OFRECIDO EN DOCUMENTACION

COMPANIA NACIONAL A

TIEMPO DE SERVICIO (Seg)	MARCA DE CLASE	FRECUENCIA OBSERVADA	FRECUENCIA ESPERADA	$\chi^2$
00 - 55	27.5	990	979.79	0.11
55 - 110	82.5	350	360.44	0.30
110 - 165	137.5	125	132.60	0.44
165 - 220	192.5	60	48.78	2.58
220 - 275	247.5	15	17.95	0.48
275 - 330	302.5	10	6.60	
330 - 385	357.5	0	2.43	9.92
385 - 440	412.5	0	0.89	
		<u>1550</u>	<u>1549.48</u>	<u>3.91</u>

$v = 6 - 1 = 5$ ,  $\chi^2_{0.50} = 4.35 > 3.91$ , los datos son satisfactorios.

COMPANIA EXTRANJERA # 1

TIEMPO DE SERVICIO (Seg)	MARCA DE CLASE	FRECUENCIA OBSERVADA	FRECUENCIA ESPERADA	$\chi^2$
00 - 72	36	1995	1991.18	0.01
72 - 144	108	740	732.51	0.08
144 - 216	180	275	269.48	0.11
216 - 288	252	95	99.14	0.17
288 - 360	324	30	36.47	1.15
360 - 432	396	10	13.41	1.16
432 - 504	468	5	4.94	
504 - 576	540	0	1.81	6.75
		<u>3150</u>	<u>3148.94</u>	<u>0.45</u>
				<u>3.13</u>

$v = 7 - 1 = 6$ ,  $\chi^2_{0.25} = 3.45 > 3.13$ , los datos son satisfactorios.

VI DEDUCCION DE  
FORMULAS

DEDUCCION DE LAS FORMULAS QUE UTILIZA EL MODELO.

Considérese un gran número  $N$  de sistemas de Líneas de Espera, en los que se encuentran presentes  $n$  personas (esperando ó siendo atendidas). Las llegadas son tipo Poisson, a una tasa  $\lambda_n$ , y los tiempos de servicio Exponenciales, con una capacidad de  $\mu_n$  servicios - por unidad de tiempo.

Sea  $P_n$  la probabilidad de estado Estable, (explicado en el inciso F del apartado II.2.2., del Capítulo II), de que haya  $n$  personas presentes. Luego, en cualquier instante, el número de sistemas en conjunto con las  $n$  personas presentes es  $P_n N$ . Debido a que el estado es Estable, este número no cambiará con el tiempo. Sin embargo, los sistemas con  $n$  personas no necesitan ser los mismos que tengan a esas  $n$  personas en otro momento del tiempo.

Las llegadas ocurren a una tasa  $\lambda_n$ , y una de ellas transformará el sistema con  $n$  personas en otro con  $(n + 1)$ . De modo semejante, la terminación de los servicios ocurre a una tasa  $\mu_n$ , y una terminación convierte a un sistema  $n$  en uno  $(n - 1)$ . Por lo tanto, la tasa a la cual los sistemas  $n$  se vuelven sistemas  $(n + 1)$ , es  $\lambda_n P_n N$ , y la tasa a la cual se vuelven sistemas  $(n - 1)$ , es  $\mu_n P_n N$ . Combinándolas, se obtiene la tasa:

$$\lambda_n P_n N + \mu_n P_n N = (\lambda_n + \mu_n) P_n N$$

Esta tasa se debe balancear con aquella a la cual otros sistemas (no n), se vuelvan sistemas n. Así:

$$\lambda_{n-1} P_{n-1} N + \mu_{n+1} P_{n+1} N = (\lambda_n + \mu_n) P_n N,$$

que es igual con:

$$\lambda_{n-1} P_{n-1} + \mu_{n+1} P_{n+1} = (\lambda_n + \mu_n) P_n \quad \dots(I)$$

En esta ecuación, cuando  $n = 0$ ,  $P_{n-1}$  no tiene significado, además de que  $\mu_0 = 0$ , por lo que, para  $n = 0$ , se debe escribir:

$$\mu_{n+1} P_{n+1} = \lambda_n P_n, \text{ entonces:}$$

$$\mu_1 P_1 = \lambda_0 P_0, \text{ ó bien: } \lambda_0 P_0 - \mu_1 P_1 = 0 \quad \dots(II)$$

es decir: 
$$P_1 = \frac{\lambda_0}{\mu_1} P_0 \quad \dots(III)$$

En el caso de  $n = 1$ , la igualdad (I) queda:

$$\lambda_0 P_0 + \mu_2 P_2 = \lambda_1 P_1 + \mu_1 P_1, \text{ ó bien:}$$

$$\lambda_1 P_1 - \mu_2 P_2 = \lambda_0 P_0 + \mu_1 P_1,$$

y utilizando la ecuación (II):

$$\lambda_1 P_1 - \mu_2 P_2 = 0, \text{ es decir:}$$

$$P_2 = \frac{\lambda_1}{\mu_2} P_1.$$

Sustituyendo el valor de  $P_1$  dado en (III) se tiene:

$$P_2 = \frac{\lambda_0 \lambda_1}{\mu_1 \mu_2} P_0$$

Y continuando con el mismo procedimiento, si se observan las formas encontradas para  $P_2$ , se pueden obtener los demás valores de  $P_n$  de la siguiente manera:

$$P_n = \frac{\lambda_0 \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1}}{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_n} P_0 \quad \dots(\text{IV})$$

y

$$P_{n+1} = \frac{\lambda_n}{\mu_{n+1}} P_n \quad \dots(\text{V})$$

Por otra parte, si  $x$  es una variable aleatoria, con una función de densidad de probabilidad,  $P(x)$  puede expresarse del siguiente modo:

$$\sum P(x) = 1$$

Lo cual está de acuerdo con el concepto fundamental de que la suma de todas las probabilidades, es igual a 1. De esta propiedad, se sigue que:

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + \dots = 1 \quad \dots(\text{VI})$$

Ahora bien, cuando un proceso de colas contiene a un cierto número  $S$  de estaciones de servicio, y el número de clientes presentes --  $(n)$ , es menor que el número de estaciones  $S$ , es decir, cuando  $n \leq S$ ,

habrá  $n$  estaciones ocupadas y el servicio será a una tasa  $n\mu$ . ----  
 Cuando  $n > S$ , todas las  $S$  estaciones están ocupadas y el servicio es  
 a una tasa  $S\mu$ . Por lo tanto:

$$\lambda_n = \lambda \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

$$\mu_n = \begin{cases} n\mu & n = 0, 1, 2, \dots, S \\ S\mu & n = S+1, S+2, \dots \end{cases}$$

Si  $\rho = (\lambda/\mu) < S$ , se pueden sustituir los valores anteriores -  
 en la ecuación (IV), para determinar los valores de  $P_n$ :

$$P_n = \frac{\lambda^n}{\mu \times 2\mu \times 3\mu \times \dots \times n\mu} P_0 =$$

$$= \frac{\lambda^n}{n! \mu^n} P_0 = \boxed{\frac{\rho^n}{n!} P_0, \quad n = 0, 1, 2, \dots, S}$$

... (VII)

$$y, \quad P_n = \frac{\lambda^n}{\mu \times 2\mu \times \dots \times S\mu \times \mu^{n-S}} P_0 =$$

$$= \frac{\rho^n}{\mu^n S! S^{n-S}} P_0 = \frac{\rho^n}{S! S^{n-S}} P_0 = \frac{\rho^S}{S!} \left(\frac{\rho}{S}\right)^{n-S} P_0 ,$$

para  $n = S+1, S+2, \dots$  ... (VIII)

Sustituyendo estos dos valores de  $P_n$  dados, la ecuación (VI) se transforma en:

$$P_0 + \rho P_0 + \frac{\rho^2}{2!} P_0 + \dots + \frac{\rho^{S-1}}{(S-1)!} P_0 +$$

$$+ \frac{\rho^S}{S!} P_0 + \frac{\rho^{S+1}}{S S!} P_0 + \frac{\rho^{S+2}}{S! S^2} P_0 + \dots = 1 .$$

... (IX)

y los términos en la parte inferior se pueden escribir:

$$\frac{\rho^S}{S!} P_0 \left[ 1 + \frac{\rho}{S} + \left(\frac{\rho}{S}\right)^2 + \left(\frac{\rho}{S}\right)^3 + \dots \right]$$

La suma de la serie adentro del corchete es igual a  $1/[1-(\rho/S)]$  con lo cual se obtiene:

$$\frac{\rho^S}{S!} P_0 \left[ \frac{1}{1 - (\rho/S)} \right] ,$$

por lo que la ecuación (IX) queda:

$$P_0 \left[ \sum_{n=0}^{S-1} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^S}{S!} \sum_{n=S}^{\infty} \left( \frac{\rho}{S} \right)^{n-S} \right] = 1$$

ó bien:

$$P_0 = 1 / \left[ \sum_{n=0}^{S-1} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^S}{S!} \sum_{n=S}^{\infty} \left( \frac{\rho}{S} \right)^{n-S} \right],$$

y reescribiendo:

$$P_0 = \left[ \sum_{n=0}^{S-1} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^S}{S!} \left( \frac{1}{1 - (\rho/S)} \right) \right]^{-1}$$

... (X)

La longitud promedio "L", de la línea de espera, está definida en base al número total de clientes en el sistema, menos los que se encuentran recibiendo servicio, por la probabilidad de tener n clientes. Así:

$$L = \sum_{n=S+1}^{\infty} (n - S) P_n,$$

en donde el valor de  $P_n$  corresponde al de la fórmula (VIII).

De este modo, partiendo desde  $n = S + 1$ , se tiene que:

$$P_n + 2P_n + 3P_n + \dots = \frac{\rho^S}{S!} P_0 \left[ \frac{\rho}{S} + 2 \left( \frac{\rho}{S} \right)^2 + 3 \left( \frac{\rho}{S} \right)^3 + \dots \right]$$

siendo la Suma de la serie:  $\frac{\rho/S}{(1 - \rho/S)^2}$ , es decir:

$$\text{Suma} = \frac{\lambda / \mu S}{(1 - \lambda / \mu S)^2} = \frac{\lambda \mu S}{(\mu S - \lambda)^2},$$

luego,

$$L = \frac{\rho^S}{S!} P_0 \left[ \frac{\lambda \mu S}{(\mu S - \lambda)^2} \right] = \frac{\lambda \mu \rho^S}{(S - 1)! (\mu S - \lambda)^2} P_0$$

... (XI)

La fórmula para el número promedio de clientes, en el sistema "M", (tanto formados como recibiendo servicio), es:

$$W = L + (\lambda / \mu),$$

...(XII)

que es una ecuación igual a la anterior, excepto por la adición del término:  $\lambda / \mu$  , lo que representa a una llegada que recibe servicio.

El promedio de tiempo de espera en la cola,  $T_e$ , se define como sigue:

$$T_e = L / \lambda , \quad \dots \text{ (XIII)}$$

mientras que el tiempo de espera en el sistema,  $T_w$ , es:

$$T_w = T_e + (1 / \mu) , \quad \dots \text{ (XIV)}$$

igual a la ecuación de  $T_e$  más  $1 / \mu$  , lo que representa el promedio del tiempo de servicio. El promedio del tiempo de espera de una llegada más el promedio del tiempo de servicio, es igual al promedio del tiempo que una llegada pasa en el sistema.

Para una mayor referencia en la deducción de las fórmulas, consúlten se (16) y (17).

### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) Thierauf & Grosse, "Toma de decisiones por medio de la INVESTIGACION DE OPERACIONES", Limusa S. A., 1972.
- (2) Hanly A. Taha, "INVESTIGACION DE OPERACIONES una introducción", Representaciones y Servicios de Ingeniería S. A., 1981.
- (3) Humberto J. Benet, "PRINCIPIOS DE INVESTIGACION DE OPERACIONES", Herrero Hermanos, 1974.
- (4) Hillier/Lieberman, "INTRODUCCION A LA INVESTIGACION DE OPERACIONES", Mc. Graw Hill, 1980.
- (5) Ackoff|Sasieni, "FUNDAMENTOS DE INVESTIGACION DE OPERACIONES", Limusa S. A., 1982.
- (6) P. M. Morse y G. E. Kimball, "METHODS OF OPERATIONS RESEARCH", John Willey & Sons, 1951.
- (7) E. Turban, "A SAMPLE SURVEY OF OPERATIONS RESEARCH ACTIVITIES AT THE CORPORATE LEVEL", Operations Research 20, 1972.
- (8) Harold J. Larson, "INTRODUCCION A LA TEORIA DE PROBABILIDADES E INFERENCIA ESTADISTICA", Limusa S. A., 1978.
- (9) Seymour Lipschuts, "TEORIA Y PROBLEMAS DE PROBABILIDAD", Serie Schaum, Ed. Mc. Graw Hill, 1971.
- (10) Ortiz Federico y Durán Jaime, "Se Ampliará el Aeropuerto al Vaso de Texcoco", Periódico Excelsior, 21 de Agosto de 1984.

- (11) Durán Jaime, "No Habrá Necesidad de Ampliar el Aeropuerto Capitalino Hasta 1992", Periódico Excelsior, 3 de Marzo de 1987.
- (12) Ashford & Wright, "AIRPORT ENGINEERING", Wiley Interscience, 1979.
- (13) "INTRODUCCION AL ESTUDIO DEL TRABAJO", Oficina Internacional del Trabajo, Ginebra Suiza, 1980, Tercera edición.
- (14) Benjamín W. Niebel, "INGENIERIA INDUSTRIAL estudio de tiempos y movimientos", Representaciones y Servicios de Ingeniería, - 1980.
- (15) "Tabla y Pronósticos", Dirección General de Aeropuertos, --- Depto. de Planeación, Oficina de Estadísticas y Aforos, México D. F., 1985.
- (16) Thomas L. Saaty, "ELEMENTS OF QUEUEING THEORY WITH APPLICATIONS", Dover Publications, Inc., Nueva York, 1961.
- (17) A. Kaufmann, "METODOS Y MODELOS de la investigación de operaciones", C. E. C. S. A., 1972, Tomo I.

